

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра агроінженерії та автомобільного транспорту

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти
«магістр»

на тему: «Розроблення технології відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників методом наноконпозиційного хімічного нікелювання»

КРМ.133ГМмд(ОНП)_21.13.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за міждисциплінарною
освітньо-науковою програмою
*«Сервісна інженерія в агропромисловому
виробництві»*
за спеціальностями *133 Галузеве
машинобудування, 208 Агроінженерія*
ступеня вищої освіти *магістр*
групи 133ГМ мд_21[2](ОНП)
КУРОЧКА Станіслав

Керівник: д.т.н., професор
ДІДУР Володимир

Рецензент: д.т.н., професор
ШЕЙЧЕНКО Віктор

Полтава – 2026 року

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра агроінженерії та автомобільного транспорту

Міждисциплінарна освітньо-наукова програма

«Сервісна інженерія в агропромисловому виробництві»

Спеціальності: 133 *«Галузеве машинобудування»*, 208 *«Агроінженерія»*

Ступінь вищої освіти *магістр*

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри агроінженерії
та автомобільного транспорту,**

канд. техн. наук, доцент,

Сергій ЛЯШЕНКО

04 листопада 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

КУРОЧКА Станіслав

1. Тема роботи: *«Розроблення технології відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників методом наноконпозиційного хімічного нікелювання»*,

керівник роботи ***докт. техн. наук, професор ДІДУР Володимир***,

затверджено засіданням вченої ради інженерно-технологічного факультету, протокол №3 від 24.10.2025 р.

2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи – 11 травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: *аналіз літературних джерел Полтавської обласної універсальної наукової бібліотеки імені Івана Котляревського; аналіз літературних джерел Національної бібліотеки України імені Володимира Вернадського; сучасний досвід підприємств машинобудування та АПК за тематичним спрямуванням.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Розділ 1. *Аналіз стану питання відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників.*

Розділ 2. *Обґрунтування вибору наноконпозиційного хімічного нікелювання для відновлення прецизійних деталей.*

Розділ 3. *Розробка технологічного процесу відновлення прецизійних деталей гідророзподільників.*

Розділ 4. *Оцінювання технологічної та економічної ефективності запропонованої технології.*

Розділ 5. *Охорона праці та екологічна безпека під час відновлення деталей методом хімічного нікелювання.*

5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *1. Обґрунтування теми кваліфікаційної роботи. 2. Прецизійні пари. 3. Зовнішній вигляд зношеної поверхні. 4. Схема методів підвищення зносостійкості. 5. Моделі розташування зерен. 6. Результати вимірювання мікротвердості. 7. Результати досліджень покриттів. 8. Оцінка економічної ефективності впровадження проектних рішень. 9. Висновки.*

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Власне ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання отримав
Практична реалізація розробок	Володимир ДУДНИК, доцент кафедри механічної та електричної інженерії		
	Петро МАКАРЕНКО, професор кафедри економіки та публічного управління		
	Павло ПИСАРЕНКО, завідувач кафедри екології, збалансованого природокористування та захисту довкілля		

7. Дата видачі завдання 04 листопада 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з.п.	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір і затвердження теми роботи	04.11.25	
2	Складання і затвердження розгорнутого плану та завдання на кваліфікаційну роботу	05-30.11.25	
3	Опрацювання літературних джерел		
4	Збір, вивчення і обробка інформації, необхідної для виконання роботи	01-31.12.25	
5	Виконання розділів роботи	01.01.26-10.05.26	
6	Оформлення тексту роботи		
7	Попередній захист роботи на кафедрі	11-15.05.26 15-19.05.26	
8	Доопрацювання роботи з урахуванням зауважень і пропозицій		
9	Нормалізаційний контроль		
10	Захист кваліфікаційної роботи	20-26.05.26	

Здобувач вищої освіти _____ Станіслав КУРОЧКА
(підпис)

Керівник роботи _____ Володимир ДІДУР
(підпис)

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	8
ABSTRACT	10
ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ВІДНОВЛЕННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ ГІДРАВЛІЧНИХ РОЗПОДІЛЬНИКІВ	18
1.1. Роль гідравлічних розподільників у роботі машин і технологічного обладнання	19
1.2. Конструктивні особливості прецизійних деталей гідравлічних розподільників	22
1.3. Умови роботи золотникових пар, корпусних каналів і спряжених поверхонь	25
1.4. Основні види зношування прецизійних деталей гідроапаратури	28
1.5. Характерні дефекти золотників, гільз, корпусів і робочих кромek розподільників	31
1.6. Вплив зношування на герметичність, чутливість і точність роботи гідророзподільників.....	34
1.7. Аналіз традиційних способів відновлення деталей гідравлічної апаратури	36
1.8. Обмеження традиційних методів ремонту прецизійних деталей.....	39
1.9. Перспективи застосування хімічного та наноконпозиційного нікелювання у ремонтному виробництві	41
1.10. Висновки до розділу 1.....	44
РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ НАНОКОМПОЗИЦІЙНОГО ХІМІЧНОГО НІКЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ.....	47
2.1. Загальна характеристика хімічного нікелювання як способу відновлення деталей.....	47
2.2. Особливості формування нікель-фосфорних покриттів без зовнішнього електричного струму	49
2.3. Структура та властивості хімічних нікелевих покриттів.....	51
2.4. Сутність наноконпозиційного хімічного нікелювання	53
2.5. Види нанодисперсних наповнювачів для композиційних нікелевих покриттів.....	55
2.6. Вплив наночастинок на твердість, зносостійкість і антифрикційні властивості покриття.....	58
2.7. Вимоги до покриттів для прецизійних деталей гідравлічних розподільників	60
2.8. Порівняльна оцінка хімічного нікелювання з гальванічним осадженням, напиленням і механічним відновленням	62
2.9. Обґрунтування вибору наноконпозиційного нікелевого покриття для відновлення деталей гідророзподільників.....	64
2.10. Висновки до розділу 2.....	66
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ ГІДРОРОЗПОДІЛЬНИКІВ	68

3.1. Вибір типових деталей гідравлічних розподільників для відновлення.....	68
3.2. Аналіз дефектів і визначення ремонтпридатності деталей.....	69
3.3. Дефектація золотників, корпусів, гільз і робочих кромок	71
3.4. Вимоги до точності, шорсткості та геометрії відновлюваних поверхонь	72
3.5. Підготовка поверхні перед нанесенням наноконпозиційного нікелевого покриття.....	73
3.6. Знежирення, травлення, активація та промивання деталей.....	74
3.7. Приготування робочого розчину для хімічного нікелювання	75
3.8. Введення та стабілізація нанодисперсних частинок у робочому розчині	77
3.9. Нанесення наноконпозиційного нікелевого покриття на прецизійні поверхні	78
3.10. Термічна обробка покриття після осадження	78
3.11. Фінішна механічна обробка, полірування та доведення поверхонь	79
3.12. Контроль якості відновлених деталей.....	80
3.13. Розроблення технологічної карти відновлення прецизійної деталі гідророзподільника.....	82
3.14. Висновки до розділу 3.....	84
РОЗДІЛ 4. ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОЇ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ	86
4.1. Критерії ефективності технології відновлення прецизійних деталей	86
4.2. Оцінювання якості відновлення за геометричними параметрами	87
4.3. Оцінювання товщини, рівномірності та суцільності нікелевого покриття	88
4.4. Оцінювання мікротвердості та зносостійкості наноконпозиційного шару	89
4.5. Оцінювання герметичності та стабільності роботи гідравлічного розподільника після відновлення	90
4.6. Порівняння запропонованої технології з традиційними способами ремонту	91
4.7. Визначення трудомісткості технологічного процесу	92
4.8. Оцінювання матеріальних витрат на відновлення деталей	93
4.9. Розрахунок економічної доцільності застосування наноконпозиційного хімічного нікелювання	94
4.10. Висновки до розділу 4.....	94
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ПІД ЧАС ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ХІМІЧНОГО НІКЕЛЮВАННЯ.....	96
5.1. Загальна характеристика умов праці під час виконання хіміко-технологічних ремонтних операцій	96
5.2. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори під час хімічного нікелювання	96
5.3. Вимоги безпеки під час підготовки поверхонь деталей.....	97
5.4. Вимоги безпеки під час роботи з хімічними розчинами та нанодисперсними матеріалами.....	98
5.5. Засоби індивідуального та колективного захисту працівників.....	98
5.6. Вентиляція, санітарно-гігієнічні вимоги та організація робочого місця...	99

5.7. Пожежна та хімічна безпека ремонтної ділянки	100
5.8. Екологічні аспекти застосування хімічного нікелювання.....	100
5.9. Поводження з відпрацьованими розчинами, промивними водами та твердими відходами.....	101
5.10. Висновки до розділу 5.....	102
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	103
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	105

АНОТАЦІЯ

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена розробленню технології відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників методом наноконпозиційного хімічного нікелювання. Актуальність теми зумовлена тим, що гідравлічні розподільники широко застосовуються у мобільній техніці, сільськогосподарських машинах, будівельному обладнанні, транспортних засобах, верстатах, технологічних лініях та інших гідрофікованих системах. Від їх технічного стану залежать точність керування потоками робочої рідини, герметичність гідросистеми, стабільність тиску, швидкість спрацювання виконавчих механізмів і надійність роботи машини загалом.

У процесі експлуатації прецизійні деталі гідравлічних розподільників працюють у складних умовах дії високого тиску, тертя, гідродинамічних навантажень, забрудненої робочої рідини, перепадів температур, кавітаційного та ерозійного впливу. Особливо відповідальними є золотникові пари, корпусні отвори, напрямні поверхні, робочі кромки, ущільнювальні пояски та канали керування. Навіть незначне зношування або порушення геометрії таких елементів може спричинити збільшення внутрішніх перетікань, зниження чутливості керування, заїдання золотника, втрату герметичності, нестабільність роботи гідросистеми та зменшення ресурсу обладнання.

У роботі розглядається доцільність застосування наноконпозиційного хімічного нікелювання для відновлення прецизійних деталей гідророзподільників. Хімічне нікелювання дозволяє формувати рівномірне нікель-фосфорне покриття на поверхнях складної конфігурації без використання зовнішнього електричного струму. Це є важливою перевагою для деталей із каналами, отворами, циліндричними поверхнями, кромками та зонами, де необхідна висока рівномірність шару. Введення нанодисперсних частинок у нікелеве покриття дає можливість підвищити твердість, зносостійкість, корозійну стійкість, антифрикційні властивості та стабільність роботи відновлених поверхонь.

Запропонована технологія передбачає дефектацію деталей, визначення їх ремонтпридатності, очищення, знежирення, механічну підготовку, хімічне травлення, активацію поверхні, приготування робочого розчину, стабілізацію нанодисперсних частинок, нанесення нанокмпозиційного нікелевого покриття, термічну обробку, фінішне доведення та контроль якості. Особлива увага приділяється забезпеченню точності геометричних параметрів, рівномірності покриття, адгезійної міцності, зносостійкості та герметичності гідравлічного вузла після відновлення.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованої технології в ремонтних підприємствах, сервісних центрах, машиноремонтних майстернях і навчально-виробничих лабораторіях для відновлення деталей гідравлічних розподільників, заміна яких є дорогою або технологічно недоцільною. Застосування нанокмпозиційного хімічного нікелювання може сприяти підвищенню ресурсу гідроапаратури, зниженню витрат на ремонт, відновленню точності роботи гідросистем і зменшенню потреби у заміні дорогих прецизійних деталей.

Ключові слова: гідравлічний розподільник, прецизійні деталі, золотникова пара, хімічне нікелювання, нанокмпозиційне покриття, нікель-фосфорне покриття, зношування, відновлення деталей, гідроапаратура, адгезія, зносостійкість, герметичність.

ABSTRACT

The master's qualification thesis is devoted to the development of a technology for restoring precision parts of hydraulic directional control valves using nanocomposite electroless nickel plating. The relevance of the topic is determined by the wide application of hydraulic distributors in mobile machinery, agricultural machines, construction equipment, transport vehicles, machine tools, technological lines, and other hydraulic systems. Their technical condition directly affects the accuracy of hydraulic fluid flow control, system tightness, pressure stability, response speed of actuators, and overall machine reliability.

During operation, precision parts of hydraulic distributors work under complex conditions involving high pressure, friction, hydrodynamic loads, contaminated hydraulic fluid, temperature fluctuations, cavitation, and erosive effects. The most critical components include spool pairs, housing bores, guide surfaces, working edges, sealing lands, and control channels. Even minor wear or geometric deviation of these elements can lead to increased internal leakage, reduced control sensitivity, spool sticking, loss of tightness, unstable hydraulic system operation, and reduced service life of the equipment.

The thesis substantiates the feasibility of using nanocomposite electroless nickel plating for restoring precision parts of hydraulic distributors. Electroless nickel plating makes it possible to form a uniform nickel-phosphorus coating on surfaces of complex geometry without the use of external electric current. This is an important advantage for parts with channels, bores, cylindrical surfaces, edges, and areas where high coating uniformity is required. The introduction of nanosized dispersed particles into the nickel coating makes it possible to improve hardness, wear resistance, corrosion resistance, antifriction properties, and operational stability of restored surfaces.

The proposed technology includes defect detection, assessment of repairability, cleaning, degreasing, mechanical surface preparation, chemical etching, activation, preparation of the working solution, stabilization of nanosized particles, deposition of the nanocomposite nickel coating, heat treatment, final finishing, and quality control.

Particular attention is paid to ensuring geometric accuracy, coating uniformity, adhesion strength, wear resistance, and tightness of the hydraulic unit after restoration.

The practical significance of the thesis lies in the possibility of applying the proposed technology at repair enterprises, service centers, machine repair workshops, and educational production laboratories for restoring hydraulic distributor parts whose replacement is expensive or technologically impractical. The use of nanocomposite electroless nickel plating can help increase the service life of hydraulic equipment, reduce repair costs, restore hydraulic system accuracy, and decrease the need to replace expensive precision parts.

Keywords: hydraulic distributor, precision parts, spool pair, electroless nickel plating, nanocomposite coating, nickel-phosphorus coating, wear, restoration of parts, hydraulic equipment, adhesion, wear resistance, tightness.

ВСТУП

Гідравлічні системи є важливою складовою сучасних машин, механізмів і технологічного обладнання. Вони широко застосовуються у тракторах, комбайнах, автомобілях спеціального призначення, будівельній техніці, вантажопідіймальних машинах, верстатах, промислових установках, дорожніх машинах, гірничому обладнанні та інших технічних системах. Перевагами гідравлічних приводів є висока питома потужність, плавність регулювання швидкості, можливість передавання значних зусиль, компактність виконавчих механізмів і зручність автоматизованого керування.

Одним із ключових елементів гідравлічної системи є гідравлічний розподільник. Його основне призначення полягає у керуванні напрямом, витратою та режимом руху робочої рідини між насосом, виконавчими механізмами, баком і допоміжними гідравлічними елементами. Від справності гідророзподільника залежить точність переміщення робочих органів, швидкість спрацювання гідроциліндрів або гідромоторів, стабільність тиску, герметичність системи та безпечність роботи машини.

Гідравлічні розподільники належать до складних і відповідальних гідроапаратів. Їх конструкція містить прецизійні деталі та спряження, які виготовляються з високою точністю. Найбільш важливими є золотники, корпусні отвори, гільзи, напрямні поверхні, ущільнювальні пояски, робочі кромки та канали керування. Такі деталі працюють із малими зазорами, тому навіть незначні зміни геометрії або стану поверхні можуть суттєво вплинути на роботу всього гідравлічного вузла.

У процесі експлуатації прецизійні деталі гідравлічних розподільників зазнають дії складного комплексу факторів. На них впливають високий тиск робочої рідини, гідродинамічні навантаження, тертя, мікропереміщення, забруднення оливи, тверді частинки, волога, температурні коливання, кавітаційні процеси та ерозійне руйнування поверхонь. Особливо небезпечним є потрапляння в робочу рідину абразивних частинок, які можуть пошкоджувати

поверхні золотників і корпусних отворів, збільшувати зазори, порушувати герметичність і спричиняти заклинювання рухомих елементів.

Для гідравлічних розподільників характерні такі дефекти, як зношування золотників, збільшення зазорів у золотникових парах, подряпини, risks, задири, корозійні пошкодження, ерозія робочих кромek, порушення циліндричності, локальне пошкодження ущільнювальних поверхонь, втрата герметичності та зниження чутливості керування. Наслідком цих дефектів є збільшення внутрішніх перетікань робочої рідини, падіння тиску, самовільне переміщення виконавчих механізмів, уповільнення реакції системи, нестабільність роботи та підвищення енергетичних втрат.

Особливість ремонту прецизійних деталей гідравлічних розподільників полягає в тому, що вони мають високі вимоги до точності розмірів, шорсткості поверхні, співвісності, циліндричності, рівномірності зазорів і герметичності. Застосування звичайних методів відновлення для таких деталей часто є обмеженим. Наплавлення, зварювання або грубе механічне нарощування матеріалу можуть спричинити деформації, зміну структури основного металу, втрату точності або неможливість забезпечення необхідної чистоти поверхні. Механічна обробка під ремонтний розмір також не завжди є прийнятною, оскільки зміна розмірів прецизійної пари може порушити її функціонування.

У зв'язку з цим актуальним є застосування технологій, які дозволяють формувати тонкі, рівномірні, зносостійкі та корозійностійкі покриття на деталях складної форми без значного теплового впливу. Одним із таких способів є хімічне нікелювання. На відміну від гальванічного осадження, хімічне нікелювання відбувається без зовнішнього джерела електричного струму, за рахунок хімічного відновлення іонів нікелю з розчину. Це дозволяє отримувати достатньо рівномірне покриття навіть на деталях складної конфігурації, у каналах, отворах, внутрішніх поверхнях і зонах, де звичайне електролітичне осадження може бути нерівномірним.

Особливий інтерес становить нанокomпозиційне хімічне нікелювання. Його сутність полягає у формуванні нікель-фосфорного або іншого нікелевого

покриття з введенням у його структуру нанодисперсних частинок. Такими частинками можуть бути тверді зносостійкі, антифрикційні, керамічні або вуглецеві компоненти, які змінюють властивості покриття. Завдяки цьому можна підвищити мікротвердість, зносостійкість, корозійну стійкість, опір задиру, стабільність роботи в умовах тертя та довговічність відновлених поверхонь.

Для прецизійних деталей гідравлічних розподільників наноконпозиційне хімічне нікелювання є перспективним тому, що дає змогу відновлювати зношені поверхні тонким контрольованим шаром, забезпечувати високу рівномірність покриття, підвищувати зносостійкість і зберігати точність деталі після фінішного доведення. Такий підхід особливо доцільний для золотників, корпусних отворів, гільз, робочих кромek і ущільнювальних поверхонь, для яких необхідне поєднання точності, герметичності та стійкості до зношування.

Разом із тим ефективність наноконпозиційного хімічного нікелювання залежить від багатьох технологічних чинників. До них належать якість підготовки поверхні, склад робочого розчину, концентрація і стабільність нанодисперсних частинок, температура процесу, тривалість осадження, швидкість формування покриття, рівномірність перемішування, режим промивання, термічна обробка та фінішне доведення. Порушення цих умов може призвести до нерівномірності покриття, зниження адгезії, пористості, включень, нестабільної товщини або погіршення функціональних властивостей деталі.

Актуальність теми магістерської кваліфікаційної роботи полягає у необхідності розроблення технології відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників, яка забезпечує відновлення геометричних параметрів, підвищення зносостійкості, зменшення внутрішніх перетікань робочої рідини та продовження ресурсу гідравлічної апаратури. Застосування наноконпозиційного хімічного нікелювання може бути ефективним рішенням для ремонтного виробництва, оскільки поєднує високу рівномірність покриття, можливість обробки складних поверхонь і формування шару з поліпшеними експлуатаційними властивостями.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розроблення технології відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників методом наноконпозиційного хімічного нікелювання з обґрунтуванням вибору покриття, технологічної послідовності операцій, режимів підготовки, нанесення, термічної обробки, фінішного доведення та контролю якості.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Проаналізувати конструктивні особливості та умови роботи прецизійних деталей гідравлічних розподільників.
2. Визначити характерні дефекти золотників, корпусних отворів, гільз, робочих кромek та ущільнювальних поверхонь.
3. Проаналізувати традиційні способи відновлення деталей гідравлічної апаратури та встановити їх обмеження.
4. Обґрунтувати доцільність застосування наноконпозиційного хімічного нікелювання для прецизійних деталей.
5. Визначити вимоги до нікелевого наноконпозиційного покриття за твердістю, зносостійкістю, адгезією, рівномірністю та корозійною стійкістю.
6. Розробити технологічну послідовність відновлення деталей гідравлічних розподільників.
7. Обґрунтувати операції очищення, знежирення, травлення, активації та нанесення покриття.
8. Визначити основні вимоги до термічної обробки, фінішного доведення і контролю якості відновлених деталей.
9. Провести порівняльне оцінювання запропонованої технології з традиційними методами ремонту.
10. Розглянути питання охорони праці та екологічної безпеки під час виконання робіт із хімічного нікелювання.

Об'єктом дослідження є процес відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників, які втратили працездатність або частково погіршили експлуатаційні властивості внаслідок зношування, ерозійного пошкодження, корозії або порушення геометричних параметрів.

Предметом дослідження є технологічні умови, операції та параметри відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників методом наноконпозиційного хімічного нікелювання, зокрема підготовка поверхні, склад і стабільність робочого розчину, процес осадження покриття, термічна обробка, фінішна обробка та контроль якості.

Методи дослідження передбачають аналіз технічної та наукової інформації з питань зношування гідравлічної апаратури, порівняльний аналіз ремонтних технологій, систематизацію вимог до прецизійних деталей, технологічне проектування процесу хімічного нікелювання, оцінювання якості покриттів, аналіз ремонтпридатності деталей і техніко-економічне обґрунтування запропонованої технології.

Наукова новизна роботи полягає в обґрунтуванні підходу до відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників шляхом формування наноконпозиційного нікелевого покриття з урахуванням характеру дефектів, умов роботи, вимог до точності, герметичності, зносостійкості та стабільності гідравлічного спряження.

Практичне значення роботи полягає у розробленні технологічної послідовності відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників методом наноконпозиційного хімічного нікелювання. Запропоновані технологічні рішення можуть бути використані в умовах ремонтних підприємств, сервісних центрів, машиноремонтних майстерень і навчально-виробничих лабораторій для відновлення золотників, корпусних отворів, гільз, робочих кромek та ущільнювальних поверхонь.

Очікуваний результат роботи полягає у формуванні обґрунтованої технології, яка забезпечує відновлення розмірної точності прецизійних деталей, підвищення зносостійкості поверхонь, зменшення внутрішніх перетікань робочої рідини, підвищення герметичності та продовження ресурсу гідравлічних розподільників.

Структура магістерської кваліфікаційної роботи передбачає анотацію, вступ, п'ять розділів, загальні висновки, список використаних джерел і додатки.

У першому розділі аналізується стан питання відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників. У другому розділі обґрунтовується вибір наноконпозиційного хімічного нікелювання. У третьому розділі розробляється технологічний процес відновлення деталей. У четвертому розділі оцінюється технічна та економічна ефективність запропонованої технології. У п'ятому розділі розглядаються питання охорони праці та екологічної безпеки під час виконання робіт із хімічного нікелювання.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ВІДНОВЛЕННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ ГІДРАВЛІЧНИХ РОЗПОДІЛЬНИКІВ

Гідравлічні системи широко застосовуються у сучасній мобільній, сільськогосподарській, будівельній, дорожній, транспортній, промисловій та технологічній техніці. Їх використання пояснюється високою питомою потужністю гідроприводу, компактністю виконавчих механізмів, плавністю регулювання швидкості, можливістю передавання значних зусиль, точністю керування робочими органами та зручністю автоматизації технологічних процесів [1–3].

Одним із найважливіших елементів гідравлічної системи є гідравлічний розподільник. Він забезпечує керування напрямом руху робочої рідини, перемикання потоків між насосом, баком і виконавчими механізмами, а також впливає на швидкість, плавність і точність роботи гідроциліндрів або гідромоторів. Від технічного стану гідророзподільника залежить не лише працездатність окремого вузла, а й стабільність роботи всієї гідросистеми машини або технологічного обладнання [4; 5].

Прецизійні деталі гідравлічних розподільників працюють у складних умовах, які поєднують дію високого тиску робочої рідини, тертя, гідродинамічних навантажень, мікропереміщень, температурних коливань, кавітаційного впливу, забруднення оливи та корозійно-ерозійних процесів. До таких деталей належать золотники, корпуси, гільзи, напрямні поверхні, робочі кромки, ущільнювальні пояски, канали керування, плунжерні елементи, дросельні поверхні та інші елементи, що працюють із малими зазорами і високими вимогами до точності [6–8].

Особливість прецизійних деталей гідророзподільників полягає в тому, що навіть незначне зношування, подряпини, задири, корозійні раковини, порушення циліндричності або збільшення зазорів можуть істотно погіршити роботу гідроапарата. На відміну від масивних деталей машин, для яких допустиме значне відновлювальне нарощування або механічна обробка під ремонтний розмір, прецизійні деталі гідравлічних розподільників потребують тонких,

рівномірних і функціонально стабільних покриттів, які не порушують точність спряжень [9; 10].

Саме тому відновлення таких деталей є складним технологічним завданням. Воно потребує не лише компенсації зношеного шару, а й забезпечення високої адгезії покриття, рівномірності товщини, мінімальної шорсткості, високої зносостійкості, корозійної стійкості, герметичності та стабільності роботи в умовах гідравлічного середовища [11; 12].

Одним із перспективних напрямів розв'язання цього завдання є застосування хімічного та наноконпозиційного хімічного нікелювання. Такий метод дозволяє формувати рівномірні нікель-фосфорні або наноконпозиційні нікелеві покриття на деталях складної форми без використання зовнішнього електричного струму. Це має особливе значення для гідравлічних розподільників, оскільки їх прецизійні деталі часто мають внутрішні канали, циліндричні отвори, кромки, пояски, канавки та складні поверхні, які важко рівномірно покрити традиційними електролітичними методами [13–15].

1.1. Роль гідравлічних розподільників у роботі машин і технологічного обладнання

Гідравлічний розподільник є керуючим елементом гідравлічної системи, який забезпечує зміну напрямку потоку робочої рідини, підключення або відключення виконавчих механізмів, реверс руху гідроциліндрів, керування гідромоторами, фіксацію положення робочих органів та виконання допоміжних операцій. У загальній структурі гідроприводу він займає проміжне положення між джерелом енергії, тобто насосом, і виконавчими механізмами, які перетворюють енергію рідини у механічну роботу [1; 4].

Гідравлічні розподільники застосовуються у тракторах, зернозбиральних і кормозбиральних комбайнах, навантажувачах, екскаваторах, автокранах, дорожніх машинах, пресовому обладнанні, металообробних верстатах, технологічних лініях, промислових маніпуляторах, лісозаготівельних машинах і багатьох інших видах техніки. У кожному з цих випадків гідророзподільник

виконує функцію точного керування потоком робочої рідини та забезпечує узгоджену роботу гідравлічних виконавчих органів [2; 5].

У мобільній техніці гідравлічні розподільники особливо важливі, оскільки вони керують роботою навісного обладнання, робочих органів, поворотних механізмів, підйомних систем, гідроциліндрів керування, гідромоторів приводів і допоміжних агрегатів. Наприклад, у тракторі гідророзподільник забезпечує піднімання й опускання навісного обладнання, роботу причіпних машин, регулювання положення робочих органів і виконання допоміжних гідравлічних операцій. У будівельній техніці він керує стрілами, ковшами, опорами, поворотними платформами та іншими механізмами [3; 6].

Для промислового обладнання гідравлічні розподільники мають не менш важливе значення. Вони забезпечують точне переміщення робочих органів верстатів, пресів, затискних пристроїв, подач, транспортерів, формувальних механізмів та інших технологічних систем. У таких умовах до розподільників висуваються підвищені вимоги щодо стабільності, швидкодії, повторюваності перемикачів, герметичності та мінімальних внутрішніх витоків [7].

Функціональна роль гідророзподільника полягає не лише у простому перемиканні потоків. Він впливає на якість керування машиною, плавність руху, точність позиціонування, швидкість спрацювання, енергетичні втрати, нагрівання робочої рідини, стабільність тиску та безпеку експлуатації. Якщо гідророзподільник працює нестабільно, це може проявлятися у ривках робочого органу, затримці перемикачів, самовільному опусканні вантажу, підвищеному шумі, перегріванні гідросистеми або втраті продуктивності [8; 9].

Для систематизації функцій гідравлічних розподільників у гідравлічних системах машин і технологічного обладнання доцільно розглянути табл. 1.1.

Як видно з табл. 1.1, гідравлічний розподільник є багатофункціональним елементом, від якого залежить не тільки напрям руху рідини, а й точність, плавність, безпечність та енергоефективність роботи гідравлічної системи.

Особливо важливим показником роботи гідравлічного розподільника є герметичність. Внутрішні перетікання через зазори між золотником і корпусом

Таблиця 1.1 – Основні функції гідравлічних розподільників у роботі машин і технологічного обладнання

Функція гідророзподільника	Зміст функції	Практичне значення
Керування напрямом потоку	Перемикання потоків робочої рідини між насосом, баком і виконавчими механізмами	Забезпечення руху гідроциліндрів і гідромоторів у потрібному напрямі
Реверсування руху	Зміна напрямку переміщення штока гідроциліндра або обертання гідромотора	Піднімання, опускання, висування, втягування або поворот робочого органу
Фіксація положення	Утримання виконавчого механізму в заданому положенні	Запобігання самовільному переміщенню робочого органу
Регулювання подачі	Обмеження або спрямування потоку робочої рідини через канали розподільника	Підвищення плавності та точності руху
Забезпечення герметичності	Обмеження внутрішніх і зовнішніх перетікань робочої рідини	Підтримання тиску та зменшення втрат енергії
Захист системи від нештатних режимів	Участь у розвантаженні, блокуванні або запобіганні неправильному перемикаю потіків	Підвищення безпеки експлуатації машини
Узгодження роботи вузлів	Забезпечення послідовної або паралельної роботи кількох виконавчих механізмів	Підвищення функціональності гідросистеми

або гільзою призводять до втрат робочої рідини між напірними, зливними та керуючими каналами. Це спричиняє зниження тиску, уповільнення руху виконавчих механізмів, нестабільність положення робочих органів і підвищення енергетичних втрат. Для прецизійної гідроапаратури навіть незначне збільшення зазору може істотно змінити витратні характеристики [10; 11].

Гідравлічні розподільники також впливають на швидкодію гідросистеми. Швидкодія визначається часом, необхідним для переміщення золотника, відкриття або перекриття каналів і зміни напрямку потоку. Якщо поверхні

золотника або корпусу мають зношування, задири, корозійні пошкодження чи забруднення, переміщення золотника може супроводжуватися підвищеним опором, заїданням або нерівномірністю ходу. Це погіршує керованість машини й може створювати небезпечні ситуації під час роботи [12].

Крім того, гідророзподільник впливає на тепловий режим гідросистеми. Надмірні внутрішні витоки, дроселювання через зношені або пошкоджені кромки, нестабільність перемикавання та підвищений гідравлічний опір спричиняють додаткові втрати енергії, які перетворюються на тепло. Унаслідок цього підвищується температура робочої рідини, знижується її в'язкість, погіршується мащення і прискорюється зношування деталей [13].

Таким чином, гідравлічний розподільник є одним із ключових елементів гідросистеми, а його технічний стан визначає працездатність, точність, стабільність і безпеку роботи машини або технологічного обладнання. Висока роль цього вузла обумовлює необхідність розроблення ефективних технологій відновлення його прецизійних деталей, зокрема таких, що забезпечують відновлення точності поверхонь, герметичності та зносостійкості без порушення геометрії спряжень.

1.2. Конструктивні особливості прецизійних деталей гідравлічних розподільників

Конструкція гідравлічного розподільника визначається його призначенням, типом керування, кількістю робочих позицій, кількістю ліній, величиною робочого тиску, витратою рідини, умовами експлуатації та вимогами до точності перемикавання. Найпоширенішими є золотникові гідророзподільники, у яких напрям потоку робочої рідини змінюється внаслідок осьового переміщення золотника відносно корпусу або гільзи [4; 14].

Основними елементами золотникового гідророзподільника є корпус, золотник, робочі канали, напірна лінія, зливна лінія, канали до виконавчих механізмів, ущільнювальні пояски, кромки керування, пружини центрування, елементи механічного, електромагнітного, гідравлічного або

електрогідравлічного керування. У багатьох конструкціях також використовуються втулки, гільзи, демпфувальні елементи, фіксатори положення, дросельні отвори та допоміжні клапанні елементи [15; 16].

Прецизійними у конструкції гідророзподільника є ті деталі та поверхні, які працюють із малими зазорами та високими вимогами до геометричної точності. До них належать зовнішні циліндричні поверхні золотника, внутрішні поверхні корпусних отворів або гільз, робочі кромки, ущільнювальні пояски, канали керування, торцеві поверхні, дросельні щілини та інші елементи, що визначають витратні, герметизувальні та керуючі характеристики апарата [17].

Золотник є рухомою деталлю, яка має кілька поясків, проточок і робочих кромок. Його переміщення у корпусі або гільзі відкриває одні канали й перекриває інші. Від точності виготовлення золотника залежить рівномірність зазору, герметичність, плавність переміщення та чутливість розподільника. Золотник повинен мати високу циліндричність, малу шорсткість, достатню твердість поверхні, стійкість до задирів і мінімальне відхилення форми по довжині [18].

Корпус гідророзподільника є базовою деталлю, у якій розміщуються канали, отвори, порожнини, посадкові місця та напрямні поверхні. Внутрішній отвір корпусу або встановлена в ньому гільза утворює спряження із золотником. Саме це спряження є одним із найвідповідальніших у розподільнику, оскільки воно повинно одночасно забезпечувати рухомість золотника, мінімальні внутрішні перетікання, достатню герметичність і стабільність роботи при зміні температури, тиску та в'язкості робочої рідини [19].

Гільзи застосовуються у тих конструкціях, де потрібно підвищити ремонтпридатність, забезпечити точність внутрішньої поверхні або сформувати змінний прецизійний елемент. Гільза може мати отвори, канавки, дросельні щілини, кромки керування та інші елементи, які взаємодіють із золотником. Перевагою гільзованих конструкцій є можливість заміни або відновлення гільзи без повної заміни корпусу [20].

Робочі кромки золотника й корпусних каналів є особливо важливими, оскільки вони визначають момент відкриття або перекриття потоку, величину прохідного перерізу, характер дроселювання, плавність перемикавання та гідравлічні втрати. Зношування, заокруглення, задири або ерозійне пошкодження таких кромок змінює витратну характеристику розподільника і може призвести до втрати точності керування [21].

Для систематизації прецизійних елементів гідравлічного розподільника та їх функціонального призначення наведено табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Прецизійні деталі та поверхні гідравлічних розподільників

Деталь або поверхня	Конструктивна характеристика	Основне функціональне призначення	Основні вимоги
Золотник	Рухома циліндрична деталь із поясками, проточками та кромками	Перемикавання потоків робочої рідини	Циліндричність, мала шорсткість, зносостійкість, плавність ходу
Корпусний отвір	Внутрішня прецизійна поверхня корпусу	Напрямне спряження із золотником або гільзою	Співвісність, точність діаметра, відсутність задири і овальності
Гільза	Вставна або базова втулкова деталь із каналами	Формування точної поверхні спряження із золотником	Точність отвору, стабільність форми, зносостійкість
Робочі кромки	Гострі або фасонні краї каналів і поясків	Відкриття, перекриття та дроселювання потоку	Стабільність форми, відсутність сколів, ерозійна стійкість
Ущільнювальні пояски	Ділянки золотника або корпусу, що обмежують перетікання	Зменшення внутрішніх витоків	Точність зазору, гладкість, зносостійкість
Канали керування	Отвори, проточки, дросельні ділянки	Підведення або відведення робочої рідини	Чистота, відсутність закупорювання, ерозійна стійкість

Торцеві поверхні	Площини контакту з кришками, ущільненнями або пружинами	Базування, герметизація, передавання зусиль	Площинність, шорсткість, відсутність раковин
---------------------	---	--	--

З табл. 1.2 видно, що прецизійні деталі гідророзподільника виконують різні функції, але всі вони мають спільну особливість — високі вимоги до точності та якості поверхневого шару. Саме ці вимоги ускладнюють ремонт і обмежують застосування грубих методів відновлення.

Матеріали прецизійних деталей гідророзподільників повинні забезпечувати міцність, стабільність форми, зносостійкість, корозійну стійкість і технологічність обробки. Золотники часто виготовляють із конструкційних або легованих сталей із подальшим термічним або хіміко-термічним зміцненням. Корпуси можуть виготовлятися зі сталі, чавуну, алюмінієвих сплавів або спеціальних матеріалів залежно від призначення апарата, тиску та умов експлуатації [22; 23].

Особливістю золотникових пар є дуже малий зазор між рухомою і нерухомою деталями. Цей зазор має бути достатнім для вільного переміщення золотника і одночасно достатньо малим для обмеження внутрішніх витоків. Якщо зазор занадто малий, можливе заклинювання; якщо занадто великий — збільшуються перетікання робочої рідини. Тому під час відновлення необхідно забезпечити не просто нарощування поверхні, а відновлення функціонального зазору з урахуванням умов роботи, температурного розширення і властивостей робочої рідини [24].

Отже, конструктивні особливості прецизійних деталей гідравлічних розподільників визначають високі вимоги до технології їх відновлення. Відновлювальний шар повинен бути тонким, рівномірним, міцно зчепленим з основою, зносостійким, корозійностійким і придатним до фінішної обробки. Саме цим вимогам потенційно відповідають хімічні та наноконпозиційні нікелеві покриття.

1.3. Умови роботи золотникових пар, корпусних каналів і спряжених поверхонь

Золотникові пари, корпусні канали та спряжені поверхні гідравлічних розподільників працюють у складних умовах взаємодії робочої рідини, механічного контакту, тиску, температури, вібрацій і забруднень. Їх працездатність залежить від точності виготовлення, стану поверхонь, режиму мащення, чистоти робочої рідини, стабільності тиску та правильності експлуатації гідросистеми [6; 25].

Основною умовою роботи золотникової пари є наявність малих зазорів між зовнішньою поверхнею золотника та внутрішньою поверхнею корпусу або гільзи. Через ці зазори може просочуватися робоча рідина, тому їх величина безпосередньо впливає на герметичність і точність роботи гідророзподільника. При нормальному стані поверхонь зазор забезпечує плавне переміщення золотника без заклинювання та з допустимим рівнем внутрішніх витоків [10; 24].

Золотник під час роботи здійснює зворотно-поступальні переміщення, які можуть бути частими, короткоходовими або тривалими залежно від режиму експлуатації. У процесі переміщення виникає тертя між спряженими поверхнями. Хоча робоча рідина виконує мастильну функцію, режим мащення не завжди є стабільним. За наявності високого тиску, забруднення, перекосів, нерівномірного навантаження або недостатньої чистоти поверхонь можуть виникати зони граничного тертя, локального контакту та підвищеного зношування [26].

Корпусні канали працюють у режимі постійного або змінного руху робочої рідини. Через них проходять потоки під високим тиском, які можуть створювати ерозійний вплив на кромки, отвори, дросельні ділянки та місця різкої зміни напрямку потоку. Якщо у робочій рідині містяться тверді частинки, ерозійне пошкодження прискорюється. Особливо небезпечними є дрібні абразивні частинки, які проходять через фільтри або утворюються внаслідок зношування інших елементів гідросистеми [27].

На стан спряжених поверхонь впливає температура робочої рідини. Під час роботи гідросистеми температура може підвищуватися через втрати енергії на дроселювання, внутрішні витоки, тертя, роботу насоса та опір у магістралях. З підвищенням температури змінюється в'язкість рідини, а отже — умови мащення і величина витоків. Зменшення в'язкості може посилювати внутрішні перетікання через зношені зазори, а також погіршувати захисні властивості мастильної плівки [28].

У реальних умовах експлуатації гідророзподільники можуть працювати при змінних навантаженнях. Періодичне підвищення тиску, гідравлічні удари, різке перемикавання потоків, часте спрацювання виконавчих механізмів, вібрації та забруднення робочої рідини створюють умови для прискореного зношування прецизійних поверхонь. Особливо небезпечним є поєднання високого тиску, забрудненої рідини та малого зазору в золотниковій парі [29].

Для узагальнення умов роботи основних прецизійних елементів гідравлічних розподільників наведено табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Умови роботи основних прецизійних елементів гідравлічних розподільників

Елемент гідророзподільника	Основні умови роботи	Небезпечні фактори	Можливі наслідки
Золотникова пара	Малі зазори, зворотно-поступальний рух, контакт із робочою рідиною	Забруднення рідини, перекося, локальне тертя	Зношування, заїдання, збільшення витоків
Корпусні канали	Потік рідини під тиском, зміна напрямку потоку	Ерозія, кавітація, тверді частинки	Пошкодження кромки, збільшення прохідних перерізів
Робочі кромки	Перекриття та відкриття потоків, дроселювання	Гідравлічні удари, ерозійний вплив	Заокруглення, сколи, втрата точності керування
Ущільнювальні пояски	Обмеження перетікань між порожнинами	Зношування, подряпини, корозія	Збільшення внутрішніх витоків

Гільзи	Спряження із золотником, базування рухомої деталі	Овальність, зношування, задири	Порушення зазору, заклинювання
Дросельні отвори	Обмеження витрати та формування керуючого сигналу	Засмічення, ерозія, кавітація	Нестабільність витрати, порушення керування

З табл. 1.3 видно, що умови роботи прецизійних елементів гідророзподільника відрізняються, але всі вони пов'язані з необхідністю збереження точності, чистоти поверхонь і стабільності гідравлічного контакту.

Особливе значення має чистота робочої рідини. Забруднення оливи твердими частинками є однією з головних причин зношування гідроапаратури. Частинки можуть потрапляти в систему під час монтажу, ремонту, заміни оливи, руйнування ущільнень, зношування насосів, гідроциліндрів, шлангів і клапанів.

У зоні золотникової пари такі частинки діють як абразив, спричиняють подряпини, риси, локальні задири та порушення плавності ходу золотника [30].

Не менш важливим є вплив гідравлічних ударів. Різке перемикавання потоків, швидке закриття каналів або раптова зміна навантаження виконавчого механізму можуть спричинити короточасні піки тиску. Такі піки підвищують навантаження на кромки, ущільнювальні пояски, корпусні канали та спряжені поверхні. При тривалій дії вони можуть сприяти розвитку втомних пошкоджень, мікротріщин і локального руйнування покриттів [31].

Отже, умови роботи золотникових пар, корпусних каналів і спряжених поверхонь гідравлічних розподільників є складними та багатфакторними. Вони вимагають від матеріалів і покриттів високої зносостійкості, адгезії, корозійної стійкості, гладкості, рівномірності та стабільності при роботі в середовищі гідравлічної рідини.

1.4. Основні види зношування прецизійних деталей гідроапаратури

Зношування прецизійних деталей гідроапаратури є одним із головних чинників втрати працездатності гідравлічних розподільників. На відміну від грубих механічних вузлів, у яких допустимі порівняно значні зміни розмірів, у

прецизійній гідроапаратурі навіть мікронні відхилення можуть призвести до істотного погіршення роботи [8; 10].

Основними видами зношування прецизійних деталей гідравлічних розподільників є абразивне, адгезійне, ерозійне, кавітаційне, корозійно-механічне, фретинг-зношування та втомне руйнування поверхневого шару. У реальних умовах ці види зношування часто поєднуються між собою, що ускладнює діагностику дефектів і вибір способу відновлення [25; 27].

Абразивне зношування виникає внаслідок дії твердих частинок, які знаходяться у робочій рідині або потрапляють у зазор між золотником і корпусом. Такі частинки можуть бути продуктами зношування, залишками забруднень після ремонту, частинками ущільнень, корозійними продуктами, пилом або металевою стружкою. Вони утворюють подряпини, риски, мікроканавки та спричиняють поступове збільшення зазорів [30].

Адгезійне зношування виникає при локальному контакті мікронерівностей поверхонь, коли мастильна плівка недостатня або порушена. У золотникових парах воно може проявлятися у вигляді задирів, слідів схоплювання, підвищеної шорсткості та ускладненого переміщення золотника. Причиною може бути недостатня чистота рідини, перекіс золотника, надмірне навантаження, мала твердість поверхні або порушення геометрії спряження [26].

Ерозійне зношування характерне для корпусних каналів, робочих кромek, дросельних отворів і зон, де потік рідини має підвищену швидкість або різко змінює напрям. Частинки, що рухаються разом із рідиною, ударяються об поверхню, поступово руйнуючи її. Ерозія особливо небезпечна для робочих кромek, оскільки змінює форму прохідного перерізу і порушує витратні характеристики розподільника [27; 31].

Кавітаційне зношування виникає внаслідок утворення та схлопування парогазових бульбашок у робочій рідині. Коли бульбашки схлопуються поблизу металевої поверхні, виникають локальні імпульсні навантаження, які руйнують поверхневий шар. Кавітація може проявлятися у вигляді дрібних кратерів, виразок, матовості поверхні та локального викришування матеріалу [28].

Корозійно-механічне зношування пов'язане з одночасною дією механічного контакту та хімічного впливу робочого середовища. Якщо робоча рідина містить воду, продукти окиснення, агресивні домішки або втратила стабільність, на поверхнях можуть утворюватися корозійні осередки. У зоні тертя ці продукти руйнуються, після чого процес повторюється, прискорюючи втрату матеріалу [32].

Фретинг-зношування може виникати у з'єднаннях, де присутні малі коливальні переміщення. Для гідроапаратури воно характерне для посадкових місць, різбових з'єднань, стикових поверхонь, втулок і гільз, які працюють в умовах вібрацій. Його проявами є темні або руді плями, мікропітинг, продукти окиснення та послаблення з'єднань [33].

Для узагальнення основних видів зношування прецизійних деталей гідроапаратури наведено табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Основні види зношування прецизійних деталей гідравлічної апаратури

Вид зношування	Основний механізм виникнення	Типові прояви	Найбільш уразливі деталі
Абразивне	Дія твердих частинок у зазорі або потоці рідини	Риски, подряпини, мікроканавки, збільшення зазору	Золотники, гільзи, корпусні отвори
Адгезійне	Локальне схоплювання мікронерівностей при порушенні мащення	Задири, прихоплення, нерівномірний хід	Золотникові пари, напрямні поверхні
Ерозійне	Ударна дія потоку рідини та частинок	Заокруглення кромek, вимивання матеріалу	Канали, дросельні отвори, робочі кромки
Кавітаційне	Схлопування парогазових бульбашок біля поверхні	Кратери, виразки, локальне викришування	Дросельні зони, канали високої швидкості потоку
Корозійно-механічне	Поєднання тертя з хімічною дією середовища	Корозійні плями, раковини, шорсткість	Корпуси, гільзи, торцеві поверхні

Фретинг-зношування	Малі коливальні переміщення у з'єднаннях	Потемніння, продукти окиснення, мікропошкодження	Посадки гільз, стикові поверхні
Втомне зношування	Накопичення мікропошкоджень від циклічних навантажень	Мікротріщини, викришування, пітинг	Кромки, пояски, навантажені поверхні

Як видно з табл. 1.4, зношування прецизійних деталей гідроапаратури має різну природу, тому вибір способу відновлення повинен урахувати не лише геометричну втрату матеріалу, а й механізм пошкодження поверхні.

Для гідравлічних розподільників особливо небезпечним є поєднання абразивного та ерозійного зношування. Абразивні частинки пошкоджують золотникову пару, а прискорений потік рідини руйнує кромки каналів. У результаті одночасно збільшується зазор, змінюється прохідний переріз і погіршується герметичність. Таке поєднання дефектів може призвести до швидкого зниження функціональних характеристик розподільника [30; 31].

Важливо, що прецизійні деталі не завжди можна відновити традиційними методами. Наприклад, при значному зношуванні золотника просте шліфування зменшить його діаметр і збільшить зазор у парі. Наплавлення або зварювання можуть спричинити деформацію, а гальванічне покриття може бути нерівномірним на складних поверхнях. Тому метод відновлення повинен забезпечувати тонке й рівномірне нарощування шару з високою якістю поверхні [34].

1.5. Характерні дефекти золотників, гільз, корпусів і робочих кромek розподільників

Дефекти гідравлічних розподільників виникають унаслідок природного зношування, забруднення робочої рідини, порушення режимів експлуатації, недостатньої фільтрації, корозійного впливу, гідравлічних ударів, неправильної збірки, неякісного ремонту або тривалої роботи за підвищених температур і навантажень [25; 30].

Найбільш відповідальними деталями є золотники, гільзи, корпуси та робочі кромки. Саме вони визначають основні функціональні характеристики розподільника: герметичність, плавність переміщення, чутливість керування, величину внутрішніх витоків, швидкодію та стабільність перемикання потоків [10; 17].

Для золотників характерними дефектами є зношування поясків, подряпини, риски, задири, корозійні плями, локальні прихоплення, порушення циліндричності, зменшення діаметра, заокруглення робочих кромок, забруднення проточок і пошкодження торцевих поверхонь. Особливо небезпечними є поздовжні риски, оскільки вони можуть створювати канали для внутрішніх перетікань рідини між порожнинами розподільника [18; 24].

Гільзи та корпусні отвори мають інші типові дефекти: збільшення діаметра, овальність, конусність, подряпини, задири, корозійні раковини, ерозійне пошкодження отворів, порушення співвісності каналів, пошкодження посадкових поверхонь, розтріскування тонких перемичок або засмічення внутрішніх каналів. Для гільз особливо важливим є збереження стабільної геометрії внутрішньої поверхні, оскільки вона безпосередньо взаємодіє із золотником [19; 20].

Корпуси гідророзподільників, крім прецизійних отворів, мають різьбові з'єднання, площини стикування, канали, посадкові місця клапанів, ущільнювальні поверхні та отвори для під'єднання гідроліній. Їх дефектами можуть бути тріщини, корозія, ерозія каналів, пошкодження різьби, зношування посадкових місць, порушення площинності, витікання рідини через стики або мікротріщини [32].

Робочі кромки є одними з найбільш чутливих елементів. Вони можуть мати заокруглення, сколи, ерозійне вимивання, задири, викришування, порушення гостроти або нерівномірне зношування. Навіть невелика зміна форми кромки може вплинути на момент відкриття каналу, характер дроселювання, витратну характеристику та плавність роботи розподільника [21; 27].

Для систематизації характерних дефектів основних деталей гідравлічних розподільників наведено табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Характерні дефекти прецизійних деталей гідравлічних розподільників

Деталь або елемент	Характерні дефекти	Ймовірні причини виникнення	Наслідки для роботи розподільника
Золотник	Риски, задири, зношування поясків, корозія, порушення циліндричності	Забруднення рідини, порушення мащення, перекіс, тривала експлуатація	Збільшення витоків, заїдання, зниження плавності ходу
Гільза	Овальність, конусність, подряпини, ерозія отворів, корозійні раковини	Абразивне зношування, гідравлічні удари, забруднення	Порушення зазору, нестабільність переміщення золотника
Корпус	Зношування каналів, пошкодження різьби, тріщини, корозія, витікання	Перевантаження, корозія, неякісний монтаж, старіння матеріалу	Втрата герметичності, зниження ресурсу вузла
Робочі кромки	Заокруглення, сколи, ерозійне вимивання, задири	Висока швидкість потоку, тверді частинки, кавітація	Порушення витратної характеристики та точності керування
Ущільнювальні пояски	Зношування, подряпини, локальні задири	Тертя, забруднення, недостатня твердість	Збільшення внутрішніх перетікань
Канали керування	Засмічення, ерозія, корозія, зміна прохідного перерізу	Забруднена рідина, кавітація, продукти зношування	Затримка спрацювання, нестабільність тиску
Торцеві поверхні	Неплощинність, раковини, подряпини, витікання	Корозія, неякісна збірка, пошкодження ущільнень	Зовнішні витoki, зниження герметичності

З табл. 1.5 видно, що дефекти мають не лише геометричний, а й функціональний характер. Вони змінюють не просто розміри деталей, а умови руху робочої рідини, гідравлічний опір, герметичність і стабільність керування.

Під час дефектації гідророзподільників важливо виявляти не лише видимі пошкодження, а й приховані відхилення. Наприклад, золотник може не мати грубих задирів, але мати порушення циліндричності або зменшення діаметра, що призведе до збільшення витоків. Корпусний отвір може візуально виглядати справним, але мати овальність або локальне ерозійне пошкодження кромки. Саме тому дефектація повинна включати візуальний огляд, вимірювання геометрії, контроль шорсткості, перевірку плавності переміщення золотника та оцінювання герметичності [35].

Характер дефекту визначає можливість застосування відновлення. Якщо поверхня має незначне зношування, подряпини, мікрориски або втрату покриття, вона може бути придатною для відновлення тонким нанокompозиційним шаром. Якщо ж деталь має глибокі тріщини, значну деформацію, руйнування робочих кромок або критичне збільшення зазору, її відновлення може бути недоцільним або потребувати комбінованої технології [36].

1.6. Вплив зношування на герметичність, чутливість і точність роботи гідророзподільників

Зношування прецизійних деталей гідравлічних розподільників безпосередньо впливає на їх функціональні характеристики. Найбільш важливими з них є герметичність, чутливість, точність перемикавання, плавність ходу золотника, стабільність витрати, швидкодія та здатність утримувати виконавчі механізми у заданому положенні [10; 24].

Герметичність гідророзподільника залежить від величини зазорів між золотником і корпусом або гільзою, стану ущільнювальних поясків, точності обробки поверхонь, в'язкості робочої рідини та перепаду тиску між порожнинами. Зношування збільшує зазор і створює додаткові мікроканали для перетікання. Унаслідок цього частина рідини проходить не через заданий канал, а через зношені спряження, що знижує ефективність роботи гідросистеми [11; 37].

Збільшення внутрішніх витоків призводить до зниження тиску в робочих магістралях, зменшення швидкості переміщення виконавчих органів, нагрівання оливи, зростання енергетичних втрат і зниження ККД гідроприводу. У деяких випадках це може спричинити самовільне опускання робочого органу, повільне переміщення гідроциліндра або неможливість утримання навантаження [28].

Чутливість гідророзподільника визначається здатністю реагувати на керуючу дію при мінімальному переміщенні золотника або зміні керуючого сигналу. Якщо робочі кромки зношені, заокруглені або мають ерозійні пошкодження, момент відкриття каналу змінюється. У результаті розподільник може реагувати із запізненням, нерівномірно або з ривками. Це особливо небезпечно для систем точного позиціювання, навісного обладнання, підйомних механізмів і автоматизованих гідросистем [21; 29].

Точність роботи гідророзподільника залежить від геометрії золотникової пари та стабільності прохідних перерізів. При зношуванні кромки, зміні діаметра золотника або овальності корпусного отвору порушується симетрія відкриття каналів. Це може спричинити різну швидкість руху виконавчого механізму в різних напрямках, нестабільне положення золотника, нерівномірне дроселювання і коливання тиску [38].

Плавність роботи також тісно пов'язана зі станом поверхонь. Задири, подряпини, локальні прихоплення, корозійні раковини або частинки забруднення можуть створювати додатковий опір переміщенню золотника. Унаслідок цього виникає заїдання, ривковий рух, підвищене зусилля керування або неповне повернення золотника у нейтральне положення [26; 35].

Для узагальнення впливу основних дефектів на функціональні показники гідравлічного розподільника наведено табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Вплив зношування прецизійних деталей на роботу гідравлічного розподільника

Вид дефекту	Основна зона виникнення	Вплив на герметичність	Вплив на чутливість і точність
-------------	-------------------------	------------------------	--------------------------------

Збільшення зазору	Золотникова пара	Значне збільшення внутрішніх витоків	Зниження стабільності керування
Подряпини та риски	Золотник, гільза, корпусний отвір	Утворення каналів перетікання	Можливе заїдання та нестабільний хід
Заокруглення кромки	Робочі кромки золотника і каналів	Непрямий вплив через зміну прохідного перерізу	Порушення моменту відкриття каналів
Ерозія каналів	Корпусні канали, дросельні отвори	Зміна витрати та локальні витоки	Порушення витратної характеристики
Корозійні раковини	Корпус, гільза, ущільнювальні поверхні	Втрата щільності контакту	Нестабільність переміщення
Задири	Золотник, гільза	Місцеве порушення герметичності	Заїдання, підвищене зусилля керування
Овальність отвору	Гільза або корпус	Нерівномірний зазор і витоки	Перекис золотника, нестабільне перемикавання

Як видно з табл. 1.6, зношування прецизійних деталей гідророзподільників має комплексний негативний вплив. Один і той самий дефект може одночасно погіршувати герметичність, плавність, чутливість і точність керування.

Внутрішні витоки є одним із найбільш показових наслідків зношування. Їх величина залежить від зазору, довжини ущільнювального пояса, перепаду тиску та в'язкості рідини. При збільшенні зазору витоки можуть зростати непропорційно швидко, тому навіть незначна втрата точності золотникової пари може мати значний вплив на роботу системи [37].

Зношування також впливає на енергетичну ефективність гідросистеми. Витоки й дроселювання через пошкоджені поверхні спричиняють втрати енергії, які переходять у тепло. Підвищення температури рідини знижує її в'язкість, що додатково збільшує витоки. Таким чином, формується негативний цикл: зношування збільшує витоки, витоки підвищують температуру, температура зменшує в'язкість, а зменшення в'язкості ще більше збільшує витоки [28; 38].

Отже, зношування прецизійних деталей гідравлічних розподільників безпосередньо впливає на їх функціональну придатність. Для відновлення таких деталей необхідно застосовувати технології, які дозволяють відновити точність

зазорів, якість поверхні, зносостійкість і герметичність без погіршення геометрії та без створення додаткових деформацій.

1.7. Аналіз традиційних способів відновлення деталей гідравлічної апаратури

У ремонтній практиці для відновлення деталей гідравлічної апаратури застосовують різні методи: механічну обробку, полірування, хонінгування, притирання, гальванічні покриття, хромування, нікелювання, напилення, встановлення ремонтних втулок, заміну прецизійної пари, герметизацію корпусів, ремонт різьбових з'єднань і комбіновані технології [34–36].

Механічна обробка є одним із найбільш доступних способів усунення поверхневих дефектів. Вона може включати шліфування, полірування, доведення, хонінгування або притирання. Такі операції дозволяють усунути мікронерівності, зменшити шорсткість, прибрати неглибокі подряпини та покращити плавність переміщення золотника. Проте механічна обробка не відновлює втрачений матеріал, а навпаки зменшує розмір деталі, що для прецизійних спряжень часто є критичним [39].

Хонінгування використовується для внутрішніх циліндричних поверхонь, зокрема корпусних отворів і гільз. Воно дозволяє підвищити точність форми, покращити шорсткість і сформувати необхідний мікрорельєф. Однак при значному зношуванні або збільшенні зазору хонінгування не вирішує проблему, оскільки додатково збільшує діаметр отвору [40].

Притирання і доведення застосовують для забезпечення високої точності та малої шорсткості поверхонь. Ці методи ефективні для фінішної обробки, але не можуть компенсувати суттєве зношування. Крім того, вони потребують високої культури виробництва, чистоти, точного контролю та кваліфікованого персоналу [39].

Гальванічні покриття, зокрема хромування і нікелювання, широко використовують для відновлення зношених поверхонь. Вони дозволяють нарощувати тонкі шари металу з підвищеною твердістю, зносостійкістю або

корозійною стійкістю. Однак електролітичні методи мають проблему нерівномірного розподілу покриття на деталях складної форми. На виступах і кромках шар може бути товщим, а у внутрішніх порожнинах, отворах і каналах — тоншим або нестабільним [13; 41].

Хромування забезпечує високу твердість і зносостійкість, але має низку технологічних та екологічних обмежень. Для прецизійних деталей важливо, що хромове покриття може мати мікротріщини, внутрішні напруження, нерівномірність товщини та обмежену здатність до рівномірного осадження у складних внутрішніх поверхнях [41].

Газотермічне або плазмове напилення дозволяє формувати зносостійкі покриття, однак для прецизійних деталей гідророзподільників цей метод часто є надмірно грубим. Покриття може мати пористість, потребувати значної фінішної обробки, а теплова дія або механічне навантаження під час підготовки поверхні можуть порушити геометричну точність деталі [42].

Встановлення ремонтних втулок або гільз може бути ефективним для корпусних деталей, але цей спосіб потребує розточування, забезпечення посадки, співвісності, герметичності та подальшої точної обробки. Для малогабаритних або складних корпусів розподільників така технологія може бути складною і не завжди економічно виправданою [36].

Для порівняння традиційних способів відновлення деталей гідравлічної апаратури наведено табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Традиційні способи відновлення деталей гідравлічної апаратури

Спосіб відновлення	Сфера застосування	Переваги	Основні обмеження
Полірування	Золотники, плунжери, пояски	Зменшення шорсткості, усунення дрібних дефектів	Не відновлює розмір
Хонінгування	Гільзи, корпусні отвори	Поліпшення форми й шорсткості отвору	Збільшує діаметр, не компенсує зношування

Притирання	Прецизійні спряження, клапанні поверхні	Висока точність і щільність контакту	Висока трудомісткість, обмежена компенсація дефектів
Гальванічне хромування	Валики, золотники, плунжери	Висока твердість і зносостійкість	Нерівномірність шару, екологічна складність
Гальванічне нікелювання	Металеві поверхні, захисні покриття	Корозійна стійкість, декоративні та захисні властивості	Залежність від розподілу струму
Газотермічне напилення	Зовнішні поверхні, великі деталі	Можливість нанесення зносостійких шарів	Пористість, складність для прецизійних отворів
Ремонтні втулки	Корпуси, гнізда, отвори	Відновлення отворів і посадок	Потреба у точному розточуванні й співвісності
Заміна прецизійної пари	Золотник — корпус або золотник — гільза	Гарантоване відновлення працездатності	Висока вартість, потреба у запасних деталях

З табл. 1.7 видно, що традиційні способи мають певну сферу застосування, але для прецизійних деталей гідророзподільників вони часто не забезпечують одночасного відновлення розміру, точності, рівномірності шару, зносостійкості та герметичності.

Отже, аналіз традиційних методів показує, що вони можуть бути ефективними для окремих дефектів, але не завжди відповідають вимогам відновлення прецизійних деталей. Це створює передумови для застосування хімічного нікелювання та його наноконпозиційних різновидів.

1.8. Обмеження традиційних методів ремонту прецизійних деталей

Традиційні методи ремонту гідравлічної апаратури мають значний практичний досвід застосування, але для прецизійних деталей гідророзподільників їх можливості суттєво обмежені. Це пов'язано насамперед із малими допусками, складною геометрією, необхідністю збереження

рівномірних зазорів, високими вимогами до шорсткості та небажаністю теплового або механічного впливу, який може порушити форму деталі [34; 39].

Основним обмеженням механічної обробки є те, що вона усуває дефект шляхом зняття матеріалу. Для звичайних деталей машин це може бути прийнятним, але для золотникових пар зняття навіть тонкого шару може збільшити зазор і погіршити герметичність. Тому полірування, шліфування або хонінгування можуть використовуватися переважно як фінішні операції, а не як повноцінне відновлення розміру [39; 40].

Гальванічні покриття мають проблему нерівномірності осадження. Оскільки процес залежить від розподілу електричного поля, шар на виступах і зовнішніх поверхнях може бути значно товщим, ніж у заглибленнях, каналах або внутрішніх отворах. Для гідравлічних розподільників це є суттєвим недоліком, адже саме внутрішні поверхні й кромки часто потребують точного відновлення [13; 41].

Хромування, попри високу твердість покриття, має низку обмежень. Воно може супроводжуватися внутрішніми напруженнями, мікротріщинуватістю, складністю обробки та екологічними ризиками. Для деталей із тонкими кромками або малими зазорами такі особливості можуть бути небажаними [41].

Напилення і наплавлення для більшості прецизійних деталей є обмежено придатними. Вони можуть забезпечити нарощування матеріалу, але потребують подальшої обробки, мають ризик пористості або деформацій і не завжди дозволяють сформувати рівномірний тонкий шар у внутрішніх отворах. Для золотників і гільз такі методи часто є надмірно грубими [42].

Заміна прецизійної пари є технічно надійним, але економічно не завжди вигідним способом. У багатьох випадках нові золотники, гільзи або корпуси мають високу вартість, можуть бути дефіцитними або потребувати тривалого постачання. Крім того, заміна всієї пари не завжди доцільна, якщо дефект має локальний характер і може бути усунутий відновленням поверхневого шару [36].

Для систематизації основних обмежень традиційних методів ремонту прецизійних деталей наведено табл. 1.8.

Таблиця 1.8 – Обмеження традиційних методів ремонту прецизійних деталей гідророзподільників

Метод ремонту	Основне технологічне обмеження	Чому це критично для прецизійних деталей
Полірування	Знімає матеріал, не відновлює розмір	Може збільшити зазор і витоки
Хонінгування	Збільшує діаметр отвору	Порушує точність золотникової пари
Притирання	Висока трудомісткість, мала компенсація зношування	Ефективне лише при незначних дефектах
Гальванічне покриття	Нерівномірність шару на складних поверхнях	Може порушити геометрію кромки і каналів
Хромування	Внутрішні напруження, мікротріщини, екологічні ризики	Небажане для тонких прецизійних шарів
Напилення	Пористість, потреба у значній фінішній обробці	Важко забезпечити малу шорсткість і точність
Встановлення втулки	Потребує розточування і високої співвісності	Може бути складним для малих корпусів
Заміна деталі	Висока вартість і залежність від постачання	Не завжди економічно доцільна

Як видно з табл. 1.8, основні обмеження традиційних способів пов'язані з неможливістю одночасно забезпечити рівномірне тонке нарощування, високу точність, малу шорсткість і стабільні експлуатаційні властивості.

Для прецизійних деталей особливо важливим є збереження форми робочих кромки. Багато традиційних методів можуть змінити радіус кромки, створити надлишковий шар на виступах або потребувати подальшої механічної обробки, яка порушить вихідну геометрію. Це безпосередньо впливає на витратні характеристики розподільника [21].

Ще одним обмеженням є температурний вплив. Методи, пов'язані з нагріванням, можуть спричинити деформацію, зміну структури матеріалу, втрату точності або появу залишкових напружень. Для корпусів із тонкими перемичками, прецизійних гільз і золотників це є небажаним [42].

Отже, традиційні методи ремонту не завжди відповідають вимогам відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників. Це обґрунтовує

необхідність застосування технологій, здатних формувати тонкі рівномірні покриття з високою адгезією, зносостійкістю та придатністю до фінішного доведення.

1.9. Перспективи застосування хімічного та наноконпозиційного нікелювання у ремонтному виробництві

Хімічне нікелювання є перспективним методом відновлення прецизійних деталей, оскільки дозволяє формувати нікелеве покриття без застосування зовнішнього електричного струму. Осадження нікелю відбувається внаслідок хімічного відновлення іонів нікелю з розчину на підготовленій поверхні деталі. Завдяки цьому покриття може формуватися більш рівномірно на поверхнях складної конфігурації, у порівнянні з багатьма електролітичними способами [13–15].

Найпоширенішими є нікель-фосфорні покриття, які характеризуються доброю адгезією, корозійною стійкістю, достатньою твердістю, рівномірністю шару та можливістю підвищення твердості після термічної обробки. Для ремонтного виробництва це важливо, оскільки покриття може виконувати одночасно відновлювальну, захисну та зміцнювальну функції [14; 43].

Особливо важливою перевагою хімічного нікелювання є рівномірність товщини покриття. Для деталей гідравлічних розподільників це має принципове значення, оскільки золотники, корпусні отвори, гільзи та кромки мають складну геометрію. Якщо шар буде нерівномірним, це може порушити зазор, викликати заїдання або збільшити витoki. Хімічне нікелювання дозволяє краще контролювати товщину шару на складних поверхнях, хоча воно також потребує ретельного дотримання технологічних режимів [15; 44].

Наноконпозиційне хімічне нікелювання є розвитком звичайного хімічного нікелювання. Його сутність полягає у введенні до нікелевого покриття нанодисперсних частинок, які змінюють структуру та властивості шару. Як наповнювачі можуть використовуватися наночастинки оксидів, карбідів, нітридів, алмазоподібного вуглецю, графіту, дисульфиду молібдену,

фторполімерів або інших функціональних компонентів залежно від призначення покриття [43–45].

Введення твердих наночастинок може підвищити мікротвердість, зносостійкість і стійкість до абразивного впливу. Антифрикційні нанодобавки можуть зменшити коефіцієнт тертя, покращити припрацювання і знизити ризик задирів. Корозійностійкі компоненти можуть підвищити стабільність покриття у робочому середовищі гідравлічної рідини [43].

Для гідравлічних розподільників важливо, що наноконпозиційне покриття може поєднувати кілька властивостей: відновлення розміру, підвищення зносостійкості, зменшення тертя, захист від корозії та забезпечення стабільної геометрії після фінішної обробки. Саме такий комплекс властивостей є необхідним для золотників, гільз, корпусних отворів і робочих кромek [44].

Для систематизації переваг хімічного та наноконпозиційного нікелювання у ремонтному виробництві наведено табл. 1.9.

Таблиця 1.9 – Переваги застосування хімічного та наноконпозиційного нікелювання для відновлення деталей гідравлічних розподільників

Технологічна перевага	Зміст переваги	Значення для прецизійних деталей
Рівномірність покриття	Осадження шару без залежності від розподілу електричного струму	Можливість покриття складних поверхонь, каналів і кромek
Мала товщина контрольованого шару	Можливість нанесення тонких відновлювальних покриттів	Збереження точності спряжень
Висока адгезія	Надійне зчеплення з підготовленою основою	Запобігання відшаруванню при роботі
Зносостійкість	Підвищення опору тертю й абразивному впливу	Зменшення зношування золотникових пар
Корозійна стійкість	Захист від дії робочої рідини та вологи	Підвищення довговічності корпусів і гільз
Можливість введення наночастинок	Формування покриття з функціональними властивостями	Підвищення твердості, антифрикційності або стабільності

Придатність до фінішної обробки	Можливість полірування, доведення або притирання	Забезпечення необхідної шорсткості та точності
Відсутність значного теплового впливу при нанесенні	Процес не потребує розплавлення основи	Збереження геометрії тонких і точних деталей

З табл. 1.9 видно, що хімічне та наноконпозиційне нікелювання мають низку переваг, які безпосередньо відповідають вимогам відновлення прецизійних деталей гідророзподільників.

Водночас ця технологія потребує високої технологічної дисципліни. Якість покриття залежить від підготовки поверхні, складу розчину, температури, кислотності, концентрації компонентів, стабільності суспензії наночастинок, перемішування, часу осадження, промивання, термічної обробки та фінішного доведення. Порушення хоча б одного з цих факторів може призвести до нерівномірності, пористості, слабкої адгезії або нестабільних властивостей покриття [44; 45].

Перспективність наноконпозиційного хімічного нікелювання полягає у можливості цілеспрямованого керування властивостями покриття. Якщо головним завданням є підвищення зносостійкості, доцільним є введення твердих наночастинок. Якщо важливі антифрикційні властивості, використовують добавки, що знижують тертя. Якщо необхідна підвищена корозійна стійкість, вибирають склад покриття та післяобробку, які забезпечують стабільність у робочому середовищі [43].

Для ремонтного виробництва ця технологія є цінною ще й тому, що дозволяє відновлювати дорогі прецизійні деталі без повної заміни вузла. Це може зменшити витрати на ремонт, скоротити простой техніки, підвищити ресурс гідроапаратури та забезпечити повторне використання деталей, які мають достатню залишкову міцність, але втратили якість поверхні [36; 45].

Отже, хімічне та наноконпозиційне хімічне нікелювання є перспективними методами відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників. Їх застосування дає змогу поєднати відновлення геометрії, підвищення

зносостійкості, захист від корозії та забезпечення високої рівномірності покриття на деталях складної форми.

Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено аналіз стану питання відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників. Встановлено, що гідравлічні розподільники є важливими керуючими елементами гідросистем машин і технологічного обладнання. Вони забезпечують зміну напрямку руху робочої рідини, керування виконавчими механізмами, фіксацію положення робочих органів, стабільність тиску, плавність руху та точність роботи гідроприводу.

Показано, що найбільш відповідальними елементами гідравлічних розподільників є прецизійні деталі: золотники, корпусні отвори, гільзи, робочі кромки, ущільнювальні пояски, канали керування та спряжені поверхні. Вони працюють із малими зазорами та високими вимогами до геометричної точності, шорсткості, герметичності й стабільності поверхневого шару.

Визначено, що умови роботи золотникових пар і корпусних каналів є складними та включають дію високого тиску, тертя, гідродинамічних навантажень, температурних коливань, забруднення робочої рідини, ерозійного та кавітаційного впливу. Особливо негативно на стан прецизійних деталей впливають тверді частинки в робочій рідині, які спричиняють подряпини, риси, задири та збільшення зазорів.

Розглянуто основні види зношування прецизійних деталей гідроапаратури: абразивне, адгезійне, ерозійне, кавітаційне, корозійно-механічне, фретинг-зношування та втомне руйнування поверхневого шару. Встановлено, що у реальних умовах експлуатації ці види зношування часто поєднуються між собою, що ускладнює дефектацію та вибір раціонального способу відновлення.

Проаналізовано характерні дефекти золотників, гільз, корпусів і робочих кромок гідравлічних розподільників. До них належать зношування поясків, збільшення зазорів, подряпини, риси, задири, корозійні раковини, ерозійне

пошкодження каналів, заокруглення робочих кромek, овальність, конусність, порушення циліндричності, засмічення каналів і втрата герметичності.

Встановлено, що зношування прецизійних деталей безпосередньо впливає на герметичність, чутливість і точність роботи гідророзподільника. Збільшення зазорів призводить до внутрішніх перетікань, зниження тиску, нагрівання робочої рідини та втрат енергії. Пошкодження кромek змінює витратну характеристику, а задири й корозійні пошкодження можуть спричинити заїдання золотника.

Розглянуто традиційні способи відновлення деталей гідравлічної апаратури: полірування, хонінгування, притирання, гальванічне хромування, гальванічне нікелювання, напилення, встановлення ремонтних втулок і заміну прецизійних пар. Встановлено, що ці методи мають практичне значення, але часто не забезпечують одночасного відновлення розміру, точності, рівномірності покриття, зносостійкості та герметичності.

Обґрунтовано, що традиційні методи ремонту мають суттєві обмеження при відновленні прецизійних деталей гідророзподільників. Механічна обробка знімає матеріал і може збільшити зазор; електролітичні покриття можуть бути нерівномірними на складних поверхнях; хромування має технологічні й екологічні обмеження; напилення часто потребує значної фінішної обробки; встановлення втулок ускладнює забезпечення співвісності та точності.

Визначено перспективність застосування хімічного та нанокomпозиційного хімічного нікелювання у ремонтному виробництві. Ці методи дозволяють формувати рівномірні тонкі покриття на деталях складної форми, підвищувати зносостійкість, корозійну стійкість, твердість, антифрикційні властивості та стабільність прецизійних поверхонь.

Отже, результати аналізу підтверджують доцільність подальшого обґрунтування нанокomпозиційного хімічного нікелювання як перспективного методу відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників.

РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ НАНОКОМПОЗИЦІЙНОГО ХІМІЧНОГО НІКЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ

2.1. Загальна характеристика хімічного нікелювання як способу відновлення деталей

Хімічне нікелювання є одним із перспективних способів нанесення функціональних покриттів на металеві поверхні. На відміну від електролітичного нікелювання, цей процес відбувається без зовнішнього джерела електричного струму, а осадження нікелю здійснюється внаслідок хімічного відновлення іонів нікелю безпосередньо на підготовленій поверхні деталі. Така особливість забезпечує більш рівномірне формування покриття на деталях складної форми, у внутрішніх отворах, каналах, пазах, кромках і важкодоступних ділянках [13; 14].

Для відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників ця властивість має принципове значення. Золотники, гільзи, корпусні отвори, ущільнювальні пояски та робочі кромки мають складну геометрію, а їх функціонування залежить від точності зазорів і рівномірності поверхневого шару. Якщо покриття формується нерівномірно, воно може викликати локальне зменшення зазору, заїдання золотника, порушення плавності ходу або, навпаки, недостатню компенсацію зношування на окремих ділянках [10; 15].

Хімічне нікелювання дозволяє формувати покриття з комплексом властивостей: корозійною стійкістю, зносостійкістю, достатньою твердістю, адгезійною міцністю, рівномірністю товщини та здатністю до подальшої фінішної обробки. Саме тому цей метод застосовується не тільки як захисний, а й як відновлювальний спосіб для деталей, що працюють в умовах тертя, контакту з рідинами, абразивного впливу та підвищених вимог до точності [16; 17].

Для гідравлічної апаратури важливо, що хімічне нікелювання може виконуватися з формуванням тонких шарів, які після механічного або полірувального доведення забезпечують потрібну шорсткість і геометрію. Це особливо важливо для золотникових пар, де відновлення повинно не порушити, а стабілізувати робочий зазор. Покриття має компенсувати зношування,

підвищити якість поверхні й забезпечити достатню довговічність в умовах контакту з робочою рідиною [18].

Хімічне нікелювання може виконувати декілька функцій: відновлювальну, зміцнювальну, захисну, антифрикційну та корозійностійку. Відновлювальна функція полягає у нарощуванні тонкого шару матеріалу на зношеній поверхні. Зміцнювальна — у підвищенні твердості та опору зношуванню. Захисна — у зменшенні впливу корозійних чинників. Антифрикційна — у поліпшенні умов тертя, особливо за умови введення відповідних дисперсних добавок [19; 20].

Для узагальнення основних особливостей хімічного нікелювання як способу відновлення деталей доцільно розглянути табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики хімічного нікелювання як способу відновлення деталей

Ознака	Характеристика	Значення для відновлення прецизійних деталей
Спосіб формування покриття	Хімічне відновлення іонів нікелю на поверхні без зовнішнього струму	Забезпечує рівномірніше покриття складних поверхонь
Тип покриття	Нікель-фосфорне або композиційне нікелеве	Дозволяє поєднувати захисні та зносостійкі властивості
Рівномірність шару	Вища на складних поверхнях порівняно з багатьма електролітичними методами	Важливо для отворів, каналів, кромek і золотникових пар
Товщина покриття	Може контролюватися тривалістю процесу та режимами осадження	Дозволяє відновлювати мале зношування без порушення точності
Подальша обробка	Можливе полірування, доведення, притирання, контроль шорсткості	Дає змогу отримати прецизійну якість поверхні
Функціональні властивості	Твердість, зносостійкість, корозійна стійкість, адгезія	Забезпечує підвищення ресурсу деталей гідроапаратури
Обмеження	Потребує якісної підготовки поверхні та контролю розчину	Вимагає високої технологічної дисципліни

З табл. 2.1 видно, що хімічне нікелювання має низку властивостей, які безпосередньо відповідають вимогам відновлення прецизійних деталей

гідравлічних розподільників. Його основна перевага полягає у можливості формування рівномірного тонкого покриття на деталях складної форми з мінімальним впливом на геометрію основи.

Разом із тим якість хімічного нікелювання значною мірою залежить від підготовки поверхні, чистоти деталей, стабільності робочого розчину, температурного режиму, тривалості процесу, промивання, термічної обробки та контролю кінцевих параметрів. Для прецизійних деталей гідравлічних розподільників це означає, що технологія повинна розроблятися як комплекс взаємопов'язаних операцій, а не як окрема операція нанесення покриття [21].

2.2. Особливості формування нікель-фосфорних покриттів без зовнішнього електричного струму

Основою хімічного нікелювання є автокаталітичний процес відновлення нікелю з розчину на активованій поверхні деталі. Найчастіше для цього використовують нікель-фосфорні системи, у яких разом із нікелем у покриття включається фосфор. Наявність фосфору впливає на структуру, твердість, корозійну стійкість, здатність до термічного зміцнення і зносостійкість покриття [14; 16].

На початковому етапі процесу важливим є стан поверхні. Осадження покриття можливе лише на належно очищеній, знежиреній і активованій поверхні. Якщо на деталі залишаються мастило, оксидні плівки, продукти корозії, абразивний пил або сторонні домішки, покриття може формуватися нерівномірно, мати слабку адгезію, пористість або локальні непокриті ділянки [22].

Після початку осадження нікелю поверхня покриття сама стає каталізатором подальшого процесу. Завдяки цьому шар росте відносно рівномірно по всій зануреній поверхні деталі. Ця властивість особливо корисна для деталей гідророзподільників, оскільки багато їх робочих поверхонь є внутрішніми або мають складну конфігурацію [13; 15].

Формування нікель-фосфорного шару залежить від складу розчину, кислотності, температури, концентрації основних компонентів, часу осадження, перемішування та стану поверхні. У ремонтній технології конкретні параметри процесу повинні встановлюватися за технологічною інструкцією, паспортом матеріалів і вимогами безпеки. Для дипломної роботи важливо обґрунтувати не небезпечну рецептуру, а технологічну логіку процесу: підготовка поверхні, стабільність розчину, контроль товщини, промивання, термічна обробка і контроль якості [21; 22].

Нікель-фосфорні покриття можуть мати різний вміст фосфору. Залежно від цього змінюється їх структура і властивості. Покриття з нижчим вмістом фосфору зазвичай мають вищу твердість після осадження, тоді як високофосфористі покриття можуть мати кращу корозійну стійкість і більш аморфну структуру. Для відновлення деталей гідророзподільників важливо забезпечити баланс між твердістю, зносостійкістю, корозійною стійкістю та здатністю до фінішної обробки [16; 23].

Для систематизації властивостей нікель-фосфорних покриттів залежно від вмісту фосфору наведено табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Загальна характеристика нікель-фосфорних покриттів залежно від вмісту фосфору

Тип нікель-фосфорного покриття	Загальна характеристика структури	Типові властивості	Доцільність для прецизійних деталей
Низькофосфористе	Більш кристалічна структура	Підвищена твердість, добра зносостійкість	Доцільне для поверхонь тертя за умови контролю корозійної стійкості
Середньофосфористе	Збалансована структура	Поєднання твердості, адгезії та корозійної стійкості	Найбільш універсальне для ремонтного застосування
Високофосфористе	Більш аморфна структура	Вища корозійна стійкість,	Доцільне для деталей, де важлива

		стабільність у середовищах	стійкість до робочої рідини та корозії
--	--	-------------------------------	--

Як видно з табл. 2.2, вибір типу нікель-фосфорного покриття залежить від умов роботи відновлюваної деталі. Для золотників і гільз, які працюють в умовах тертя та контакту з робочою рідиною, доцільним є використання покриттів із збалансованими властивостями, які можуть додатково модифікуватися нанодисперсними частинками.

Формування покриття без зовнішнього електричного струму має важливу перевагу: процес менше залежить від форми деталі та розподілу електричного поля. У гальванічних процесах на виступах і кромках шар часто формується інтенсивніше, ніж у заглибленнях і внутрішніх каналах. Для гідророзподільників така нерівномірність є небажаною, оскільки кромки, канали та отвори мають безпосередній вплив на витратну характеристику апарата [13; 41].

Отже, хімічне формування нікель-фосфорних покриттів без зовнішнього електричного струму є технологічно доцільним для прецизійних деталей складної форми. Воно дозволяє отримувати більш рівномірні покриття, зберігати точність поверхонь і створювати основу для подальшого наноконпозиційного модифікування.

2.3. Структура та властивості хімічних нікелевих покриттів

Структура хімічних нікелевих покриттів визначається складом осажденного шару, вмістом фосфору, умовами формування, наявністю домішок, режимом термічної обробки та характером поверхні основного металу. Для ремонтного застосування важливими є не лише хімічний склад і твердість покриття, а й рівномірність, суцільність, пористість, адгезія, внутрішні напруження та здатність до фінішної обробки [16; 23].

Нікель-фосфорні покриття можуть мати кристалічну, аморфну або змішану структуру. З підвищенням вмісту фосфору структура зазвичай стає більш аморфною, що позитивно впливає на корозійну стійкість. Після термічної

обробки можливе структурне перетворення покриття з утворенням фаз, які підвищують твердість і зносостійкість шару [23; 24].

Однією з найважливіших властивостей хімічного нікелевого покриття є твердість. Після осадження покриття вже може мати достатню твердість для роботи у помірних умовах тертя. Після термічної обробки твердість може суттєво зростати, що є важливим для деталей, які працюють у золотникових парах, напрямних поверхнях і гідравлічних каналах [24].

Зносостійкість нікелевих покриттів залежить від твердості, структури, адгезії до основи, шорсткості, умов мащення, характеру навантаження та наявності абразивних частинок у робочій рідині. Для гідравлічних розподільників покриття повинно не тільки протидіяти зношуванню, а й зберігати гладкість і точність поверхні протягом тривалої експлуатації [25; 26].

Корозійна стійкість є ще однією важливою властивістю. Робочі рідини гідросистем можуть містити вологу, продукти окиснення, домішки, частинки зношування та залишки забруднень. Якщо покриття має недостатню корозійну стійкість, на поверхні можуть утворюватися раковини, плями, мікропошкодження та осередки руйнування, які прискорюють зношування і порушують герметичність [27].

Адгезія покриття до основи визначає надійність відновленої деталі. Для прецизійних деталей відшарування навіть невеликої ділянки покриття є критичним, оскільки частинки відшарованого матеріалу можуть потрапити у зазор, викликати заклинювання золотника, подряпини або пошкодження інших елементів гідросистеми [22; 28].

Для узагальнення основних властивостей хімічних нікелевих покриттів наведено табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні властивості хімічних нікелевих покриттів і їх значення для деталей гідравлічних розподільників

Властивість покриття	Технологічне значення	Значення для гідророзподільників
----------------------	-----------------------	----------------------------------

Рівномірність товщини	Забезпечує однакове нарощування шару на складних поверхнях	Дозволяє зберегти точність зазорів
Твердість	Визначає опір поверхні пластичній деформації та зношуванню	Підвищує ресурс золотників і гільз
Зносостійкість	Характеризує здатність працювати в умовах тертя	Зменшує спрацювання прецизійних пар
Корозійна стійкість	Захищає поверхню від дії середовища	Запобігає утворенню раковин і втраті герметичності
Адгезія	Забезпечує міцне зчеплення з основою	Запобігає відшаруванню в робочій зоні
Суцільність	Відсутність пор, тріщин і непокритих ділянок	Підвищує герметичність і стабільність роботи
Оброблюваність	Можливість полірування та доведення	Дозволяє отримати необхідну шорсткість

З табл. 2.3 видно, що нікелеве покриття для прецизійних деталей повинно мати комплекс властивостей. Недостатньо забезпечити лише високу твердість, оскільки без адгезії, рівномірності та малої шорсткості покриття не зможе надійно працювати у золотниковій парі.

Для відновлення гідророзподільників особливо важливо, щоб покриття після фінішної обробки не мало пор, включень, локальних виступів, тріщин або нерівномірностей. Будь-який дефект поверхні може стати причиною підвищених витоків, заїдання або прискореного зношування.

Отже, структура і властивості хімічних нікелевих покриттів роблять їх придатними для відновлення прецизійних деталей, однак для підвищення зносостійкості, антифрикційних властивостей і стабільності роботи доцільним є їх подальше модифікування нанодисперсними частинками.

2.4. Сутність наноконпозиційного хімічного нікелювання

Наноконпозиційне хімічне нікелювання є різновидом хімічного нікелювання, при якому у структуру нікелевого покриття вводяться нанодисперсні частинки функціонального призначення. У результаті формується композиційний шар, у якому нікель-фосфорна матриця виконує роль основи, а

наночастинки змінюють механічні, трибологічні, захисні або антифрикційні властивості покриття [29; 43].

Сутність процесу полягає в тому, що під час хімічного осадження нікелю наночастинки, які перебувають у робочому розчині у диспергованому стані, захоплюються зростаючим металевим шаром і включаються в його структуру. Таким чином формується покриття, яке поєднує властивості нікель-фосфорної матриці та введених нанодисперсних компонентів [30; 44].

Для прецизійних деталей гідравлічних розподільників це має важливе значення. Нікелева матриця забезпечує рівномірність, адгезію, корозійну стійкість і здатність до фінішного доведення, а наночастинки можуть підвищити твердість, зносостійкість, стійкість до мікрорізання, опір задиру або зменшити коефіцієнт тертя [43].

Наноконпозиційне покриття відрізняється від звичайного нікель-фосфорного тим, що його властивості можна цілеспрямовано змінювати шляхом вибору типу, розміру, концентрації та способу стабілізації наночастинок у розчині. При цьому важливо забезпечити рівномірний розподіл частинок у покритті. Якщо частинки агломеруються, утворюють скупчення або нерівномірно включаються в шар, це може погіршити якість поверхні й знизити надійність деталі [44].

У ремонтній технології наноконпозиційне нікелювання дає можливість не просто відновити зношений шар, а й сформувати поверхню з поліпшеними властивостями порівняно з основним матеріалом. Це особливо цінно для деталей, які працюють у зоні тертя, контакту з гідравлічною рідиною, абразивного забруднення та високих вимог до герметичності [29].

Разом із тим наноконпозиційне хімічне нікелювання є більш складним технологічним процесом, ніж звичайне хімічне нікелювання. Воно потребує стабілізації дисперсної фази в розчині, запобігання осадженню або агломерації частинок, підтримання рівномірного перемішування, контролю чистоти, температури, кислотності, тривалості осадження і післяобробки [30; 45].

Для систематизації відмінностей між звичайним хімічним нікелюванням і наноконпозиційним хімічним нікелюванням наведено табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Порівняння звичайного хімічного нікелювання і наноконпозиційного хімічного нікелювання

Ознака порівняння	Звичайне хімічне нікелювання	Наноконпозиційне хімічне нікелювання
Склад покриття	Нікель-фосфорна матриця	Нікель-фосфорна матриця з наночастинками
Основне призначення	Захист, відновлення, підвищення корозійної стійкості	Відновлення з додатковим підвищенням функціональних властивостей
Твердість	Залежить від структури й термообробки	Може підвищуватися завдяки твердим наночастинкам
Зносостійкість	Достатня для багатьох технічних умов	Підвищена при правильному виборі наповнювача
Антифрикційність	Залежить від складу матриці та шорсткості	Може покращуватися введенням антифрикційних добавок
Складність процесу	Помірна, але потребує контролю розчину	Вища через потребу стабілізації нанодисперсної фази
Придатність для гідроапаратури	Висока для рівномірного відновлення	Вища для деталей, що працюють у складних умовах тертя й зношування

З табл. 2.4 видно, що наноконпозиційне хімічне нікелювання є технологічно складнішим, але має вищий потенціал для відновлення деталей, які повинні працювати в умовах підвищених вимог до зносостійкості, точності та стабільності.

Отже, сутність наноконпозиційного хімічного нікелювання полягає у формуванні функціонального покриття, в якому нікелева матриця забезпечує рівномірність і адгезію, а нанодисперсні частинки надають шару підвищених експлуатаційних властивостей. Це робить технологію перспективною для відновлення золотників, гільз, корпусних отворів і робочих кромek гідравлічних розподільників.

2.5. Види нанодисперсних наповнювачів для композиційних нікелевих покриттів

Нанодисперсні наповнювачі є функціональними компонентами нанокомпозиційних нікелевих покриттів. Їх вибір визначає основний напрям модифікування покриття: підвищення твердості, зносостійкості, корозійної стійкості, антифрикційності, теплостійкості або стійкості до ерозійного впливу [43; 44].

Для композиційних нікелевих покриттів можуть використовуватися тверді керамічні наночастинки, карбіди, оксиди, нітриди, вуглецеві наноматеріали, тверді мастильні компоненти та полімерні дисперсні частинки. Кожна група має власні переваги та обмеження, тому вибір наповнювача повинен відповідати умовам роботи деталі [29; 30].

Керамічні наночастинки, зокрема оксиди алюмінію, титану, кремнію, цирконію, можуть підвищувати твердість, абразивну стійкість і стабільність покриття. Вони доцільні для деталей, які працюють у середовищі забрудненої робочої рідини або зазнають мікрорізання твердими частинками [43].

Карбіди і нітриди мають високу твердість і можуть суттєво підвищувати зносостійкість покриттів. До таких компонентів належать карбід кремнію, карбід вольфраму, нітрид бору, нітрид титану та інші тверді фази. Їх застосування може бути доцільним для поверхонь, які зазнають інтенсивного тертя або ерозійно-абразивного впливу [44].

Вуглецеві наноматеріали, зокрема нанографіт, графенові структури, вуглецеві нанотрубки або алмазоподібні частинки, можуть впливати на зносостійкість, мікротвердість, коефіцієнт тертя та стійкість до задирів. Проте для їх застосування важливе рівномірне диспергування, оскільки агломерація вуглецевих частинок може призвести до неоднорідності покриття [45].

Антифрикційні нанодобавки, зокрема дисульфід молібдену, графітові компоненти або фторполімерні частинки, використовують для зменшення тертя й покращення припрацювання. Для золотникових пар гідророзподільників це

може бути корисним, оскільки зниження тертя зменшує ризик заїдання і покращує плавність переміщення золотника [26; 43].

Для систематизації основних видів нанодисперсних наповнювачів для композиційних нікелевих покриттів наведено табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Види нанодисперсних наповнювачів для композиційних нікелевих покриттів

Група нанонаповнювачів	Приклади матеріалів	Основний вплив на властивості покриття	Доцільність для деталей гідророзподільників
Оксидні наночастинки	Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , ZrO_2	Підвищення твердості, зносостійкості, стабільності структури	Доцільні для поверхонь, що працюють із забрудненою рідиною
Карбіди	SiC , WC , TiC	Висока абразивна стійкість і твердість	Доцільні для зон інтенсивного зношування
Нітриди	BN , TiN , Si_3N_4	Підвищення твердості, термостійкості та зносостійкості	Доцільні для кромek і поверхонь тертя
Вуглецеві наноматеріали	Нанографіт, графенові структури, вуглецеві нанотрубки	Зниження тертя, підвищення зносостійкості	Перспективні для золотникових пар
Тверді мастильні добавки	MoS_2 , графіт, фторполімерні частинки	Поліпшення антифрикційних властивостей	Доцільні для підвищення плавності ходу
Комбіновані наповнювачі	Суміші твердих і антифрикційних частинок	Баланс твердості, зносостійкості та низького тертя	Перспективні для універсальних покриттів

З табл. 2.5 видно, що різні нанодисперсні наповнювачі виконують різні функції. Для гідравлічних розподільників найбільш перспективними є ті, що забезпечують поєднання зносостійкості, малої шорсткості, стійкості до робочої рідини та низького коефіцієнта тертя.

При виборі нанонаповнювача необхідно враховувати не лише його властивості, а й технологічну сумісність із розчином хімічного нікелювання. Частинки повинні бути стабільними в робочому середовищі, не спричиняти неконтрольованого розкладання розчину, рівномірно розподілятися в об'ємі та включатися в покриття без утворення грубих агломератів [44].

Отже, нанодисперсні наповнювачі є ключовим інструментом керування властивостями композиційного нікелевого покриття. Їх правильний вибір дозволяє адаптувати покриття до умов роботи конкретної прецизійної деталі гідравлічного розподільника.

2.6. Вплив наночастинок на твердість, зносостійкість і антифрикційні властивості покриття

Наночастинки впливають на властивості нікелевого покриття через зміну структури шару, формування додаткових зміцнювальних фаз, перешкоджання локальній пластичній деформації, зменшення поширення мікротріщин і зміну характеру тертя. Ефективність цього впливу залежить від типу частинок, їх розміру, форми, концентрації, рівномірності розподілу та міцності зв'язку з нікелевою матрицею [29; 43].

Підвищення твердості покриття відбувається переважно завдяки включенню твердих наночастинок, які перешкоджають локальному деформуванню поверхневого шару. Оксиди, карбіди й нітриди можуть виступати як зміцнювальні компоненти, що підвищують опір мікровдавлюванню та мікрорізанню. Для золотників і гільз це важливо, оскільки тверді частинки забруднення в робочій рідині можуть діяти як абразив [30; 44].

Зносостійкість покриття підвищується не тільки за рахунок твердості. Важливе значення має також здатність покриття зберігати цілісність, не викришуватися і не відшаровуватися. Якщо тверді наночастинки розподілені рівномірно, вони зміцнюють шар і зменшують швидкість зношування. Якщо ж вони утворюють агломерати, такі скупчення можуть стати концентраторами напружень і погіршити роботу покриття [43].

Антифрикційні властивості залежать від здатності поверхні зменшувати коефіцієнт тертя, полегшувати припрацювання і запобігати задиру. Наночастинки графіту, дисульфиду молібдену або фторполімерних компонентів можуть створювати на поверхні умови для легшого ковзання. Це особливо актуально для золотникових пар, де важливо забезпечити плавний рух золотника і мінімальний опір переміщенню [26; 45].

Водночас надмірне збільшення вмісту наночастинок не завжди покращує властивості покриття. За високої концентрації можливе погіршення рівномірності, збільшення шорсткості, утворення агломератів, зниження адгезії або порушення стабільності розчину. Тому вибір кількості та типу нанодисперсної фази повинен бути технологічно обґрунтованим [44].

Для систематизації впливу наночастинок на властивості композиційного нікелевого покриття наведено табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Вплив наночастинок на експлуатаційні властивості нікелевого покриття

Властивість покриття	Механізм впливу наночастинок	Практичне значення для гідророзподільників
Твердість	Наночастинки перешкоджають локальній пластичній деформації	Підвищується стійкість золотників і гільз до мікрорізання
Зносостійкість	Тверді частинки зменшують швидкість руйнування шару	Знижується інтенсивність зношування прецизійних пар
Антифрикційність	Частинки графіту, MoS ₂ або подібні добавки зменшують тертя	Покращується плавність переміщення золотника
Стійкість до задрів	Зменшується локальне схоплювання поверхонь	Знижується ризик заїдання гідророзподільника
Корозійна стійкість	Щільна структура покриття зменшує проникнення агресивних компонентів	Підвищується довговічність у робочій рідині
Стабільність поверхні	Рівномірна дисперсна фаза зміцнює шар	Забезпечується стабільність зазору й герметичності

З табл. 2.6 видно, що наночастинки можуть суттєво покращувати властивості нікелевого покриття, але лише за умови їх рівномірного включення

у структуру шару. Для прецизійних деталей особливо важливо, щоб підвищення твердості не супроводжувалося надмірним зростанням шорсткості або крихкості.

Отже, наночастинки є ефективним засобом модифікування хімічних нікелевих покриттів. Для деталей гідравлічних розподільників найважливішим є досягнення балансу між твердістю, зносостійкістю, антифрикційністю, адгезією та можливістю фінішного доведення поверхні.

2.7. Вимоги до покриттів для прецизійних деталей гідравлічних розподільників

Покриття для прецизійних деталей гідравлічних розподільників повинні відповідати значно жорсткішим вимогам, ніж звичайні захисні або декоративні покриття. Це пояснюється тим, що такі деталі працюють у точних спряженнях, де важливими є не лише міцність і зносостійкість, а й рівномірність шару, контроль товщини, мала шорсткість, герметичність, стабільність зазору та відсутність дефектів поверхні [10; 17].

Першою важливою вимогою є рівномірність товщини покриття. Для золотникових пар надмірна товщина в одній зоні може призвести до заїдання, а недостатня товщина в іншій — до неповного відновлення зазору. Тому покриття повинно формуватися рівномірно на циліндричних поверхнях, кромках, каналах і внутрішніх ділянках [15].

Другою вимогою є висока адгезія. Покриття повинно міцно зчеплюватися з основним металом і не відшаровуватися під дією тиску, тертя, температурних коливань або гідродинамічних навантажень. Відшарування є неприпустимим, оскільки частинки покриття можуть пошкодити золотникову пару або інші елементи гідросистеми [22].

Третьою вимогою є низька шорсткість після фінішної обробки. Прецизійні поверхні повинні забезпечувати плавне переміщення золотника, обмеження витоків і стійку мастильну плівку. Надмірна шорсткість може збільшити тертя, погіршити герметичність і прискорити зношування [39].

Четверта вимога — зносостійкість. Покриття повинно протидіяти абразивним частинкам, тертю, мікрорізанню, ерозійному впливу та локальним навантаженням. Для цього важливими є твердість, структура, наявність зміцнювальних наночастинок і якість фінішної обробки [25; 43].

П'ята вимога — корозійна стійкість у середовищі гідравлічної рідини. Робоча рідина може містити воду, продукти окиснення, залишки забруднень або хімічно активні компоненти. Покриття повинно зберігати суцільність і не утворювати раковин або осередків руйнування [27].

Для узагальнення вимог до покриттів прецизійних деталей гідравлічних розподільників наведено табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Вимоги до покриттів для прецизійних деталей гідравлічних розподільників

Група вимог	Зміст вимог	Значення для працездатності гідророзподільника
Геометричні	Рівномірна товщина, відсутність локальних напливів, стабільність форми	Забезпечення правильного зазору і плавного ходу
Адгезійні	Міцне зчеплення з основним металом	Запобігання відшаруванню покриття
Трибологічні	Зносостійкість, низький коефіцієнт тертя, стійкість до задиру	Підвищення ресурсу золотникових пар
Поверхневі	Мала шорсткість, відсутність пор, тріщин, включень	Забезпечення герметичності та плавності роботи
Корозійні	Стійкість до робочої рідини, вологи та продуктів окиснення	Запобігання раковинам і втраті якості поверхні
Технологічні	Придатність до полірування, доведення і контролю	Можливість отримання прецизійної якості
Експлуатаційні	Стабільність при тиску, температурі та забрудненні рідини	Надійна робота у реальних умовах експлуатації

З табл. 2.7 видно, що покриття для гідравлічних розподільників повинно відповідати комплексу вимог. Якщо хоча б одна з них не виконується, відновлена деталь може втратити працездатність незалежно від інших позитивних властивостей покриття.

Отже, для прецизійних деталей гідророзподільників доцільно застосовувати такі покриття, які поєднують рівномірність, адгезію, зносостійкість, малу шорсткість, корозійну стійкість і можливість фінішного доведення. Нанокпозиційне хімічне нікелювання відповідає цим вимогам найбільш повно порівняно з багатьма традиційними методами відновлення.

2.8. Порівняльна оцінка хімічного нікелювання з гальванічним осадженням, напиленням і механічним відновленням

Для обґрунтування вибору технології відновлення необхідно порівняти хімічне нікелювання з іншими способами, які можуть застосовуватися для ремонту деталей гідравлічної апаратури. До таких способів належать гальванічне осадження, хромування, напилення, механічне відновлення, полірування, хонінгування, притирання та встановлення ремонтних елементів [34–36].

Гальванічне осадження дозволяє формувати металеві покриття з високою твердістю або корозійною стійкістю. Проте його суттєвим недоліком є залежність товщини покриття від розподілу електричного поля. На виступах і кромках шар може утворюватися інтенсивніше, тоді як у внутрішніх отворах і каналах він може бути тоншим. Для прецизійних деталей це небезпечно, оскільки нерівномірність шару безпосередньо впливає на зазор [13; 41].

Напилення дає змогу формувати покриття з високою зносостійкістю, але воно частіше придатне для зовнішніх поверхонь і деталей, які допускають подальшу значну механічну обробку. Для золотникових пар і внутрішніх отворів гідророзподільників напилення має обмежене застосування через складність забезпечення рівномірності, можливу пористість і потребу в фінішному доведенні [42].

Механічне відновлення, зокрема шліфування, полірування, хонінгування або притирання, дозволяє покращити якість поверхні, але не відновлює втрачений матеріал. У багатьох випадках воно навіть збільшує зазор, що для гідророзподільників є небажаним. Такі методи доцільно використовувати переважно як завершальні операції після нанесення покриття [39; 40].

Хімічне нікелювання має перевагу в рівномірності шару, можливості нанесення на складні поверхні, придатності для тонкого контрольованого відновлення, відсутності значного теплового впливу і можливості подальшого зміцнення або модифікування покриття. Його наноконпозиційний варіант додатково дозволяє підвищити зносостійкість і антифрикційні властивості [14; 43].

Для порівняння основних способів відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників наведено табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Порівняльна оцінка способів відновлення прецизійних деталей гідророзподільників

Показник	Механічне відновлення	Гальванічне осадження	Напилення	Хімічне нікелювання	Наноконпозиційне хімічне нікелювання
Відновлення розміру	Обмежене, переважно зняття матеріалу	Можливе	Можливе	Можливе	Можливе
Рівномірність на складних поверхнях	Залежить від доступності обробки	Обмежена	Обмежена	Висока	Висока
Придатність для внутрішніх отворів	Висока для хонінгування, але без нарощування	Обмежена	Низька або середня	Висока	Висока
Зносостійкість	Залежить від матеріалу основи	Висока для окремих покриттів	Висока	Висока	Підвищена
Вплив на геометрію	Може збільшити зазор	Може бути нерівномірним	Потребує обробки	Контрольований	Контрольований
Потреба у фінішній обробці	Часто є основною операцією	Часто потрібна	Обов'язкова	Потрібна для	Потрібна для прецизійних поверхонь

				прецизійних поверхонь	
Доцільність для золотників пар	Обмежена	Середня	Обмежена	Висока	Найбільш перспективна
Технологічна складність	Середня	Висока	Висока	Висока	Вища, але функціонально обгрунтована

З табл. 2.8 видно, що наноконпозиційне хімічне нікелювання має найбільшу відповідність вимогам відновлення прецизійних деталей, оскільки поєднує можливість тонкого нарощування, рівномірність шару, підвищену зносостійкість і придатність до фінішної обробки.

Отже, порівняльний аналіз підтверджує доцільність вибору наноконпозиційного хімічного нікелювання як базової технології для відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників.

2.9. Обґрунтування вибору наноконпозиційного нікелевого покриття для відновлення деталей гідророзподільників

Вибір наноконпозиційного нікелевого покриття для відновлення деталей гідророзподільників обумовлений комплексом вимог до прецизійних поверхонь. Відновлюваний шар повинен бути тонким, рівномірним, зносостійким, корозійностійким, міцно зчепленим з основою і придатним до фінішної обробки до малої шорсткості [10; 17; 43].

Для золотників основними вимогами є відновлення геометрії поясків, забезпечення малої шорсткості, підвищення стійкості до задирів і зменшення тертя. Для гільз і корпусних отворів важливо забезпечити рівномірність внутрішнього покриття, стабільність діаметра, відсутність напливів і достатню корозійну стійкість. Для робочих кромek важливо зберегти форму, уникнути заокруглення і підвищити стійкість до ерозійного впливу [18; 21].

Наноконпозиційне нікелеве покриття дозволяє поєднати переваги нікель-фосфорної матриці з функціональним впливом нанодисперсних частинок.

Матриця забезпечує рівномірність, адгезію та корозійну стійкість, а наночастинки підвищують твердість, зносостійкість або антифрикційні властивості залежно від їх типу [29; 44].

Для прецизійних деталей гідравлічних розподільників доцільно орієнтуватися на покриття з комбінованими властивостями. Надмірно тверде, але крихке покриття може бути небажаним. Так само покриття з добрими антифрикційними властивостями, але недостатньою твердістю може швидко зношуватися в умовах забрудненої рідини. Тому оптимальним є баланс між твердістю, зносостійкістю, гладкістю, адгезією і корозійною стійкістю [43; 45].

У межах цієї роботи доцільно прийняти як базовий напрям наноконпозиційне хімічне нікелювання з формуванням нікель-фосфорної матриці, модифікованої нанодисперсними частинками зносостійкого або комбінованого зносостійко-антифрикційного призначення. Такий підхід дозволяє забезпечити відновлення робочих поверхонь і підвищити їх довговічність в умовах тертя та контакту з гідравлічною рідиною.

Для узагальнення обґрунтування вибору покриття наведено табл. 2.9.

Таблиця 2.9 – Обґрунтування вибору наноконпозиційного нікелевого покриття для деталей гідророзподільників

Вимога до відновлення	Значення для деталі	Відповідність наноконпозиційного нікелевого покриття
Відновлення малого зношування	Потрібне для золотників, гільз, корпусних отворів	Забезпечується контрольованим тонким шаром
Рівномірність покриття	Важлива для каналів, отворів і кромek	Забезпечується хімічним механізмом осадження
Зносостійкість	Потрібна при терті та забрудненій рідині	Підвищується наночастинками
Антифрикційність	Важлива для плавності переміщення золотника	Може покращуватися спеціальними добавками
Корозійна стійкість	Потрібна в середовищі робочої рідини	Забезпечується нікель-фосфорною матрицею

Адгезія	Критична для надійності шару	Забезпечується якісною підготовкою поверхні
Фінішна обробка	Потрібна для прецизійної шорсткості	Покриття допускає полірування та доведення

З табл. 2.9 видно, що наноконпозиційне нікелеве покриття найбільш повно відповідає вимогам до відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників.

Отже, вибір наноконпозиційного хімічного нікелювання є технічно обґрунтованим, оскільки цей метод дозволяє відновити точність поверхонь, підвищити зносостійкість, зменшити ризик задирів, поліпшити корозійну стійкість і забезпечити стабільну роботу гідророзподільника після ремонту.

Висновки до розділу 2

У другому розділі обґрунтовано вибір наноконпозиційного хімічного нікелювання для відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників.

Встановлено, що хімічне нікелювання є перспективним способом формування функціональних покриттів без зовнішнього електричного струму. Його перевагою є можливість отримання рівномірного шару на деталях складної форми, внутрішніх отворах, кромках, каналах і поверхнях, для яких електролітичні методи можуть бути недостатньо стабільними.

Розглянуто особливості формування нікель-фосфорних покриттів. Показано, що їх властивості залежать від структури, вмісту фосфору, режимів осадження, підготовки поверхні та термічної обробки. Такі покриття можуть мати високу корозійну стійкість, достатню твердість, зносостійкість і придатність до фінішного доведення.

Визначено, що наноконпозиційне хімічне нікелювання дозволяє підвищити функціональні властивості покриття шляхом введення нанодисперсних частинок у нікель-фосфорну матрицю. Наночастинки можуть підвищувати твердість, зносостійкість, антифрикційність, стійкість до задирів і стабільність роботи поверхневого шару.

Проаналізовано основні групи нанодисперсних наповнювачів: оксидні, карбідні, нітридні, вуглецеві, антифрикційні та комбіновані. Встановлено, що для деталей гідророзподільників найбільш доцільними є наповнювачі, які забезпечують баланс між твердістю, зносостійкістю, низьким тертям і можливістю отримання малої шорсткості після фінішної обробки.

Порівняльна оцінка показала, що наноконпозиційне хімічне нікелювання має переваги перед механічним відновленням, гальванічним осадженням і напиленням у випадках, коли необхідно відновити тонкий рівномірний шар на прецизійних поверхнях складної форми.

У результаті обґрунтовано вибір наноконпозиційного нікелевого покриття як базового для відновлення золотників, гільз, корпусних отворів, робочих кромek і ущільнювальних поверхонь гідравлічних розподільників.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ ГІДРОРОЗПОДІЛЬНИКІВ

3.1. Вибір типових деталей гідравлічних розподільників для відновлення

Розроблення технологічного процесу відновлення доцільно виконувати для тих деталей гідравлічних розподільників, які мають високу вартість, складну геометрію, прецизійні поверхні та дефекти, що можуть бути усунуті нанесенням тонкого функціонального покриття. До таких деталей належать золотники, гільзи, корпусні отвори, робочі кромки, ущільнювальні пояски, дросельні поверхні та окремі посадкові або напрямні елементи [10; 17].

Найбільш типовим об'єктом відновлення є золотник. Він має прецизійні циліндричні поверхні, пояски, проточки і робочі кромки, які безпосередньо визначають герметичність та керуючі характеристики розподільника. Зношування золотника проявляється у вигляді зменшення діаметра, подряпин, задирів, корозійних пошкоджень, заокруглення кромки і порушення циліндричності [18].

Другим важливим об'єктом є гільза або корпусний отвір. У цих деталях формується напрямна поверхня для золотника. Їх дефекти проявляються у збільшенні діаметра, овальності, конусності, подряпинах, ерозійному пошкодженні каналів, порушенні співвісності та збільшенні внутрішніх перетікань [19; 20].

Робочі кромки каналів і поясків також є перспективними для відновлення, якщо їх пошкодження не є критичним. Наноконпозиційне покриття може підвищити їх зносостійкість і стійкість до ерозійного впливу, але при цьому необхідно зберегти форму і не допустити надмірного заокруглення або перекриття каналу [21].

Для систематизації типових деталей, які доцільно відновлювати наноконпозиційним хімічним нікелюванням, наведено табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Типові деталі гідравлічних розподільників, придатні для відновлення наноконпозиційним хімічним нікелюванням

Деталь або поверхня	Характерні дефекти	Доцільність відновлення
Золотник	Зношування поясків, подряпини, задири, корозійні плями, зменшення діаметра	Висока за умови відсутності глибоких тріщин і значної деформації
Гільза	Овальність, подряпини, зношування внутрішньої поверхні, ерозія отворів	Висока при можливості забезпечення рівномірного покриття
Корпусний отвір	Зношування, корозійні раковини, rischi, збільшення зазору	Доцільна при локальному дефекті та збереженні базової геометрії
Робочі кромки	Заокруглення, мікросколи, ерозійне пошкодження	Можлива при незначному пошкодженні форми
Ущільнювальні пояски	Зношування, подряпини, мікрориски	Висока для відновлення герметичності
Дросельні поверхні	Ерозія, зміна шорсткості, локальне пошкодження	Можлива за умови збереження прохідного перерізу

З табл. 3.1 видно, що найдоцільніше відновлювати ті деталі, у яких дефект має поверхневий або локальний характер, а основна геометрія і міцність деталі збережені.

Не підлягають відновленню деталі з глибокими тріщинами, значними деформаціями, руйнуванням кромки, критичним збільшенням зазору або пошкодженням, яке не може бути компенсоване тонким покриттям. У таких випадках ремонт може бути технічно ненадійним і економічно недоцільним [36].

3.2. Аналіз дефектів і визначення ремонтпридатності деталей

Перед розробленням технологічного процесу необхідно встановити характер дефектів і визначити ремонтпридатність деталей. Ремонтпридатною вважається така деталь, яка після відновлення може забезпечити задану точність, герметичність, плавність роботи і ресурс без ризику передчасної відмови [35; 36].

Аналіз дефектів включає встановлення виду пошкодження, його глибини, площі, розташування, впливу на функціональні характеристики та можливості компенсації покриттям. Для золотника важливо визначити зменшення діаметра, наявність подряпин, задирів, корозії, порушення циліндричності та стан робочих

кромок. Для гільзи або корпусного отвору — діаметр, овальність, конусність, шорсткість, наявність ерозії й корозійних раковин [18; 19].

Ремонтопридатність залежить від величини зношування. Якщо дефект можна компенсувати тонким шаром покриття з подальшим доведенням, деталь доцільно відновлювати. Якщо зношування надмірне, а нанесення шару необхідної товщини порушить геометрію або призведе до нестабільності покриття, відновлення є недоцільним [39].

Також важливо враховувати розташування дефекту. Подряпини на ущільнювальному пояску можуть істотно збільшувати витoki, тоді як аналогічні пошкодження на менш відповідальній ділянці можуть мати менший вплив. Пошкодження робочих кромок особливо небезпечне, оскільки воно змінює момент відкриття каналу і витратну характеристику [21].

Для визначення ремонтпридатності деталей гідророзподільників доцільно використовувати критерії, наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Критерії ремонтпридатності прецизійних деталей гідророзподільників

Критерій	Ознака придатності до відновлення	Ознака непридатності
Глибина дефекту	Дефект поверхневий і може бути компенсований покриттям	Глибоке руйнування, що не компенсується тонким шаром
Стан основного металу	Відсутні тріщини, викривування, значна деформація	Наявні тріщини, сколи, порушення міцності
Геометрія деталі	Овальність і конусність можуть бути усунені доведенням	Значне порушення форми або співвісності
Стан робочих кромок	Кромки мають незначне зношування	Кромки зруйновані або суттєво змінені
Залишкова міцність	Деталь зберігає конструкційну цілісність	Є ризик руйнування при роботі
Економічна доцільність	Вартість ремонту нижча за заміну	Відновлення дорожче або ненадійне
Можливість контролю	Після ремонту можна перевірити розмір, шорсткість, герметичність	Контроль якості неможливий або недостатній

З табл. 3.2 видно, що рішення про відновлення повинно прийматися комплексно. Недостатньо встановити лише факт зношування; потрібно оцінити можливість повернення деталі до працездатного стану без втрати точності й надійності.

3.3. Дефектація золотників, корпусів, гільз і робочих кромок

Дефектація є обов'язковим етапом технологічного процесу відновлення. Її мета полягає у виявленні дефектів, оцінюванні технічного стану деталей, встановленні причин втрати працездатності та прийнятті рішення щодо подальшого ремонту [35].

Дефектація золотників включає зовнішній огляд, контроль стану поясків, проточок, кромок, торцевих поверхонь, вимірювання діаметра, перевірку циліндричності, овальності, конусності та шорсткості. Особливу увагу слід приділяти поздовжнім рискам, оскільки вони можуть створювати шляхи для внутрішніх перетікань рідини [18].

Дефектація гільз і корпусних отворів передбачає контроль внутрішнього діаметра, овальності, конусності, стану поверхні, наявності задирів, корозійних раковин, ерозії, засмічення каналів і порушення співвісності. Для внутрішніх поверхонь доцільно використовувати точні вимірювальні засоби й оптичний контроль доступних зон [19; 20].

Робочі кромки контролюють за формою, наявністю сколів, заокруглення, задирів, ерозійного вимивання та порушення симетрії. Якщо кромка суттєво змінена, просте нанесення покриття може не відновити витратну характеристику розподільника. У такому випадку необхідне додаткове обґрунтування або заміна деталі [21].

Дефектація також має встановити причину пошкодження. Якщо зношування спричинене забрудненням робочої рідини, необхідно перевірити стан фільтрів, насоса, гідроліній і загальну чистоту системи. Якщо дефект викликаний перекосом або неправильним складанням, відновлення поверхні без усунення причини не забезпечить тривалого ресурсу [30].

Для систематизації операцій дефектації основних деталей наведено табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Основні операції дефектації деталей гідравлічних розподільників

Деталь	Контрольовані параметри	Методи контролю
Золотник	Діаметр, циліндричність, стан поясків, кромки, шорсткість	Мікрометричний контроль, візуальний огляд, контроль шорсткості
Гільза	Внутрішній діаметр, овальність, конусність, подряпини, ерозія	Нутромір, калібри, огляд, контроль шорсткості
Корпус	Канали, різьби, посадки, площини, внутрішні отвори	Візуальний контроль, вимірювання, перевірка герметичності
Робочі кромки	Форма, сколи, заокруглення, ерозійне пошкодження	Оптичний огляд, профільний контроль
Ущільнювальні пояски	Зношування, риски, мікропошкодження	Огляд, мікрометричний контроль, перевірка герметичності
Дросельні отвори	Прохідний переріз, засмічення, ерозія	Продування, огляд, контроль витрати за потреби

З табл. 3.3 видно, що дефектація прецизійних деталей повинна бути деталізованою і включати як геометричний, так і функціональний контроль.

3.4. Вимоги до точності, шорсткості та геометрії відновлюваних поверхонь

Прецизійні деталі гідравлічних розподільників мають високі вимоги до точності. Після відновлення поверхня повинна забезпечувати правильний зазор, плавне переміщення золотника, мінімальні внутрішні витоки, відсутність заїдання і стабільну роботу при зміні тиску та температури [10; 17].

Основними геометричними параметрами є діаметр, овальність, конусність, циліндричність, співвісність, прямолінійність і стан робочих кромки. Для золотників особливо важливі циліндричність і шорсткість поясків. Для гільз і корпусних отворів — внутрішній діаметр, овальність, конусність і співвісність. Для робочих кромки — збереження форми та відсутність сколів [18–21].

Шорсткість поверхні має подвійне значення. З одного боку, занадто груба поверхня збільшує тертя, прискорює зношування і погіршує герметичність. З іншого боку, надмірно дзеркальна поверхня може погіршувати утримання тонкої плівки робочої рідини. Тому після відновлення необхідно забезпечити таку якість поверхні, яка відповідає призначенню конкретної деталі [39].

Важливо, що нанесення покриття не завершує процес відновлення. Для прецизійних деталей обов'язковою є фінішна обробка: полірування, доведення, притирання або інша операція, яка дозволяє отримати необхідну шорсткість і точність. При цьому не можна знімати надмірний шар покриття, оскільки це може зменшити його функціональну ефективність [40].

Для узагальнення вимог до відновлюваних поверхонь наведено табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Вимоги до точності та якості відновлюваних поверхонь деталей гідророзподільників

Поверхня	Основні вимоги	Значення для роботи вузла
Зовнішня поверхня золотника	Циліндричність, мала шорсткість, відсутність рисок і задирів	Забезпечення плавного ходу і герметичності
Внутрішня поверхня гільзи	Точний діаметр, овальність у допустимих межах, гладкість	Формування стабільного зазору
Корпусний отвір	Співвісність, відсутність ерозії, рівномірність покриття	Запобігання перекосу золотника
Робочі кромки	Збереження форми, відсутність сколів і надмірного заокруглення	Стабільність витратної характеристики
Ущільнювальні пояски	Гладкість, рівномірність, відсутність поздовжніх рисок	Зменшення внутрішніх перетікань
Дросельні поверхні	Стабільний прохідний переріз, чистота, відсутність ерозії	Точність керування потоком

З табл. 3.4 видно, що кожна поверхня має власні вимоги, тому технологія відновлення повинна бути адаптована до конкретного елемента гідророзподільника.

3.5. Підготовка поверхні перед нанесенням нанокomпозиційного нікелевого покриття

Підготовка поверхні є одним із найважливіших етапів технологічного процесу. Від її якості залежить адгезія покриття, рівномірність осадження, відсутність пор, суцільність шару та довговічність відновленої деталі [22].

Поверхня перед нікелюванням повинна бути очищеною від мастила, робочої рідини, продуктів корозії, старих покриттів, абразивних частинок, пилу та оксидних плівок. Для деталей гідроапаратури це особливо важливо, оскільки робоча рідина і мастила можуть проникати у мікропошкодження, канавки, пори та важкодоступні канали [30].

Підготовка може включати попереднє промивання, механічне очищення, тонке шліфування або полірування, знежирення, хімічне травлення, активацію і промивання. Конкретна послідовність залежить від матеріалу деталі, стану поверхні, характеру дефекту та вимог до покриття. Важливо, щоб після підготовки поверхня була активною і придатною до рівномірного осадження нікелю [22; 44].

Для прецизійних деталей механічна підготовка повинна бути обережною. Надмірне шліфування або груба абразивна обробка може порушити геометрію, збільшити зазор або пошкодити робочі кромки. Тому підготовка повинна видаляти дефекти та забруднення, але не змінювати базову форму деталі більше, ніж це технологічно допустимо [39].

Отже, підготовка поверхні є основою якісного нанокomпозиційного хімічного нікелювання. Недостатня підготовка може звести нанівець переваги покриття, оскільки навіть найкращий матеріал не забезпечить надійної роботи при слабкій адгезії або забрудненій поверхні.

3.6. Знежирення, травлення, активація та промивання деталей

Знежирення призначене для видалення мастильних матеріалів, робочої рідини, консерваційних складів, залишків технологічних рідин і тонких органічних плівок. Для деталей гідророзподільників ця операція особливо важлива, оскільки робоча рідина може залишатися у каналах, проточках і мікропошкодженнях [30].

Після знежирення виконується промивання, яке видаляє залишки очищувальних речовин. Недостатнє промивання може призвести до забруднення наступних ванн або погіршення адгезії покриття. Для прецизійних деталей бажано забезпечити промивання всіх каналів і внутрішніх порожнин.

Травлення застосовується для видалення оксидних плівок і створення активної металевої поверхні. Його режим залежить від матеріалу деталі, стану поверхні та вимог технології. Для прецизійних деталей травлення не повинно бути надмірним, оскільки воно може змінити розміри, збільшити шорсткість або пошкодити робочі кромки [22].

Активація поверхні необхідна для забезпечення початку рівномірного осадження нікелю. Вона створює умови, за яких поверхня стає придатною до автокаталітичного процесу. Після активації деталь повинна швидко переходити до стадії нанесення покриття, щоб уникнути повторного окиснення або забруднення.

Промивання між операціями є обов'язковим. Воно запобігає перенесенню хімічних речовин між стадіями, стабілізує процес і зменшує ризик появи дефектів покриття. Для деталей із внутрішніми каналами необхідно забезпечити повне видалення залишків розчинів із порожнин.

3.7. Приготування робочого розчину для хімічного нікелювання

Робочий розчин для хімічного нікелювання є складною технологічною системою, яка містить джерело іонів нікелю, відновник, комплексоутворювачі, буферні компоненти, стабілізатори та інші добавки, що забезпечують контрольований процес осадження. У разі наноконпозиційного нікелювання до цієї системи додатково вводяться нанодисперсні частинки функціонального призначення [14; 44].

Якість розчину визначає стабільність процесу, швидкість осадження, рівномірність покриття, вміст фосфору, включення наночастинок і кінцеві властивості шару. Тому приготування розчину повинно виконуватися за затвердженою технологічною інструкцією, з дотриманням вимог безпеки,

чистоти, послідовності введення компонентів і контролю основних параметрів [21].

Для дипломної технології доцільно описувати не рецептурні концентрації небезпечних речовин, а загальний склад і призначення компонентів. Джерело нікелю забезпечує надходження іонів для формування покриття. Відновник забезпечує хімічне відновлення нікелю на поверхні. Комплексоутворювачі стабілізують іони металу в розчині. Буферні компоненти підтримують необхідне середовище. Стабілізатори запобігають неконтрольованому розкладанню розчину [14; 22].

Для систематизації основних складових робочого розчину наведено табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Функціональне призначення основних компонентів робочого розчину хімічного нікелювання

Компонент розчину	Функціональне призначення	Вплив на якість покриття
Джерело іонів нікелю	Забезпечує формування нікелевого шару	Визначає можливість осадження покриття
Відновник	Забезпечує хімічне відновлення нікелю	Впливає на швидкість процесу і склад покриття
Комплексоутворювач	Стабілізує іони металу в розчині	Підвищує рівномірність і керованість процесу
Буферні компоненти	Підтримують стабільне середовище	Зменшують коливання властивостей розчину
Стабілізатори	Запобігають неконтрольованому розкладанню	Підвищують технологічну надійність процесу
Нанодисперсні частинки	Модифікують структуру покриття	Підвищують зносостійкість, твердість або антифрикційність
Диспергувальні добавки	Сприяють рівномірному розподілу частинок	Запобігають агломерації нанофази

З табл. 3.5 видно, що кожен компонент розчину виконує окрему функцію, а якість покриття залежить від їх взаємодії. Для прецизійних деталей особливо важливо забезпечити стабільність розчину, оскільки нестабільне осадження може призвести до нерівномірної товщини, пористості або включень.

3.8. Введення та стабілізація нанодисперсних частинок у робочому розчині

Введення нанодисперсних частинок у робочий розчин є ключовою особливістю наноконпозиційного хімічного нікелювання. Основне завдання цієї операції полягає в тому, щоб забезпечити рівномірне перебування частинок у розчині та їх стабільне включення у зростаючий нікелевий шар [43; 44].

Наночастинки мають високу питому поверхню, тому схильні до агломерації. Якщо вони збираються у скупчення, це погіршує рівномірність покриття, збільшує шорсткість, може створювати локальні дефекти та знижувати стабільність осадження. Тому важливими є диспергування, перемішування, використання технологічно сумісних стабілізуючих добавок і контроль чистоти розчину [44].

Для прецизійних деталей розмір і рівномірність розподілу частинок мають особливе значення. Покриття не повинно містити грубих включень, які після фінішного доведення можуть спричинити подряпини або локальні виступи. Нанодисперсна фаза повинна підвищувати властивості шару, але не погіршувати його гладкість [29].

Стабілізація наночастинок у розчині залежить від їх матеріалу, поверхневого стану, сумісності з робочим середовищем, режиму перемішування і тривалості процесу. Під час осадження необхідно підтримувати такий стан розчину, щоб частинки не осідали на дно і не утворювали агломератів. Для цього використовують контрольоване перемішування та технологічні прийоми, передбачені інструкцією [45].

Отже, введення наночастинок є не просто додаванням порошку до розчину, а складною технологічною операцією, від якої залежить якість наноконпозиційного покриття. Для відновлення деталей гідророзподільників особливо важливо забезпечити дрібнодисперсний, рівномірний і стабільний розподіл нанофази.

3.9. Нанесення наноконпозиційного нікелевого покриття на прецизійні поверхні

Нанесення наноконпозиційного нікелевого покриття є центральною операцією технологічного процесу. Вона виконується після повної підготовки поверхні, знежирення, травлення, активації та промивання. Деталь занурюють у робочий розчин, де на її поверхні відбувається хімічне осадження нікелевого шару з одночасним включенням нанодисперсних частинок [14; 44].

Під час осадження необхідно забезпечити рівномірний доступ розчину до всіх робочих поверхонь. Для золотників важливо рівномірно покрити пояски, проточки і кромки. Для гільз і корпусних отворів — забезпечити якісне осадження на внутрішніх циліндричних поверхнях. Для каналів і кромek — уникнути локального надлишкового нарощування або закупорювання прохідних перерізів [15; 21].

Тривалість процесу визначає товщину покриття. Оскільки прецизійні деталі мають малі допуски, товщина шару повинна бути контрольованою і відповідати величині зношування з урахуванням подальшої фінішної обробки. Надмірна товщина може призвести до заїдання або потреби у значному доведенні, а недостатня — не забезпечить відновлення розміру [10].

Під час нанесення покриття контролюють стабільність процесу, стан розчину, рівномірність перемішування, відсутність сторонніх частинок, забруднень і неконтрольованого осадження. Для наноконпозиційних покриттів додатково важливе збереження стабільної дисперсії наночастинок [44].

Після завершення осадження деталей необхідно промити, видалити залишки розчину з каналів і порожнин, висушити та підготувати до подальшої термічної або фінішної обробки. Для гідророзподільників особливо важливо, щоб у каналах не залишалися технологічні розчини або тверді частинки, які можуть потім потрапити у гідросистему.

3.10. Термічна обробка покриття після осадження

Термічна обробка після хімічного нікелювання застосовується для підвищення твердості, стабілізації структури, покращення зносостійкості та

зменшення внутрішніх напружень покриття. Для нікель-фосфорних покриттів після нагрівання можуть відбуватися структурні зміни, які сприяють підвищенню мікротвердості [23; 24].

Для прецизійних деталей гідравлічних розподільників термічна обробка повинна виконуватися обережно. Вона не повинна викликати деформації золотника, гільзи або корпусу, зміну геометрії кромek, порушення співвідносі чи появу термічних напружень. Тому режим термічної обробки має відповідати матеріалу деталі, товщині покриття та вимогам до точності [24].

У разі нанокомпозиційних покриттів термічна обробка може впливати не лише на нікель-фосфорну матрицю, а й на взаємодію між матрицею і наночастинками. Важливо, щоб після термічної обробки покриття зберігало суцільність, не мало тріщин, відшарувань або різкого збільшення шорсткості [43].

Після термічної обробки проводять огляд і попередній контроль стану покриття. Якщо виявлено зміну кольору, плями, тріщини, відшарування або нерівномірність, деталь не може бути допущена до фінішного доведення без додаткової оцінки.

Отже, термічна обробка є важливим етапом підвищення властивостей покриття, але для прецизійних деталей вона повинна бути контрольованою і спрямованою на зміцнення шару без порушення геометрії.

3.11. Фінішна механічна обробка, полірування та доведення поверхонь

Фінішна обробка є обов'язковим етапом відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників. Після нанесення покриття поверхня може мати незначну технологічну шорсткість або відхилення товщини, які необхідно усунути для забезпечення точного зазору і плавної роботи золотникової пари [39; 40].

До фінішних операцій належать полірування, доведення, притирання, тонке шліфування або інші методи високоточної обробки. Їх вибір залежить від типу деталі та характеру поверхні. Для золотників зазвичай важливо забезпечити циліндричність і малу шорсткість зовнішніх поясків. Для гільз — точний

внутрішній діаметр і гладкість. Для робочих кромek — збереження форми без надмірного заокруглення [18; 21].

Під час фінішної обробки необхідно уникати надмірного зняття покриття. Якщо шар буде знято занадто сильно, відновлення розміру стане недостатнім. Якщо обробка буде нерівномірною, можливі овальність, конусність або локальні відхилення, які погіршать роботу гідророзподільника.

Фінішна обробка повинна виконуватися з контролем чистоти, оскільки абразивні частинки після доведення можуть залишатися на поверхні або у каналах. Після завершення обробки деталь необхідно ретельно промити, очистити, висушити та підготувати до остаточного контролю.

Отже, фінішна механічна обробка, полірування та доведення забезпечують перехід від нанесеного покриття до функціонально придатної прецизійної поверхні. Саме цей етап визначає фактичну якість роботи золотникової пари після відновлення.

3.12. Контроль якості відновлених деталей

Контроль якості є завершальним етапом технологічного процесу і має підтвердити придатність відновленої деталі до експлуатації. Для прецизійних деталей гідравлічних розподільників контроль повинен бути комплексним і включати оцінювання геометрії, шорсткості, товщини покриття, адгезії, стану поверхні, герметичності та функціональної працездатності [35; 39].

Першим етапом є зовнішній огляд. Перевіряють відсутність плям, пор, тріщин, відшарувань, напливів, непокритих ділянок, механічних пошкоджень, забруднень і сторонніх включень. Для прецизійних поверхонь навіть дрібні дефекти можуть бути критичними.

Другим етапом є геометричний контроль. Вимірюють діаметри, овальність, конусність, циліндричність, співвісність, биття та інші параметри залежно від конструкції деталі. Для золотників і гільз особливо важливо перевірити відповідність фактичного зазору вимогам роботи гідророзподільника [10].

Третім етапом є контроль шорсткості. Поверхня повинна відповідати вимогам до плавності руху, герметичності та стійкості до зношування. Надмірна

шорсткість може призвести до підвищеного тертя, а дефекти фінішної обробки — до витоків і заїдання.

Четвертим етапом є контроль адгезії та суцільності покриття. Для відповідальних деталей можуть застосовуватися методи випробувань на відрив, вигин, термічну стійкість, мікрошліфи або інші методи залежно від умов лабораторії та вимог технології [22].

П'ятим етапом є функціональний контроль. Він може включати пробне складання, перевірку плавності переміщення золотника, відсутності заїдання, контроль герметичності, перевірку внутрішніх витоків і стабільності перемикавання. Саме функціональний контроль остаточно підтверджує придатність деталі до роботи у гідросистемі [37].

Для систематизації контролю якості відновлених деталей наведено табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Контроль якості деталей гідророзподільників після нанокompозиційного хімічного нікелювання

Вид контролю	Контрольовані параметри	Значення для працездатності
Візуальний контроль	Плями, пори, тріщини, відшарування, напливи	Виявлення грубих дефектів покриття
Геометричний контроль	Діаметр, овальність, конусність, циліндричність	Забезпечення правильного зазору
Контроль шорсткості	Якість фінішної поверхні	Плавність ходу і герметичність
Контроль товщини покриття	Рівномірність і відповідність заданій товщині	Відновлення розміру без порушення геометрії
Контроль адгезії	Міцність зчеплення покриття з основою	Запобігання відшаруванню
Контроль герметичності	Внутрішні та зовнішні витоки	Оцінювання функціональної придатності
Пробне складання	Плавність руху, відсутність заїдання	Перевірка роботи спряження

З табл. 3.6 видно, що контроль повинен охоплювати як параметри покриття, так і роботу деталі у складі спряження. Лише за умови позитивних результатів усіх основних видів контролю деталей може бути допущена до складання.

3.13. Розроблення технологічної карти відновлення прецизійної деталі гідророзподільника

Для практичного впровадження запропонованої технології необхідно розробити технологічну карту відновлення. Вона повинна містити послідовність операцій, зміст робіт, контрольні параметри, вимоги до якості та застереження щодо виконання відповідальних етапів.

Як типовий об'єкт доцільно прийняти золотник гідравлічного розподільника або гільзу золотникової пари, оскільки ці деталі мають прецизійні поверхні, працюють у найбільш відповідальних умовах і безпосередньо впливають на герметичність та точність керування.

Для узагальнення технологічної послідовності відновлення золотника гідророзподільника нанокмпозиційним хімічним нікелюванням наведено табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Технологічна карта відновлення золотника гідророзподільника нанокмпозиційним хімічним нікелюванням

№ операції	Назва операції	Зміст операції	Контрольний параметр
1	Попереднє очищення	Видалення робочої рідини, мастила, забруднень і продуктів зношування	Візуальна чистота деталі
2	Дефектація	Огляд золотника, визначення рисок, задирів, корозії, зношування поясків	Рішення про ремонтпридатність

3	Вимірювання геометрії	Контроль діаметра, овальності, конусності та циліндричності	Відповідність допустимим межам
4	Попередня фінішна підготовка	Обережне полірування або тонке шліфування пошкоджених поверхонь	Відсутність грубих дефектів
5	Знежирення	Видалення органічних забруднень і залишків робочої рідини	Відсутність мастильної плівки
6	Травлення	Видалення оксидних плівок і активація металевої поверхні	Рівномірна активна поверхня
7	Промивання	Видалення залишків попередніх розчинів	Чистота поверхні й каналів
8	Активація	Підготовка поверхні до автокаталітичного осадження	Готовність до нанесення покриття
9	Нанокomпозиційне нікелювання	Осадження нікелевого шару з нанодисперсними частинками	Товщина, рівномірність, суцільність
10	Промивання після осадження	Видалення залишків робочого розчину	Відсутність залишків реагентів
11	Термічна обробка	Структурне зміцнення та стабілізація покриття	Відсутність деформацій і тріщин
12	Фінішне доведення	Полірування або доведення до заданої шорсткості та розміру	Діаметр, шорсткість, циліндричність
13	Остаточний контроль	Перевірка геометрії, покриття, шорсткості, адгезії	Допуск до складання
14	Пробне складання	Перевірка руху золотника у гільзі або корпусі	Плавність ходу, відсутність заїдання
15	Функціональна перевірка	Оцінювання герметичності та внутрішніх витоків	Відповідність вимогам роботи вузла

Наведена в табл. 3.7 технологічна карта може бути адаптована для гільз, корпусних отворів, робочих кромek або ущільнювальних поясків. При цьому змінюються окремі операції, але загальна логіка залишається незмінною: очищення, дефектація, підготовка, нанесення покриття, термічна обробка, фінішне доведення і контроль якості.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі розроблено технологічний процес відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників методом наноконпозиційного хімічного нікелювання.

Визначено, що найбільш доцільними об'єктами відновлення є золотники, гільзи, корпусні отвори, робочі кромки, ущільнювальні пояски та дросельні поверхні, які мають локальне або помірне зношування, але зберігають основну геометрію і конструкційну міцність.

Обґрунтовано необхідність попереднього аналізу дефектів і визначення ремонтпридатності деталей. Показано, що до відновлення допускаються лише ті деталі, які не мають глибоких тріщин, значних деформацій, руйнування кромки або критичного збільшення зазорів.

Розглянуто операції дефектації золотників, гільз, корпусів і робочих кромки. Встановлено, що дефектація повинна включати візуальний огляд, вимірювання геометричних параметрів, контроль шорсткості, оцінювання стану кромки, перевірку каналів і визначення впливу дефектів на герметичність та точність роботи.

Визначено вимоги до точності, шорсткості та геометрії відновлюваних поверхонь. Показано, що для прецизійних деталей недостатньо лише нанести покриття; необхідно забезпечити правильний зазор, стабільність форми, малу шорсткість і відсутність локальних дефектів після фінішної обробки.

Розроблено послідовність технологічних операцій: очищення, дефектація, вимірювання, підготовка поверхні, знежирення, травлення, активація, промивання, приготування робочого розчину, введення і стабілізація нанодисперсних частинок, нанесення покриття, термічна обробка, фінішне доведення та контроль якості.

Запропоновано технологічну карту відновлення золотника гідророзподільника наноконпозиційним хімічним нікелюванням. Вона може бути використана як базова схема для відновлення інших прецизійних деталей гідравлічної апаратури.

У результаті встановлено, що запропонована технологія дозволяє

відновлювати прецизійні поверхні тонким рівномірним покриттям, підвищувати їх зносостійкість, корозійну стійкість, антифрикційні властивості та забезпечувати подальше фінішне доведення до потрібної точності.

РОЗДІЛ 4. ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОЇ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

4.1. Критерії ефективності технології відновлення прецизійних деталей

Оцінювання ефективності технології відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників методом наноконпозиційного хімічного нікелювання необхідне для визначення її практичної доцільності. Для таких деталей важливо не лише відновити зношений шар, а й забезпечити точність геометрії, герметичність, плавність роботи золотникової пари та стабільність функціонування гідравлічного вузла.

Основними критеріями ефективності запропонованої технології є:

- відповідність геометричних параметрів відновленої деталі технічним вимогам;
- рівномірність і суцільність нікелевого покриття;
- достатня адгезія покриття до основного металу;
- підвищення мікротвердості та зносостійкості поверхні;
- зменшення внутрішніх перетікань робочої рідини;
- відсутність заїдання золотника після складання;
- зниження трудомісткості порівняно з повною заміною деталі;
- економічна доцільність ремонту.

Для узагальнення критеріїв оцінювання доцільно подати табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Критерії ефективності технології відновлення прецизійних деталей

Критерій	Зміст оцінювання	Практичне значення
Геометрична точність	Діаметр, овальність, конусність, циліндричність	Забезпечення правильного зазору
Якість покриття	Товщина, рівномірність, суцільність	Надійність роботи відновленої поверхні
Мікротвердість	Опір поверхні деформації та зношуванню	Підвищення ресурсу деталі
Зносостійкість	Стійкість до тертя та абразивної дії	Зменшення швидкості спрацювання

Герметичність	Рівень внутрішніх і зовнішніх витоків	Стабільність роботи гідросистеми
Трудомісткість	Витрати часу на виконання операцій	Оцінка технологічної доцільності
Собівартість	Матеріальні та трудові витрати	Економічна ефективність ремонту

Таким чином, ефективність запропонованої технології необхідно оцінювати комплексно, оскільки для прецизійних деталей недостатньо лише нанести покриття. Потрібно забезпечити повне відновлення функціональних властивостей деталі.

4.2. Оцінювання якості відновлення за геометричними параметрами

Геометрична точність є одним із головних показників якості відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників. Золотники, гільзи та корпусні отвори працюють із малими зазорами, тому навіть незначне відхилення діаметра, овальності або циліндричності може призвести до збільшення внутрішніх витоків або заїдання золотника.

Після відновлення контролюють такі параметри:

- фактичний діаметр відновленої поверхні;
- овальність;
- конусність;
- циліндричність;
- шорсткість;
- стан робочих кромek;
- співвісність спряжених поверхонь.

Відхилення фактичного розміру від номінального можна визначити за формулою:

$$\Delta D = D_{\phi} - D_{н}$$

де ΔD — відхилення розміру, мм;

D_{ϕ} — фактичний діаметр після відновлення, мм;

$D_{н}$ — номінальний або заданий ремонтний діаметр, мм.

Овальність визначають як різницю між найбільшим і найменшим діаметром в одному перерізі:

$$O = D_{max} - D_{min}.$$

Конусність визначають як різницю діаметрів у двох перерізах по довжині деталі:

$$K = D_1 - D_2.$$

Для прецизійних деталей важливо, щоб після нанесення покриття і фінішного доведення геометричні параметри відповідали вимогам складання. Якщо розмір перевищує допустимі межі, можливе заїдання золотника; якщо розмір недостатній — збільшуються витoki робочої рідини.

Основні параметри контролю наведено у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Геометричні параметри контролю відновлених деталей

Деталь	Контрольовані параметри	Засоби контролю
Золотник	Діаметр, овальність, конусність, шорсткість	Мікрометр, індикатор, профілометр
Гільза	Внутрішній діаметр, циліндричність, шорсткість	Нутромір, калібр, профілометр
Корпусний отвір	Співвісність, діаметр, стан поверхні	Нутромір, індикатор, калібр
Робочі кромки	Форма, відсутність сколів і напливів	Оптичний контроль, візуальний огляд
Ущільнювальні пояски	Рівність, шорсткість, відсутність рисок	Мікрометр, профілометр

Отже, контроль геометричних параметрів є обов’язковою умовою допуску відновленої деталі до подальшого складання.

4.3. Оцінювання товщини, рівномірності та суцільності нікелевого покриття

Якість наноконпозиційного нікелевого покриття значною мірою визначається його товщиною, рівномірністю і суцільністю. Для прецизійних

деталей ці показники особливо важливі, оскільки покриття повинно компенсувати зношування, але не порушити робочий зазор.

Товщина покриття повинна відповідати величині зношування та запасу на фінішну обробку. Надмірна товщина може призвести до необхідності значного полірування або доведення, а недостатня — не забезпечить повного відновлення поверхні.

Рівномірність покриття оцінюють шляхом вимірювання його товщини у кількох контрольних точках. Відхилення товщини можна визначити за формулою:

$$\Delta h = h_{max} - h_{min}$$

де Δh — нерівномірність покриття, мкм;

h_{max} — найбільша виміряна товщина, мкм;

h_{min} — найменша виміряна товщина, мкм.

Суцільність покриття оцінюється за відсутністю пор, тріщин, непокритих ділянок, відшарувань, напливів та інших дефектів. Для гідравлічних розподільників це особливо важливо, оскільки дефект покриття може стати джерелом витоків, заїдання або прискореного зношування.

Оцінювання покриття включає:

- візуальний огляд;
- контроль товщини;
- перевірку рівномірності;
- контроль відсутності пор і тріщин;
- перевірку якості поверхні після фінішної обробки.

Таким чином, якісне покриття повинно бути рівномірним, суцільним, міцно зчепленим з основою та придатним до подальшого доведення.

4.4. Оцінювання мікротвердості та зносостійкості нанокompозиційного шару

Мікротвердість є важливим показником якості нанокompозиційного нікелевого покриття, оскільки вона характеризує здатність поверхні протидіяти

мікродеформації, подряпинам і абразивному зношуванню. Для золотників, гільз і корпусних отворів підвищення мікротвердості дозволяє зменшити швидкість спрацювання поверхонь.

Оцінювання мікротвердості виконують на контрольних зразках або на технологічно допустимих ділянках відновленої деталі. При цьому важливо враховувати, що твердість покриття залежить від складу нікель-фосфорної матриці, типу нанодисперсних частинок, режиму осадження і термічної обробки.

Зносостійкість оцінюють за здатністю покриття зберігати форму, розмір і якість поверхні в умовах тертя та контакту з робочою рідиною. Для гідравлічних розподільників важливо, щоб покриття не тільки мало високу твердість, а й не відшаровувалося, не викришувалося та не створювало додаткових абразивних частинок у гідросистемі.

Інтенсивність зношування можна визначити за формулою:

$$i = \frac{\Delta h}{t},$$

де i — інтенсивність зношування, мм/год;

Δh — величина зношування, мм;

t — тривалість роботи або випробування, год.

Найкращим результатом є зменшення швидкості зношування відновленої поверхні порівняно з поверхнею без покриття або з деталлю, відновленою традиційним способом.

4.5. Оцінювання герметичності та стабільності роботи гідравлічного розподільника після відновлення

Після відновлення прецизійних деталей необхідно оцінити не тільки якість покриття, а й функціональну працездатність гідравлічного розподільника. Основними показниками є герметичність, рівень внутрішніх витоків, плавність переміщення золотника, відсутність заїдання і стабільність перемикання потоків робочої рідини.

Герметичність визначає здатність розподільника обмежувати небажані перетікання рідини між каналами. Якщо після відновлення зазор між золотником і корпусом або гільзою відповідає вимогам, внутрішні витоки повинні зменшитися.

Величину відносного зменшення витоків можна оцінити за формулою:

$$\eta_{\Gamma} = \frac{Q_{\text{до}} - Q_{\text{після}}}{Q_{\text{до}}} \cdot 100\%,$$

де η_{Γ} — зниження витоків, %;

$Q_{\text{до}}$ — витoki до відновлення, л/хв;

$Q_{\text{після}}$ — витoki після відновлення, л/хв.

Стабільність роботи розподільника перевіряють під час пробного складання та випробування. Золотник повинен переміщуватися плавно, без заїдань, ривків і надмірного зусилля. Після перемикання він повинен чітко займати задане положення.

Оцінювання герметичності та стабільності роботи є підсумковим етапом перевірки, оскільки саме воно показує, чи забезпечує запропонована технологія не лише якісне покриття, а й реальне відновлення працездатності гідророзподільника.

4.6. Порівняння запропонованої технології з традиційними способами ремонту

Запропонована технологія відновлення методом наноконпозиційного хімічного нікелювання має низку переваг порівняно з традиційними способами ремонту прецизійних деталей. Вона дозволяє формувати тонке рівномірне покриття, зберігати геометрію деталі, підвищувати зносостійкість і виконувати подальше фінішне доведення.

Для порівняння запропонованої технології з традиційними способами ремонту наведено табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Порівняння технології наноконпозиційного хімічного нікелювання з традиційними способами ремонту

Показник	Механічна обробка	Гальванічне покриття	Напилення	Наноконпозиційн е хімічне нікелювання
Відновлення розміру	Обмежене	Можливе	Можливе	Можливе
Рівномірність покриття	Не формується	Залежить від струму	Обмежена	Висока
Придатність для внутрішніх поверхонь	Часткова	Обмежена	Низька	Висока
Вплив на геометрію	Може збільшити зазор	Можлива нерівномірність	Потребує обробки	Контрольований
Зносостійкість	Залежить від основного металу	Висока	Висока	Підвищена
Доцільність для золотникових пар	Обмежена	Середня	Обмежена	Висока
Потреба у фінішній обробці	Є	Є	Є	Є, але контрольована

З табл. 4.3 видно, що наноконпозиційне хімічне нікелювання найбільш повно відповідає вимогам відновлення прецизійних поверхонь складної форми. Його основною перевагою є поєднання рівномірності покриття, зносостійкості та можливості точного фінішного доведення.

4.7. Визначення трудомісткості технологічного процесу

Трудомісткість технологічного процесу характеризує витрати робочого часу на виконання всіх операцій відновлення. Для запропонованої технології вона включає очищення, дефектацію, підготовку поверхні, знежирення, травлення, активацію, нанесення покриття, термічну обробку, фінішне доведення і контроль якості.

Загальну трудомісткість можна визначити за формулою:

$$T_{\text{заг}} = T_{\text{оч}} + T_{\text{деф}} + T_{\text{підг}} + T_{\text{нік}} + T_{\text{терм}} + T_{\text{фін}} + T_{\text{конт}}$$

де $T_{\text{заг}}$ — загальна трудомісткість, год;

$T_{\text{оч}}$ — час очищення;

$T_{\text{деф}}$ — час дефектації;

$T_{\text{підг}}$ — час підготовки поверхні;

$T_{\text{нік}}$ — час нанесення покриття;

$T_{\text{терм}}$ — час термічної обробки;

$T_{\text{фін}}$ — час фінішної обробки;

$T_{\text{конт}}$ — час контролю якості.

Не весь час технологічного процесу є активною працею виконавця. Наприклад, час осадження покриття або термічної витримки може бути технологічним часом, протягом якого працівник контролює процес або виконує інші операції. Тому при розрахунках доцільно відокремлювати активну трудомісткість від загальної тривалості ремонту.

Технологія є доцільною, якщо її трудомісткість нижча або економічно виправдана порівняно з виготовленням нової деталі, заміною прецизійної пари або складним традиційним ремонтом.

4.8. Оцінювання матеріальних витрат на відновлення деталей

Матеріальні витрати на відновлення деталей методом наноконпозиційного хімічного нікелювання включають вартість хімічних компонентів, нанодисперсного наповнювача, допоміжних матеріалів, промивних засобів, енергії, інструменту, оснащення та витратних матеріалів для фінішної обробки.

Загальні матеріальні витрати можна визначити за формулою:

$$C_{\text{м}} = C_{\text{р}} + C_{\text{нч}} + C_{\text{доп}} + C_{\text{ен}} + C_{\text{ін}}$$

де $C_{\text{м}}$ — загальні матеріальні витрати, грн;

$C_{\text{р}}$ — витрати на робочий розчин, грн;

$C_{\text{нч}}$ — витрати на нанодисперсні частинки, грн;

$C_{\text{доп}}$ — витрати на допоміжні матеріали, грн;

$C_{\text{ен}}$ — витрати на енергію, грн;

$C_{\text{ін}}$ — витрати на інструмент та оснащення, грн.

Перевагою запропонованої технології є те, що відновлюється не вся деталь, а лише її функціональна поверхня. Це дозволяє зменшити витрати порівняно із заміною корпусу, золотника або гільзи, особливо якщо деталь є дорогою або складною у виготовленні.

Оцінювання матеріальних витрат повинно враховувати не тільки вартість хімічних матеріалів, а й економію від повторного використання деталі, зменшення простою обладнання та продовження ресурсу гідравлічного вузла.

4.9. Розрахунок економічної доцільності застосування наноконпозиційного хімічного нікелювання

Економічна доцільність запропонованої технології визначається порівнянням собівартості відновлення із вартістю нової деталі або традиційного ремонту. Якщо витрати на відновлення є нижчими, а якість деталі після ремонту відповідає технічним вимогам, застосування технології є доцільним.

Собівартість відновлення можна визначити за формулою:

$$C_{\text{в}} = C_{\text{м}} + C_{\text{п}} + C_{\text{обл}} + C_{\text{н}}$$

де $C_{\text{в}}$ — собівартість відновлення, грн;

$C_{\text{м}}$ — матеріальні витрати, грн;

$C_{\text{п}}$ — витрати на оплату праці, грн;

$C_{\text{обл}}$ — витрати на використання обладнання, грн;

$C_{\text{н}}$ — накладні витрати, грн.

Витрати на оплату праці визначаються за формулою:

$$C_{\text{п}} = T_{\text{акт}} \cdot C_{\text{год}}$$

де $T_{\text{акт}}$ — активна трудомісткість, год;

$C_{\text{год}}$ — вартість однієї людино-години, грн/год.

Економічний ефект від застосування технології можна визначити так:

$$E = C_{\text{н.д.}} - C_{\text{в}}$$

де E — економічний ефект, грн;

$C_{н.д.}$ — вартість нової деталі або вузла, грн;

C_v — собівартість відновлення, грн.

Якщо $E > 0$, відновлення є економічно вигідним. Якщо економічний ефект незначний, рішення про застосування технології необхідно приймати з урахуванням ресурсу, доступності запасних частин і часу простою обладнання.

Найбільший економічний ефект очікується при відновленні дорогих прецизійних деталей, корпусів гідророзподільників, гільз і золотників, заміна яких потребує значних витрат.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі розглянуто технічну та економічну ефективність технології відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників методом наноконпозиційного хімічного нікелювання.

Встановлено, що основними критеріями ефективності є геометрична точність, якість покриття, рівномірність шару, мікротвердість, зносостійкість, герметичність, трудомісткість і собівартість відновлення.

Показано, що геометричний контроль має вирішальне значення для золотників, гільз і корпусних отворів, оскільки від точності зазорів залежить герметичність і плавність роботи гідророзподільника.

Обґрунтовано необхідність оцінювання товщини, рівномірності та суцільності нікелевого покриття. Відсутність пор, тріщин, напливів і відшарувань є обов'язковою умовою надійної роботи відновленої деталі.

Встановлено, що наноконпозиційне покриття дозволяє підвищити мікротвердість і зносостійкість поверхні, що сприяє збільшенню ресурсу прецизійних деталей.

Порівняння з традиційними способами ремонту показало, що запропонована технологія є найбільш доцільною для деталей складної форми, внутрішніх поверхонь, золотникових пар і робочих кромek, де потрібне тонке рівномірне покриття.

Економічна ефективність технології визначається зменшенням витрат порівняно із заміною деталі, продовженням ресурсу гідророзподільника та скороченням простою обладнання.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ПІД ЧАС ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ХІМІЧНОГО НІКЕЛЮВАННЯ

5.1. Загальна характеристика умов праці під час виконання хіміко-технологічних ремонтних операцій

Відновлення деталей методом хімічного нікелювання належить до хіміко-технологічних ремонтних операцій. Такі роботи поєднують механічну підготовку деталей, очищення, знежирення, хімічну обробку, нанесення покриття, промивання, сушіння, термічну обробку та контроль якості.

Умови праці характеризуються наявністю хімічних речовин, промивних вод, парів робочих розчинів, дрібнодисперсних матеріалів, нагрітого обладнання, електроінструменту та вимірювальних засобів. Тому роботи повинні виконуватися на спеціально обладнаній ділянці з вентиляцією, засобами індивідуального захисту, справним обладнанням і контролем технологічної дисципліни.

Особливу увагу необхідно приділяти роботі з нанодисперсними матеріалами. Вони можуть легко потрапляти у повітря робочої зони у вигляді пилу або аерозолі, тому при їх дозуванні та введенні у розчин необхідно уникати розпилення, контакту зі шкірою та вдихання.

5.2. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори під час хімічного нікелювання

Під час хімічного нікелювання можуть діяти такі небезпечні та шкідливі фактори:

- хімічні речовини для знежирення, травлення та осадження покриття;
- пари та аерозолі робочих розчинів;
- нанодисперсні частинки;
- підвищена температура розчинів або обладнання;
- можливість потрапляння розчинів на шкіру чи в очі;
- слизькі поверхні через проливання рідин;
- електричне обладнання;

- відходи хімічного процесу.

Для узагальнення небезпечних факторів наведено табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Небезпечні та шкідливі фактори під час хімічного нікелювання

Фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки
Хімічні розчини	Знежирення, травлення, нікелювання	Подразнення шкіри, очей, органів дихання
Пари та аерозолі	Нагріті ванни, перемішування, промивання	Погіршення умов дихання, подразнення
Нанодисперсні частинки	Дозування і введення наповнювача	Потрапляння в органи дихання
Підвищена температура	Ванни, сушіння, термообробка	Опіки, перегрівання
Електрообладнання	Насоси, мішалки, нагрівачі	Ризик ураження електричним струмом
Проливання рідин	Переміщення деталей, промивання	Травмування, хімічний контакт
Відходи процесу	Відпрацьовані розчини, промивні води	Екологічне забруднення

Наявність цих факторів потребує чіткої організації робочого місця і дотримання правил безпеки.

5.3. Вимоги безпеки під час підготовки поверхонь деталей

Підготовка поверхонь включає очищення, механічну обробку, знежирення, травлення й активацію. На цьому етапі можливе утворення металевого пилу, абразивних частинок, бризок розчинів і парів очищувальних засобів.

Перед початком роботи необхідно перевірити справність інструменту, вентиляції, освітлення, ємностей для розчинів і засобів індивідуального захисту. Деталь повинна бути надійно закріплена, особливо під час механічної підготовки.

Під час механічної обробки працівник повинен користуватися захисними окулярами або щитком, рукавицями, спецодягом і респіратором за наявності пилу. Після механічної підготовки деталь слід очистити від пилу та абразивних частинок.

Знежирення і травлення необхідно виконувати обережно, у вентиляційній зоні, не допускаючи розбризкування розчинів. Забороняється торкатися підготовленої поверхні незахищеними руками, оскільки це може погіршити якість покриття та створити ризик хімічного контакту.

5.4. Вимоги безпеки під час роботи з хімічними розчинами та нанодисперсними матеріалами

Робота з хімічними розчинами повинна виконуватися у спеціально відведеному місці. Ємності з розчинами мають бути підписані, закриті, стійкі до дії речовин і розміщені так, щоб виключити випадкове перекидання.

Під час приготування та використання робочих розчинів необхідно дотримуватися технологічної інструкції. Не допускається змішування невідомих речовин, використання пошкодженої тари або робота без засобів захисту.

Нанодисперсні матеріали потрібно вводити у розчин так, щоб уникнути утворення пилу. Працівник повинен використовувати респіратор, рукавиці й захисні окуляри. Після роботи з наночастинками необхідно очистити робоче місце, не допускаючи сухого змітання пилу.

Усі операції з хімічними речовинами слід виконувати при працюючій вентиляції. У разі потрапляння розчину на шкіру або в очі необхідно негайно промити уражене місце великою кількістю води та звернутися по медичну допомогу.

5.5. Засоби індивідуального та колективного захисту працівників

Засоби індивідуального захисту підбирають залежно від характеру операції. Під час роботи з хімічними розчинами та нанодисперсними матеріалами працівник повинен використовувати спецодяг, хімічно стійкі рукавиці, захисні окуляри або щиток, респіратор і захисне взуття.

До засобів колективного захисту належать загальнообмінна та місцева вентиляція, захисні екрани, витяжні шафи, герметичні ємності, аварійні душі або пристрої для промивання очей, засоби пожежогасіння та попереджувальні знаки.

Для систематизації засобів захисту наведено табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Засоби захисту під час відновлення деталей методом хімічного нікелювання

Операція	Засоби індивідуального захисту	Засоби колективного захисту
Механічна підготовка	Окуляри, рукавиці, респіратор, спецодяг	Місцеве видалення пилу
Знежирення	Рукавиці, окуляри, захисний одяг	Вентиляція
Травлення й активація	Хімічно стійкі рукавиці, щиток, фартух	Витяжна зона, промивний пристрій
Нікелювання	Рукавиці, окуляри, респіратор за потреби	Вентиляція, захисні екрани
Робота з наночастинками	Респіратор, окуляри, рукавиці	Закрита тара, локальна витяжка
Термічна обробка	Термостійкі рукавиці, спецодяг	Захист від гарячих поверхонь

Використання засобів захисту є обов'язковою умовою безпечного виконання робіт.

5.6. Вентиляція, санітарно-гігієнічні вимоги та організація робочого місця

Робоче місце для хімічного нікелювання повинно мати ефективну вентиляцію. Це необхідно для видалення парів, аерозолів і можливих забруднень повітря, які виникають під час знежирення, травлення, промивання, нагрівання та нанесення покриття.

Приміщення повинно бути чистим, добре освітленим і обладнаним робочими поверхнями, стійкими до дії хімічних речовин. Хімічні матеріали мають зберігатися окремо, у підписаній тарі. Не допускається зберігання харчових продуктів, особистих речей або сторонніх предметів у зоні виконання робіт.

Санітарно-гігієнічні вимоги передбачають регулярне прибирання робочого місця, своєчасне видалення відходів, заборону приймання їжі у виробничій зоні, миття рук після роботи та використання справного спецодягу.

Організація робочого місця повинна забезпечувати послідовність технологічних операцій: підготовка деталі, очищення, хімічна обробка, нанесення покриття, промивання, сушіння, контроль. Це зменшує ризик помилок, забруднення поверхонь і порушення технології.

5.7. Пожежна та хімічна безпека ремонтної дільниці

Пожежна та хімічна безпека ремонтної дільниці є важливою умовою виконання робіт із хімічного нікелювання. На дільниці можуть використовуватися розчинники, нагрівальні пристрої, електрообладнання та хімічні речовини, які потребують обережного поводження.

На робочому місці забороняється використовувати відкритий вогонь, палити, зберігати легкозаймисті речовини біля нагрівачів або несправного електрообладнання. Усі електроприлади повинні бути справними, заземленими та придатними для роботи у відповідних умовах.

Хімічні речовини потрібно зберігати у спеціальній тарі, окремо за групами сумісності. Не допускається змішування речовин без технологічної потреби. У разі проливання розчину необхідно негайно локалізувати забруднення, нейтралізувати або зібрати його відповідно до інструкції та провітрити приміщення.

Дільниця повинна бути забезпечена вогнегасниками, засобами нейтралізації розливів, аптечкою, ємностями для відходів і засобами аварійного промивання.

5.8. Екологічні аспекти застосування хімічного нікелювання

Хімічне нікелювання має не лише технологічні переваги, а й екологічні ризики, пов'язані з використанням хімічних розчинів, промивних вод, сполук нікелю, допоміжних реагентів і нанодисперсних матеріалів.

Позитивним екологічним аспектом є можливість продовження ресурсу деталей і зменшення потреби у виготовленні нових запасних частин. Це сприяє скороченню кількості металовідходів і зменшенню витрат матеріалів.

Водночас відпрацьовані розчини та промивні води не можна скидати у каналізацію без очищення. Вони повинні збиратися в окремі ємності, маркуватися і передаватися на утилізацію або очищення відповідно до вимог підприємства.

Нанодисперсні матеріали також потребують обережного поводження. Не допускається їх потрапляння у повітря робочої зони, ґрунт, воду або звичайні побутові відходи.

5.9. Поводження з відпрацьованими розчинами, промивними водами та твердими відходами

Під час хімічного нікелювання утворюються відпрацьовані розчини, промивні води, забруднені серветки, залишки фільтрів, осади, тара від реагентів і тверді відходи після механічної підготовки.

Усі відходи необхідно сортувати за видом і рівнем небезпеки. Відпрацьовані розчини збирають у герметичні підписані ємності. Промивні води накопичують окремо для подальшого очищення або передачі на спеціалізовану утилізацію. Забруднені серветки, фільтри та тара зберігаються в окремих контейнерах.

Для узагальнення правил поводження з відходами наведено табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Поводження з відходами під час хімічного нікелювання

Вид відходів	Джерело утворення	Спосіб поводження
Відпрацьовані розчини	Ванни нікелювання, травлення, активації	Збір у герметичні ємності, передача на утилізацію
Промивні води	Промивання деталей між операціями	Накопичення та очищення
Осади та шлами	Очищення ванн і фільтрів	Збір як небезпечні виробничі відходи
Забруднені серветки	Очищення деталей та інструменту	Зберігання у закритій тарі

Тара від реагентів	Використання хімічних матеріалів	Маркування, передача на утилізацію
Абразивний пил і стружка	Механічна підготовка деталей	Збір окремо від хімічних відходів

Правильне поводження з відходами зменшує екологічний вплив ремонтної ділянки та забезпечує безпечні умови праці.

Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі розглянуто питання охорони праці та екологічної безпеки під час відновлення деталей методом хімічного нікелювання.

Встановлено, що основними небезпечними факторами є хімічні розчини, пари та аерозолі, нанодисперсні частинки, підвищена температура, електрообладнання, проливання рідин і утворення небезпечних відходів.

Обґрунтовано необхідність використання засобів індивідуального та колективного захисту: рукавиць, окулярів, респіраторів, спецодягу, вентиляції, витяжних пристроїв, захисних екранів і засобів аварійного промивання.

Показано, що безпечне виконання робіт можливе лише за умови правильної організації робочого місця, справності обладнання, маркування хімічних речовин, дотримання технологічної дисципліни та пожежної безпеки.

Розглянуто екологічні аспекти процесу. Встановлено, що відпрацьовані розчини, промивні води, осадки, тара та забруднені матеріали повинні збиратися окремо і передаватися на очищення або утилізацію.

Отже, технологія хімічного нікелювання може бути безпечною та екологічно прийнятною за умови дотримання вимог охорони праці, вентиляції, пожежної безпеки та організованого поводження з відходами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі розглянуто питання розроблення технології відновлення прецизійних деталей гідравлічних розподільників методом наноконпозиційного хімічного нікелювання.

У першому розділі проаналізовано роль гідравлічних розподільників у роботі машин і технологічного обладнання. Встановлено, що вони є відповідальними елементами гідросистем, від яких залежать напрям потоку робочої рідини, герметичність, стабільність тиску, точність керування і плавність роботи виконавчих механізмів.

Розглянуто конструктивні особливості прецизійних деталей гідравлічних розподільників. Визначено, що найбільш відповідальними є золотники, гільзи, корпусні отвори, робочі кромки, ущільнювальні пояски та дросельні поверхні. Ці елементи працюють із малими зазорами і потребують високої точності відновлення.

Проаналізовано основні види зношування прецизійних деталей гідроапаратури: абразивне, адгезійне, ерозійне, кавітаційне, корозійно-механічне та фретинг-зношування. Встановлено, що зношування призводить до збільшення внутрішніх витоків, зниження чутливості керування, заїдання золотника та втрати стабільності роботи гідророзподільника.

У другому розділі обґрунтовано вибір наноконпозиційного хімічного нікелювання як перспективного способу відновлення прецизійних деталей. Показано, що цей метод дозволяє формувати рівномірне тонке покриття на деталях складної форми без застосування зовнішнього електричного струму.

Встановлено, що наноконпозиційне нікелеве покриття поєднує переваги нікель-фосфорної матриці та функціональних нанодисперсних частинок. Завдяки цьому підвищуються твердість, зносостійкість, корозійна стійкість і антифрикційні властивості відновлених поверхонь.

У третьому розділі розроблено технологічний процес відновлення прецизійних деталей гідророзподільників. Він включає очищення, дефектацію, визначення ремонтпридатності, підготовку поверхні, знежирення, травлення,

активацію, нанесення наноконпозиційного нікелевого покриття, термічну обробку, фінішне доведення та контроль якості.

Обґрунтовано, що до відновлення доцільно допускати деталі з локальним або помірним зношуванням, які зберегли основну геометрію та конструкційну міцність. Деталі з глибокими тріщинами, значною деформацією або критичним руйнуванням робочих кромок відновлювати недоцільно.

У четвертому розділі оцінено технічну та економічну ефективність запропонованої технології. Встановлено, що її ефективність визначається геометричною точністю, рівномірністю покриття, мікротвердістю, зносостійкістю, герметичністю, трудомісткістю та собівартістю ремонту.

Показано, що наноконпозиційне хімічне нікелювання має переваги порівняно з механічним відновленням, гальванічним осадженням і напиленням, оскільки дозволяє формувати рівномірний шар на складних і внутрішніх поверхнях з подальшим доведенням до прецизійної якості.

У п'ятому розділі розглянуто питання охорони праці та екологічної безпеки. Визначено основні небезпечні фактори під час хімічного нікелювання, обґрунтовано необхідність використання засобів захисту, вентиляції, безпечного поводження з хімічними речовинами та організованої утилізації відходів.

Практичне значення роботи полягає в тому, що запропонована технологія може бути використана у ремонтних підприємствах, сервісних центрах і навчально-виробничих лабораторіях для відновлення золотників, гільз, корпусних отворів та інших прецизійних деталей гідравлічних розподільників.

Загалом встановлено, що наноконпозиційне хімічне нікелювання є технічно обґрунтованим і перспективним методом відновлення прецизійних деталей гідравлічної апаратури. Його застосування дозволяє відновити розмірну точність, підвищити зносостійкість, зменшити внутрішні витоки та продовжити ресурс гідравлічних розподільників.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Чинний від 2016-07-01. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 16 с.
2. Журавель Д. П., Паламарчук І. П., Уманський С. М., Паламарчук В. І. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи : підручник / за ред. Д. П. Журавля. Київ : ЦП «Компринт», 2021. 449 с.
3. Буренніков Ю. А., Немировський І. А., Козлов Л. Г. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2013. 273 с.
4. Кулінченко В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід : підручник. Київ : ІНКОС, Центр навчальної літератури, 2006. 616 с.
5. Manring N. D., Fales R. C. Hydraulic Control Systems. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2020.
6. Watton J. Fundamentals of Fluid Power Control. Cambridge : Cambridge University Press, 2009.
7. Ledvoň M., Hružík L., Bureček A., Dýrr F., Polášek T. Leakage Characteristics of Proportional Directional Valve. Processes. 2023. Vol. 11, № 2. Article 512. DOI: 10.3390/pr11020512.
8. Gordić D., Babić M., Milovanović D., Savić S. Spool valve leakage behaviour. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2011. Vol. 11, № 4. P. 859–866. DOI: 10.1016/S1644-9665(12)60082-X.
9. Song F., Peng L., Chen J., Wang B. Internal Leakage Prediction of Hydraulic Spool Valves Based on Acoustic Emission Technology. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2113. Article 012016. DOI: 10.1088/1742-6596/2113/1/012016.
10. Ledvoň M., Hružík L., Bureček A., Dýrr F. Experimental and Numerical Analysis of Leakage Characteristics of Proportional Directional Valve. MATEC Web of Conferences. 2022. Article 02007.

11. Zheng D., Zhang X., Yang Y., et al. Review of Acoustic Emission Detection Technology for Internal Leakage in Valves. *Sensors*. 2025. Vol. 25, № 14. Article 4487.
12. Sudagar J., Lian J., Sha W. Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings — A critical review. *Journal of Alloys and Compounds*. 2013. Vol. 571. P. 183–204. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.03.107.
13. Agarwala R. C., Agarwala V. Electroless alloy/composite coatings: A review. *Sadhana*. 2003. Vol. 28, № 3–4. P. 475–493. DOI: 10.1007/BF02706445.
14. Balaraju J. N., Sankara Narayanan T. S. N., Seshadri S. K. Electroless Ni–P composite coatings. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2003. Vol. 33. P. 807–816. DOI: 10.1023/A:1025572410205.
15. Sahoo P., Das S. K. Tribology of electroless nickel coatings — A review. *Materials & Design*. 2011. Vol. 32, № 4. P. 1760–1775. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.11.013.
16. Chintada V. B., Koona R., Rao K. V. V., et al. Advancements in Nickel-Phosphate/Boron Based Electroless Coatings: A Comprehensive Review of Technologies, Properties and Applications. *Materials*. 2023. Vol. 16, № 18. Article 6116.
17. Raghavendra C. R., Basavarajappa S., Sogalad I., Kumar S. A review on Ni based nano composite coatings. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 39. P. 6–16. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.810.
18. Sankara Narayanan T. S. N., Seshadri S. K., Park I. S., Lee M. H. Electroless Nanocomposite Coatings: Synthesis, Characteristics, and Applications. *Handbook of Nanoelectrochemistry*. Cham : Springer, 2015. P. 389–416. DOI: 10.1007/978-3-319-15266-0_48.
19. Reddy V. V. N., Ramamoorthy B., Kesavan Nair P. A study on the wear resistance of electroless Ni–P/Diamond composite coatings. *Wear*. 2000. Vol. 239, № 1. P. 111–116. DOI: 10.1016/S0043-1648(00)00330-6.

20. Huang Y. S., Zeng X. T., Annergren I., Liu F. M. Development of electroless NiP–PTFE–SiC composite coating. *Surface and Coatings Technology*. 2003. Vol. 167, № 2–3. P. 207–211. DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00899-X.
21. Srinivasan K. N., Meenakshi R., Santhi A., Thangavelu P. R., John S. Studies on electroless nickel–PTFE composite coatings. *Surface Engineering*. 2005. Vol. 21, № 2. P. 156–160. DOI: 10.1179/174329405X40902.
22. Zhao Q., Liu Y., Müller-Steinhagen H., Liu G. Electroless Ni–Cu–P–PTFE composite coatings and their anti-corrosion properties. *Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol. 197. P. 108–113.
23. Yang G. R., Song W. M., Sun X. M., Ma Y., Lu J. J., Hao Y. The Wear Behavior of Electroless Ni-P/SiC Composite Coating. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 239–242. P. 954–957. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.239-242.954.
24. Sharma A., Singh A. K. Electroless Ni-P and Ni-P-Al₂O₃ Nanocomposite Coatings and Their Corrosion and Wear Resistance. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013. Vol. 22, № 1. P. 176–183. DOI: 10.1007/s11665-012-0224-1.
25. Franco M., Sha W., Malinov S., Liu H. Micro-scale wear characteristics of electroless Ni–P/SiC composite coating under two different sliding conditions. *Wear*. 2014. Vol. 317, № 1–2. P. 254–264. DOI: 10.1016/j.wear.2014.06.013.
26. Islam M., Azhar M. R., Fredj N., Burleigh T. D., Oloyede O. R., Almajid A. A., Shah S. I. Influence of SiO₂ nanoparticles on hardness and corrosion resistance of electroless Ni–P coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 261. P. 141–148. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.044.
27. Dong D., Chen X. H., Xiao W. T., Yang G. B., Zhang P. Y. Preparation and properties of electroless Ni–P–SiO₂ composite coatings. *Applied Surface Science*. 2009. Vol. 255. P. 7051–7055.
28. Ghavidel N., Allahkaram S. R., Ramezanzadeh B. Corrosion and wear behavior of an electroless Ni-P/nano-SiC coating on AZ31 magnesium alloy. *Surface and Coatings Technology*. 2020.

29. Lee M., Kim J., Park S., et al. Electroless Ni-P-PTFE Composite Plating with Rapid PTFE Incorporation. *Coatings*. 2022. Vol. 12, № 8. Article 1199.
30. Zhang X., Chen Y., Liu Y., et al. Friction and Wear of Electroless Ni-P-CS Composite Coating. *Metals*. 2023. Vol. 13, № 2. Article 315.
31. Gunduz H., et al. Microstructural Evaluation of Graphene-Reinforced Nickel-Phosphorus Composite Coatings. *Coatings*. 2022. Vol. 12, № 12. Article 1827.
32. Mohanty S., et al. Electroless Ni-P-MoS₂-Al₂O₃ Composite Coating with Hard and Lubricating Particles. *Materials*. 2022.
33. Alhamad R. K., et al. Microstructure, Corrosion and Wear Behaviors of Electroless NiP Nanocomposite Coatings. *Journal of Composites Science*. 2024. Vol. 7, № 4. Article 68.
34. Wang B., et al. High corrosion and wear resistant electroless Ni-P gradient coating on aluminum alloy. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2024.
35. Boakye G. O., et al. Wear-reducing nickel-phosphorus and graphene oxide composite coatings for corrosion protection. *Corrosion Science*. 2022.
36. ISO 4527:2003. Metallic coatings — Autocatalytic (electroless) nickel-phosphorus alloy coatings — Specification and test methods. Geneva : International Organization for Standardization, 2003.
37. ASTM B733-22. Standard Specification for Autocatalytic (Electroless) Nickel-Phosphorus Coatings on Metal. West Conshohocken : ASTM International, 2022.
38. ASTM B656-91. Standard Guide for Autocatalytic (Electroless) Nickel-Phosphorus Deposition on Metals for Engineering Use. West Conshohocken : ASTM International, 1991.
39. ASTM E384-22. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken : ASTM International, 2022.
40. ASTM G99-17. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. West Conshohocken : ASTM International, 2017.

41. ISO 16889:2022. Hydraulic fluid power — Filters — Multi-pass method for evaluating filtration performance of a filter element. Geneva : International Organization for Standardization, 2022.
42. ДСТУ EN ISO 4413:2018. Система гідравлічна. Загальні правила та вимоги щодо безпеки для систем та їхніх складників. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.
43. Stachowiak G. W., Batchelor A. W. Engineering Tribology. 4th ed. Amsterdam : Elsevier, 2013.
44. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ. Верховна Рада України. Поточна редакція від 12.09.2025.
45. Про управління відходами : Закон України від 20.06.2022 № 2320-ІХ. Верховна Рада України.