

НУБІП України

НУБІП України

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

01.12 – КМР. 463 “С” 2023.03.28. 033 ПЗ

**СОСНОВ ВЛАДИСЛАВ СЕРГІЙОВИЧ**

**2023 р.**

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет

Конструювання та дизайну

УДК 61:01-5/1694-3

ПОГОДЖЕНО

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри  
Надійності техніки  
(назва кафедри)

Новицький А.В.

(підпис)

(ПІБ)

“ ” 2023 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Підвищення довговічності прецизійних деталей гідравлічних  
розподільників наноконпозиційним хімічним нікелюванням»

Спеціальність 133 – «Галузеве машинобудування»  
(код і назва)

Освітня програма «Технічний сервіс машин та обладнання»  
сільськогосподарського виробництва

(назва)

Орієнтація освітньої програми

освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент

Новицький А.В.

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи:

К.Т.Н., доцент

Банний О.О.

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

(ПІБ)

Виконав:

Соснов В.С.

(підпис)

(ПІБ)

КІЇВ - 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факкультет Конструювання та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Надійності техніки

(назва кафедри)

к.т.н., доцент

Новинський А.В.

(підпис)

(ПБ)

“ ” 2022 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Соснов Владислав Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність

133 – «Галузеве машинобудування»

(код і назва)

Освітня програма «Технічний сервіс машин та обладнання  
сільськогосподарського виробництва

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи «Підвищення довговічності прецизійних деталей  
гідравлічних розподільників нанокompозиційним хімічним нікелюванням»

затверджена наказом ректора НУБіП України від 28 березня 2023р. № 463 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 2023.11.12

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи у процесі експлуатації  
сільськогосподарських машин від 30 до 50 % усіх відмов посідає гідравлічну  
систему через зношування прецизійних деталей, переважно золотникових  
пар. Для відновлення золотників найперспективнішим у цьому відношенні є  
композиційне хімічне нікелювання, оскільки з усіх хімічних покриттів нікелеве  
має досить високу мікротвердість, зносо- і корозійну стійкість.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз відмов гідророзподільників автотракторної техніки
2. Підвищити ресурс золотників
3. Отримати від технології композиційне хімічне нікелювання позитивний економічний ефект.

Дата видачі завдання “15” жовтня 2022 року

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

к.т.н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

Банний О.О.

(ПБ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Соснов В.С.

(підпис)

(ПБ)

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1. ОБГРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ТЕМИ.....	9
1.1 Технічні вимоги до прецизійних деталей гідророзподільників.....	10
1.2 Аналіз причин зносу золотникових пар.....	12
1.3 Аналіз способів відновлення та зміцнення деталей золотникових пар.....	16
1.3.1 Способи відновлення корпусу гідророзподільника.....	16
1.3.2 Способи відновлення золотника гідророзподільника.....	17
1.4 Композиційне хімічне нікелювання – спосіб відновлення працездатності золотників гідророзподільників.....	23
1.5 Мета та завдання досліджень.....	29
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДО ОБГРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ЗМІЦНЕННЯ ЗОЛОТНИКІВ ГІДРОРОЗПОДІЛЬНИКА КОМПОЗИЦІЙНИМ ХІМІЧНИМ НІКЕЛЮВАННЯМ.....	30
2.1 Опис процесу утворення композиційних хімічних покриттів на основі нікелю.....	30
2.2 Сутність зміцнення хімічних покриттів дисперсними матеріалами.....	34
2.3 Теоретичне обґрунтування підвищення довговічності деталей відновлених (зміцнених) композиційним хімічним нікелюванням.....	38
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОТРИМАНИХ ПОКРИТТІВ.....	43
3.1. Програма досліджень.....	43
3.2 Методика одержання композиційного хімічного покриття на основі нікелю.....	43
3.3 Методика вибору міцного матеріалу хімічного нікелевого покриття.....	48
3.4 Дослідження фізико-механічних властивостей покриттів.....	48
3.4.1 Методика визначення мікротвердості покриттів.....	48

3.4.2	Методика визначення міцності зчеплення покриття з основним металом	49
3.5	Методика дослідження якісного та кількісного складу покриттів	50
3.6	Методика трибологічних випробувань	51
3.7	Методика корозійних випробувань	52
3.8	Методика стендових випробувань	53
3.9	Методика експлуатаційних випробувань	56
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ		58
4.1	Дослідження фізико-механічних властивостей покриттів	58
4.1.1	Результати випробувань на мікротвердість та визначення найбільш ефективного зміцнюючого матеріалу	58
4.2	Дослідження структури поверхні та складу покриття	59
4.2.1	Результати дослідження структури поверхні покриття	59
4.2.2	Результати дослідження якісного та кількісного складу покриттів	61
4.3	Результати лабораторних випробувань на зносостійкість	62
4.4	Результати корозійних випробувань	65
4.5	Результати стендових випробувань	65
4.6	Результати експлуатаційних випробувань	66
4.6.1	Прогнозування міжремонтного ресурсу гідророзподільників із золотниками, відновленими ультра- та нанокмпозиційним нікелюванням	67
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІДНОВЛЕННЯ ЗОЛОТНИКІВ ГІДРОРОЗМІЧНИКА Р80 УЛЬТРА НАНОКОМПОЗИЦІЙНИМ НІКЕЛЮВАННЯМ		69
ВИСНОВОК		76
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ		77
ДОДАТКИ		82

## ВСТУП

Підвищення надійності машин та окремих механізмів – найважливіше завдання ремонтного виробництва.

У процесі експлуатації сільськогосподарських машин від 30 до 50 % усіх відмов посідає гідравлічну систему через зношування пре цизіонних деталей, переважно золотникових пар. Причин, що викликають їх знос і вихід з ладу, багато: знакозмінні навантаження при високих швидкостях протікання і тиску робочої рідини, конструктивні особливості деталей, заїдання, схоплювання, вплив корозійного середовища та ін. Однак основною причиною є абразивне зношування в результаті попадання в масло механічних частинок.

Висока вартість, велика витрата деталей для потреб ремонтних підприємств зумовлюють необхідність відновлення золотникових пар, що, безсумнівно, забезпечить значну економію коштів.

Застосовувані в даний час способи відновлення та зміцнення золотникових пар – високотемпературні та тривалі за часом. Для використання в умовах ремонтних підприємств потрібне складне і дороге устаткування.

Для відновлення працездатності золотників найбільш перспективні такі технологічні способи відновлення, які дозволять знизити до мінімуму подальшу механічну обробку та забезпечать автоматизацію процесів. При цьому вони повинні проходити при низьких температурах з метою виключення короблення деталей. До таких способів відновлення, насамперед можна віднести гальванічні та хімічні.

Однак за всіх переваг гальванічні способи відновлення мають такі недоліки, як виникнення дендритів на краях деталей, не висока мікротвердість покриття та ін. Тому в останні роки успішно розвивається технологія осадження композиційних хімічних покриттів (КХП). Особливість такої технології полягає в тому, що разом з металом з ванни на деталі осідають дисперсні частинки.

Для відновлення золотників найперспективнішим у цьому відношенні є композиційне хімічне нікелювання, оскільки з усіх хімічних покриттів нікелеве має досить високу мікротвердість, зносостійкість і корозійну стійкість.

У зв'язку з викладеним, необхідно розробити та дослідити спосіб відновлення та зміцнення деталей золотникових пар із застосуванням композиційного хімічного нікелювання.

Дана робота присвячена дослідженню процесу осадження та визначенню основних властивостей композиційних хімічних покриттів на основі нікелю з метою розробки технології відновлення золотникових пар гідравлічних розподільників.

**Мета роботи** – збільшення міжремонтного ресурсу золотникових пар гідравлічних розподільників шляхом розробки та застосування технологічного

процесу відновлення та зміцнення поясків золотника ультра- та нанокомпозиційним хімічним нікелюванням.

**Об'єкт дослідження** – процес утворення нанокомпозиційного хімічного покриття на основі нікелю.

**Предмет дослідження** - закономірності впливу нанорозмірних порошоків оксиду алюмінію та політитанату калію на фізико-механічні властивості нікелевого покриття та довговічність прецизійних деталей гідравлічних розподільників.

**Методологія та методи досліджень.** Методологічною основою виконання були методи обробки експериментальних даних з допомогою математичної статистики. Лабораторним дослідженням підвергали поверхневий шар КХП, його основні фізико-механічні властивості, зносо- і корозійну стійкість. Стендові випробування проводили на модернізованому стенді КІ-4200. В результаті експлуатаційних випробувань було визначено ресурс золотникових пар гідравлічних розподільників типу Р80, відновлених КХП.

**Наукова новизна.** Теоретично обґрунтовано підвищення зносостійкості і як наслідок - ресурсу гідророзподільника із золотниками, відновленими КХП на основі нікелю. Встановлено оптимальний склад розчину композиційного нікелювання та режими нанесення покриття, що дозволяють отримувати КХП з підвищеними фізико-механічними властивостями.

Вивчено структуру та основні експлуатаційні властивості хімічного покриття нікелю, що формуються під впливом нано- та ультрадисперсних частинок.

**Практична цінність.** На підставі проведених досліджень запропоновано технологію відновлення золотникових пар гідравлічних розподільників типу Р80 із застосуванням композиційного нікелювання, яка дозволяє збільшити ресурс золотникових пар у 1,2 рази порівняно з серійними.

**Апробація роботи** Основні положення роботи доповідають, обговорені та схвалені на: Х Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 16-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-резидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 23-24 лють, 2023 р., м. Київ / МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2023.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна магістерська робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку літератури та додатків. Викладено на 80 сторінках. Містить 11 таблиць, 26 рисунків. Список літератури включає 71 найменувань, з них 4 іноземною мовою.

**Наукові положення та результати роботи, що виносяться на захист:**

• теоретичне обґрунтування підвищення ресурсу золотників відновлених композиційним хімічним нікелюванням;

• технологія відновлення золотникових пар ультра- та нанокомпозиційним нікелюванням;

• результати досліджень впливу складу розчину та режимів композиційного нікелювання на механізм формування структури та основних - фізико-механічних властивостей композиційного покриття;

• результати стендових та експлуатаційних випробувань та оцінка економічної ефективності розробленої технології.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## РОЗДІЛ 1. ОБГРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ТЕМИ

Сучасне сільськогосподарське виробництво передбачає використання цілого ряду різних за конструкцією та призначенням машин, знарядь та агрегатів, призначених для виконання комплексу сільськогосподарських робіт. Їх застосовують на базі різних транспортних засобів, зокрема тракторів загального та сільськогосподарського призначення. Для приведення в дію виконавчого механізму машинетракторного агрегату більшість тракторів обладнано гідравлічними системами.

Управління гідросистемою автотракторної техніки здійснюється за допомогою гідророзподільника, який у процесі роботи розподіляє робочу рідину під високим тиском до силових циліндрів, своєчасно та швидко відсікає потік робочої рідини перепуском надлишкового тиску. Всі ці операції здійснюються через прецизійні пари: «перепускний клапан – напрямна», «золотник – корпус» (рисунок 1.1).

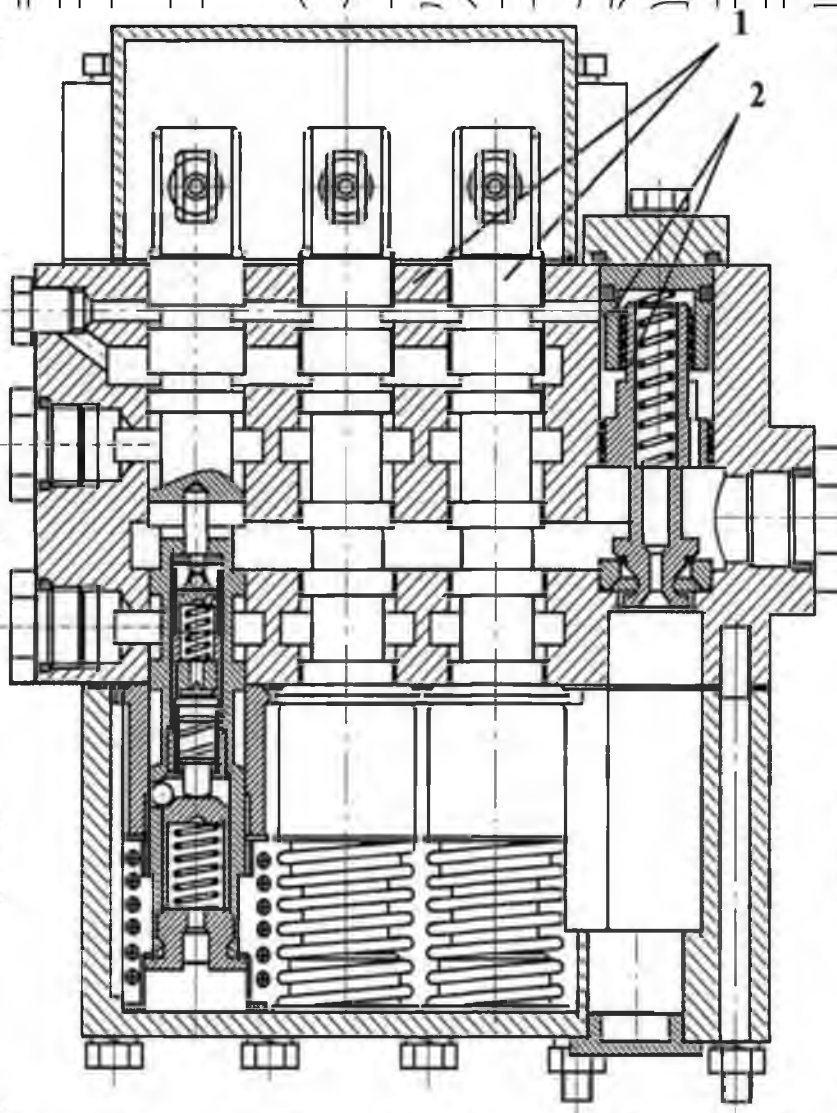


Рисунок 1.1 - Прецизійні пари гідророзподільника Р80  
1 – «золотник – корпус»; 2 - «перепускний клапан - напрямна»

Тракторний парк, оснащений гідророзподільниками золотникового типу, представлений у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Використання розподільників золотникового типу на тракторах

Марка трактора	Тип розподільника	
	P80	P160
	Кількість, шт.	
MT3-122T	57	
MT3-80, MT3-82	6552	
ЮМЗ-6	1373	
T-40	575	
T-70	227	
T-25	342	
T-16	367	
K-700		132
K-701		91
T-150K		1246
T-150		114
Разом:	9493	1583

Прецизійна пара «перепускний клапан - напрямна» працює лише при переведенні золотника з положення «нейтральне» в положення «підйом» і «опускання» і має незначне зношування в процесі експлуатації [25].

Найбільш інтенсивно в процесі експлуатації знощується прецизійна пара «золотник - корпус», яка є основним робочим сполученням гідророзподільника. Необхідно відзначити, що зазначені прецизійні пари всіх типів гідророзподільників здебільшого однотипні і відрізняються лише габаритними розмірами та незначними змінами в конструктивному плані.

Як видно з таблиці 1.1, кількість гідророзподільників P80, що знаходяться в експлуатації, становить понад 82 % від загальної кількості експлуатованих на тракторах, обладнаних гідророзподільниками.

У зв'язку з цим як об'єкт дослідження обрано прецизійну пару «золотник - корпус» гідророзподільника P80.

### 1.1 Технічні вимоги до прецизійних деталей гідророзподільників

Золотники гідророзподільника P80 виготовляють із легированої сталі 9ХС

ГОСТ 5950-2000, а корпус розподільника із сірого чавуну СЧ 21-40 ГОСТ 1412-85. Виготовлені деталі піддаються термообробці, золотники до твердості HRC56-63 корпус до HB 170-240.

Застосування даних матеріалів для виготовлення деталей пари «золотник-корпус» забезпечує їх високу твердість, зносо- та корозійну стійкість, збереження стабільності розмірів та геометричної форми. Хімічний склад легуваної сталі та сірого чавуну представлений у таблицях 1.2 та 1.3.

Таблиця 1.2 - Хімічний склад сталі 9ХС ГОСТ 5950-2000%

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	W	V	Ti	Cu
0,85... 0,95	1,2... 1,6	0,3... 0,6	До 0,35	До 0,03	До 0,03	0,95... 1,25	До 0,2	До 0,2	До 0,15	До 0,03	До 0,3

Таблиця 1.3 - Хімічний склад сірого чавуну СЧ 21-40 ГОСТ 1412-85%

C	Si	Mn	P	S
3,3...3,5	1,4...2,2	0,7...1,0	0,2	0,15

Тиск робочої рідини у гідророзподільниках у процесі роботи зростає до 18 МПа, температура – до 60 °С. Через забрудненість робочої рідини абразивом деталі розподільників відносять гідроабразивне зношування. У зв'язку зі специфічними умовами роботи золотників пред'являють підвищені вимоги до стабільності їх розмірів, високої термо- та зносостійкості робочих поверхонь, міцності. Виконання цих вимог досягають за допомогою різних видів термічної обробки (азотування, ціанування, цементації, загартування, відпуски, нормалізації та ін.) [13].

Золотники в процесі виготовлення піддаються або цементації, або нітроцементації на глибину 700 ... 1500 мкм з наступним загартуванням і відпуском (HRC57-64).

*Цементація* полягає в насиченні поверхневого шару мартенситової сталі вуглецем з метою підвищення твердості, зносостійкості та отримання в'язкої серцевини. Цементація відбувається за нормальної температури 800...900 °С [8].

Твердість сталі після цементації досягає HRC56-60. Термічна обробка після цементації зазвичай полягає у подвійному загартуванні та відпуску [2].

*Нітроцементація, або газове ціанування*, проводиться в газовому середовищі, що складається з газів, що цементують і нітрує. При високотемпературній нітроцементації глибина шару за час витримки 6-7 год виходить близько 1,8 мм [2, 14].

В результаті ціанування поверхневий шар сталевих виробів одночасно - містить і вуглець (0,4-0,8%), і азот (0,5-0,8%). Твердість такого шару дуже висока - HRC58-64 [22].

Перевагами ціанування в порівнянні з цементацією є велика швидкість процесу та значний зміцнювальний ефект.

В даний час існують наступні режими термічної обробки золотників:

- загартування ТВЧ при температурі 1040 °С;

- Відпустка з нагріванням ТВЧ до  $700 \pm 10$  °С.

Робочі пояски золотника обробляють до шорсткості  $Ra = 0,32$  мкм та діаметра  $25^{+0,068}_{-0,012}$ . У середині допуску вони діляться на 20 розмірних груп через кожні 4 мкм. Високі вимоги висувають до геометричної форми. Так, відхилення від округлості має бути трохи більше 4 мкм.

Таким чином, до матеріалу для виготовлення золотників, його термообробки, точності геометричних параметрів поверхонь деталей розподільника, що труться, а також до їх якісної збірки пред'являються дуже високі вимоги. Все це, а також величину і характер зношування в процесі експлуатації розподільників, необхідно враховувати при розробці технологічного процесу відновлення та зміцнення сполучення «золотник - корпус».

## 1.2 Аналіз причин зносу золотникових пар

Основні причини зносу прецизійних пар визначаються умовами та особливостями експлуатації гідророзподільників. Золотникові пари є ідеальними циліндрами, оскільки з-поміж них існує зазор, має конусоподібний вид [63]. Під дією тиску робочої рідини, що проходить через цю щілину при роботі гідророзподільника, рухома деталь притискається до нерухомої, що є причиною інтенсивного зносу. Інша його причина – технологічні фактори виготовлення гідророзподільника [22]. Крім того, знос збільшують абразивні частинки, що містяться в робочій рідині (механічні домішки). Дослідження [65] показують, що при вмісті механічних домішок у робочій рідині до 0,2% інтенсивність зносу золотника зростає в 28 разів, причому золотник зношується швидше корпусу в 1,7 рази.

Зношування прецизійної пари "золотник - корпус" - основний показник, від якого залежить нормальна робота гідророзподільника. Як показують дослідження [44, 56], робочі пояски золотника зношуються нерівномірно за довжиною. Достатньо повно характер зносу золотникових пар представлений у дослідженнях Н.С. Мясоїдова [63] (таблиця 1.4).

Епюри середнього радіального зносу золотника та отвори корпусу по окремих поясах виміру представлені на рисунках 1.2 та 1.3.

Таблиця 1.4 - Показники зносу золотникової пари

Показник	Номер пояса виміру												Середнє значення
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Знос пояса золотника, мкм	3,5	6,1	5,2	3,2	4,6	4,0	6,7	7,7	11,3	7,5	4,7	7,5	6,1
Зношування отвору корпусу, мкм	7,7	6,2	12,2	5,3	5,5	7,1	5	4,8	4,2	18,1	5,8	7,8	7,9

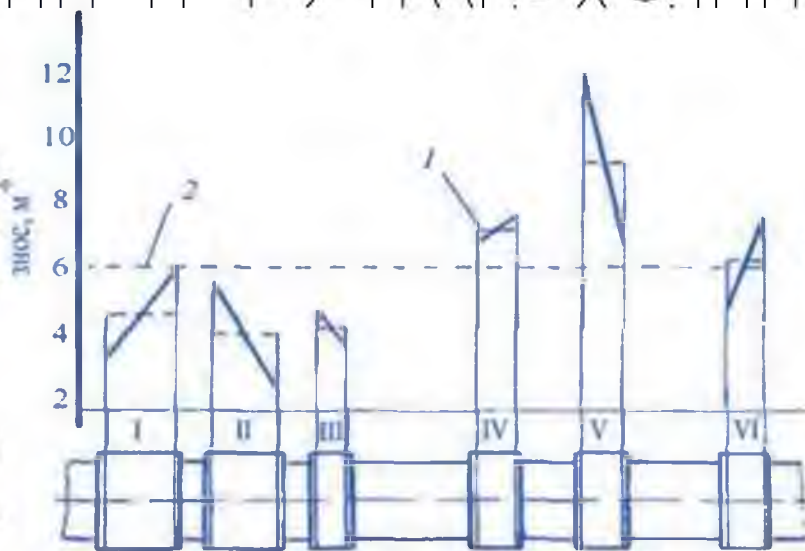


Рисунок 1.2 - Епюра радіального зносу поясів ущільнювачів золотника.

I - VI - пояси ущільнювача;

1 - середній знос поясів; 2 - середній знос золотника

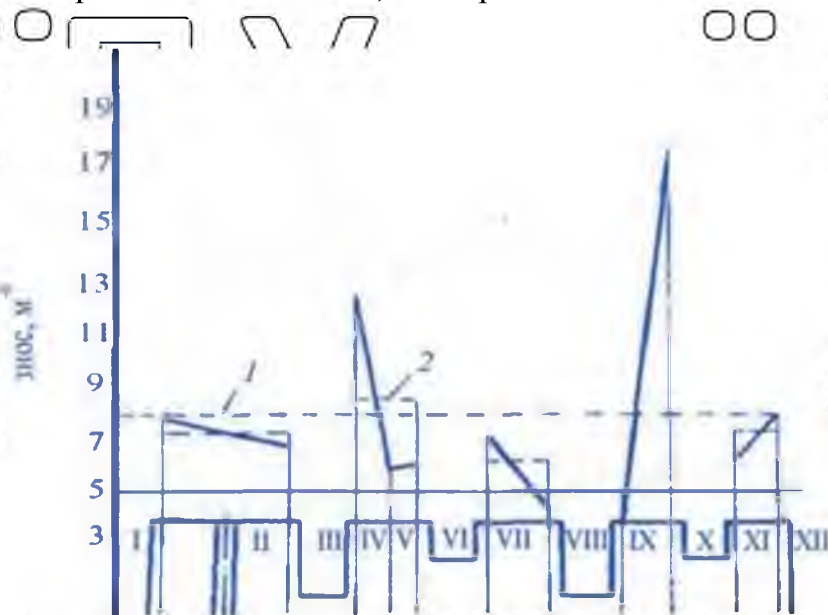


Рисунок 1.3 - Епюра радіального зносу отворів корпусу:

X - XII - пояси вимірів

1 - середній знос отворів корпусу; 2 - середній знос отвору

Аналіз таблиці 1.4 дозволяє помітити, що знос поясків золотника та отворів у корпусі нерівномірний у поздовжньому та поперечному перерізах.

Деякі дослідники стверджують, що у поясків золотника спостерігається ступінчасте зношування [100]. Величина шабл на окремих поясках досягає 0,01 ... 0,02 мм, а величина некруглості - 0,012 ... 0,019 мм [100].

Ознакою, яким вибракуються золотники, є зменшення діаметра ущільнювальних поясків до 24,988 мм. Корпус розподільника вибракують при зношуванні отвору до 25,060 мм [96].

Переважає вид зносу золотникової пари гідророзподільника – гідроабразивний. Викликає його забруднювач, що міститься в робочій рідині, основна фізична характеристика якого — твердість і розмір частинок.

Дослідження [100] показують, що знос сполучення «золотник - корпус» відбувається в основному через мінеральні частинки, що входять до складу забруднювача. Вивчення мінеральних частинок [14] дозволило встановити, що вони на 90% складаються з кварцу, польового шпату та оксидів металів ( $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $ZnO$  та ін.). Мікротвердість таких абразивних частинок досить висока : 12000... 13000 МПа - у оксиду алюмінію, 10300... 11000 МПа - у кварцу [13, 14].

Мікротвердість робочих поверхонь поясків золотника нижче – 9000... 10000 МПа. Стає очевидною причина абразивного зносу поясків золотника. Забруднення робочої рідини домішками при експлуатації, вміст яких коливається від 0,01 до 0,44 % за масою і більше [100], прискорює знос деталей.

Наявність абразивних частинок у робочій рідині та висока швидкість руху олії щодо поверхонь деталей визначають їх гідроабразивний знос внаслідок затискання частинок у зазорі. Тверді частинки, потрапляючи в зазор між поверхнями, що труться, ковзають пар агрегатів, викликають не тільки підвищений знос, але і збільшують силу тертя, а в деяких випадках викликають заклинювання деталей.

Гідроабразивний знос є процесом спільного дії абразивних частинок і рідини, що несе ці частинки. Зношування відбувається в результаті зрізання мікростружок з поверхні, вибивання окремих її частинок, вимивання мікроскопічних обсягів [37, 42].

У більшості робіт вказується [38, 42], що абразивне зношування поверхонь внаслідок затискання частинок у зазорі відбувається в тому випадку, коли розмір абразивних частинок співмірний з зазором між поверхнями, що сполучаються. Частинки заклинюються в зазорі, впроваджуються в одну з поверхонь і діють подібно до різця. На поверхнях, що труться, є великі ризиви, спрямовані паралельно руху.

Зовнішній вигляд зношеної поверхні пояска золотника представлений на

рис. 1.4, а, б. Зношена частина збігається з величиною перекриття поясом - золотника отвору корпусу в положенні «спідлом». Така поверхня пояса має матове забарвлення, видно подряпини, сліди схоплювання поверхонь.



а



Рисунок 1.4 - Зовнішній вигляд поверхні зношеного пояса золотника (а) та області А (x100) (б)

Дрібні та сугірні із зазором абразивні частинки протягуються між поверхнями пояса і отвори в корпусі маслом, що рухається, і за рахунок цього руху наносять подряпини на поверхнях як золотника так і отвори в корпусі. Великі частинки, потрапляючи в зазор спелучення «золотник - корпус»,

защемляються, що призводить до появи на робочих поверхнях золотникової пари глибоких борозен (див. рисунок 1.4, б).

Крім абразивних частинок в маслі присутня вода, яка сприяє утворенню слабких і сильних електролітів водорозчинних кислот, що є найбільш активними реагентами електрохімічної корозії [92]. Вода та розчинені в ній речовини викликають сильну корозію деталей гідравлічної системи і призводять до додаткового засмічення робочої рідини продуктами корозії, відкладення їх на стінках баків, маслопроводів, потрапляння в зазори прецизійних деталей [4, 93].

Таким чином, причини зношування прецизійних пар гідророзподільника – спотворення їх геометричної форми при виготовленні та гідроабразивне зношування при експлуатації.

Описані характер і механізм зношування поясків золотника дозволяють - зробити висновок про те, що знос деталей золотникових пар носить складний гідроабразивний характер. У середньому золотник зношується в 1,5-2 рази швидше [100], ніж корпус. Розмір його зносу становить 80 мкм. Тому для відновлення працездатності золотникових пар при їх ремонті необхідно на поверхні поясків золотника створити шар товщиною не менше 100 мкм (враховуючи максимальну величину зносу золотника і від версій корпусу, а також припуск на механічну обробку), що має достатню мікротвердість і високу корозійну стійкість.

### **1.3 Аналіз способів відновлення та зміцнення деталей золотникових пар**

Існує велика кількість способів відновлення та зміцнення деталей машин, за допомогою яких можна підвищити зносостійкість з напруг (рисунок 1.5) [36, 47, 60]. Подана схема складена на основі аналітичного огляду таких методів, як обробка різанням, обробка поверхні пластичним деформуванням, термічна та хіміко термічна обробка, електронно-іонна обробка, нанесення зносостійких - покриттів, наплавлення.

В даний час у ремонтному виробництві використовують такі способи відновлення золотникових пар гідророзподільників типу P80:

- пластичне деформування;
- газова та дугова наплавка;
- напилення порошків та металів;
- гальванічні покриття.

#### **1.3.1 Способи відновлення корпусу гідророзподільника**

Корпус гідророзподільника виготовляють із сірого чавуну СЧ 21-40 ГОСТ 1412-85 твердістю HB 170-240. У процесі експлуатації поряд з механічними пошкодженнями, такими як тріщини, вибоїни, змінання різьблення,

відбувається знос отворів під золотники. За відсутності механічних пошкоджень знос отворів - основна ознака вибракування корпусу.

Відомі такі технологічні процеси відновлення корпусів [100]:

1. За наявності ремонтного фонду та незначного (менше  $25^{+0,09} \cdot 10^{-3}$  м) зносу отворів зазор у поєднанні відновлюється шляхом перекомплектування з наступним притиранням.

2. При значному ( $25^{+0,09} \cdot 10^{-3}$  м і більше) зносі отворів зазор у поєднанні - відновлюють [49]:

- Розточування;
- Розгортанням з притиранням;
- Алмазним хонінгуванням.

Дані способи передбачають установку у збільшені діаметри отворів корпусу золотників наступних розмірних груп або ремонтного розміру. Для розточування отворів з наступним притиранням характерним є досить великий розкид діаметрів, що часто виходять за регламентовані розмірні групи.

Розгортання отворів знижує, порівняно з розточуванням, поле розсіяння - розмірів приблизно в 2 рази. При одночасному поліпшенні геометрії отвору параметр шорсткості обробленої поверхні відповідає  $Ra = 1,15$  [100]. Наступне притирання знижує шорсткість обробленої поверхні до  $Ra = 0,15$ , але збільшує поле розсіювання діаметрів в 1,5 рази, при цьому іноді погіршується геометрія отвору корпусу [49].

Найбільш повно технічним вимогам на виготовлення та відновлення - отворів корпусів задовольняє алмазне хонінгування, в результаті цієї операції шорсткість обробленої поверхні становить  $Ra = 0,04$ . Згідно з дослідженнями [25], при алмазному хонінгуванні немає необхідності в попередньому виправленні геометрії зношених отворів. Діапазон розсіювання діаметрів скорочується в 1,5 рази, а розсіювання овальності та конусності - у 2 рази. Таким чином, алмазне хонінгування більшістю дослідників [25, 100] рекомендується як найбільш оптимальна операція при відновленні отворів корпусів гідророзподільників.

### 1.3.2 Способи відновлення золотника гідророзподільника

Відновлення золотників нині виробляється переважно наступними методами:

- перекомплектування;
- пластичним деформуванням;
- газовою та дуговою наплавкою;
- напиленням порошків та металів;
- застосуванням гальванічних покриттів (хромування, заліщення);

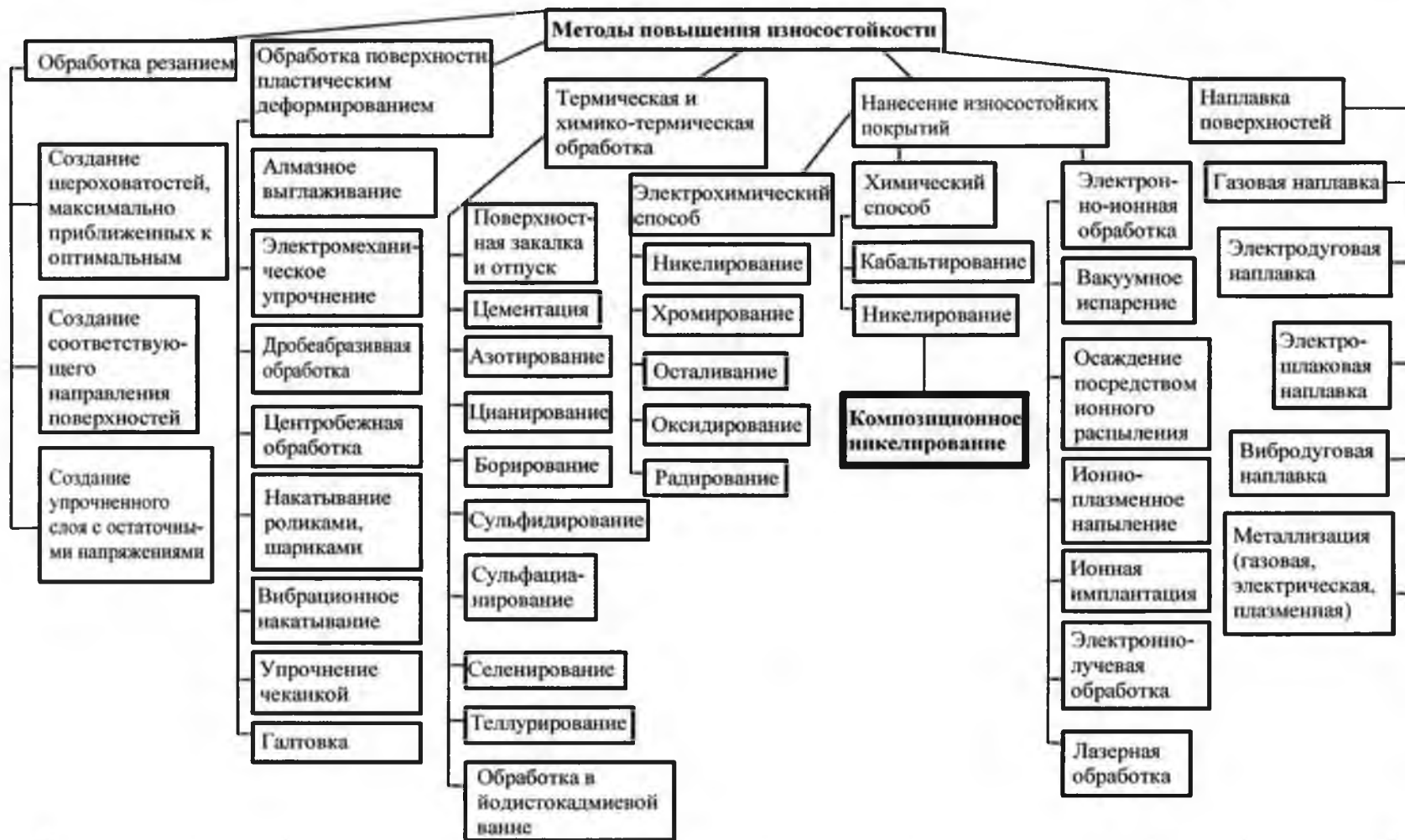


Рисунок 1.5 – Схема методов підвищення зносостійкості деталей машин

*Відновлення методом перекомплектування* полягає в притиранні, сортуванні на групи, підборі та взаємному притиранні сполучення «золотник-корпус» [88].

Золотники притирають на верстаті з притирання з використанням притиральної пасти М10. Режими притирання наступні: тривалість роботи паст при одному накладенні 60 с; частота обертання деталі або притира 250 хв<sup>-1</sup>; число подвійних ходів деталі або притиру 100...150 хв вихід притиру за межі обробки золотника 10...12 мм; початковий тиск на притир 0,1 ... 0,2 Па [44]. Остаточне притирання виконують іншим при тиром із застосуванням пасти М3 при тих же режимах.

Після притирання певної кількості деталей їх заміряють мікрометром, сортують на розмірні групи і підбирають у пари так, щоб золотник зусиллям руки входив у корпус на 1/3 довжини. Потім протягом 1-2 хв деталі притирають один до одного при частоті обертання золотника 100 ... 150 хв<sup>-1</sup> і число подвійних ходів 80 ... 100 хв<sup>-1</sup> [44].

Таким методом можна відновити лише 10-15 % усіх деталей ремонтного фонду, придатних для відновлення [13].

*Пластичне деформування* засноване на здатності металів змінювати свою форму та розміри без руйнування під дією навантаження за рахунок залишкової (пластичної) деформації [35]. При пластичній деформації об'єм деталі залишається без змін, переміщується лише метал з однієї ділянки на іншу.

В основу способу покладено принципи обробки металів тиском, розроблені С. І. Губкіним, Є. П. Унксов та ін [36, 97]. Попереднє нагрівання деталей до температури 700... 1200 °С здійснюється в прохідній печі опору.

Пластична деформація металу відбувається внаслідок зсувів цілих зерен металу. У зв'язку з тим, що при нагріванні деталей відбувається зміна структури та механічних властивостей металу, деталі після відновлення необхідно піддавати термічній обробці.

Недоліки цього методу - застосування складного обладнання, утворення окалини, внутрішніх залишкових напруг на поверхні золотника, високий відсоток шлюбу та енергоємність процесу.

*Газове та дугове наплавлення.* Способи наплавлення використовуються для виконання ремонтних робіт, а також при виготовленні біметалічних виробів в умовах індивідуального, дрібносерійного та серійного виробництва [28]. До характерних недоліків цих видів зварювання та наплавлення відносяться: низька продуктивність, важкі умови праці, непостійна якість наплавленого шару, що залежить від індивідуальної майстерності працівника, незадовільний захист металу, що плакує, від повітря [7, 26].

Високопродуктивні автоматичні процеси дугового наплавлення (вібродугова з різним захистом дуги, під флюсом дротом і стрічкою, серед захисних газів), а також самозахисним дротом і стрічкою і т.д.) позбавлені зазначених недоліків і широко застосовуються як для відновлення зношених деталей машин, так і та при їх виготовленні.

Недоліками всіх перерахованих способів дугового наплавлення є: значне проплавлення і перемішування основного та плакуючого металів, складність якісного замикання зварного шва при наплавленні кільцевих деталей.

*Напилення металів та порошоків.* У ремонтному виробництві та машинобудуванні в останні роки широкого поширення набули способи напилювання металів і порошоків на поверхню виробу з метою відновлення та одночасно забезпечення їх спеціальних властивостей [18, 12]. До найбільш перспективних способів відносяться дугове, плазмове, газопорошкове і детонаційне напилення [13].

Електродугове напилення не вимагає застосування складного технологічного обладнання. Підбиранням дротів можна забезпечити необхідний хімічний склад шару. Цей спосіб досить продуктивний. При силі струму 750 сталеве покриття утворюється зі швидкістю 36 кг/год. До його недоліків відноситься перегрів і окислення напилюваного матеріалу при малих швидкостях подачі дроту, що розпилюється. Крім того, велика кількість теплоти, що виділяється при горінні дуги, призводить до вигорання легучих елементів. Застосування цього методу ефективно при значних площах, що покриваються на масивних деталях [11, 13]. Основними недоліками його є слабка адгезія нанесеного шару, висока пористість покриття та ін.

Плазмове напилення [11, 12] в порівнянні з дуговим має ряд важливих переваг. Наприклад, можна регулювати температуру та швидкість плазмового струменя шляхом підбору конструкції плазмотрона та режимів напилення. Це розширює діапазон матеріалів, що напилюються (метали, кераміка і органіка).

Покриття виходять досить щільними та з гарним зчепленням з основою. Однак порівняно низька продуктивність, шум, інтенсивне ультрафіолетове випромінювання та складне технологічне обладнання - недоліки, які дотепер не усунуті.

Детонаційне напилення здійснюється за допомогою спеціальної установки - гармати, куди подається порошок, що напилюється, і вибухова суміш (кисень і ацетилен), яка підпалюється іскрою. Висока швидкість руху і сильний розігрів частинок забезпечують отримання досить щільного та міцного покриття. Однак напилення можна наносити тільки на ті вироби, які не будуть деформуватися від ударної хвилі. Через шум (до 140 дБ) обладнання встановлюють у камері з подвійними стінами, а спостереження здійснюється через оглядове вікно [27, 29].

До недоліків можна віднести те, що спосіб є низькопродуктивним і за показниками ергономіки практично не використовується в машинобудуванні та ремонтному виробництві.

Гальванічні покриття при відновленні золотників наносяться двома способами: залізнення та хромування. У зв'язку з тим, що електро хімічний еквівалент заліза дорівнює 1,042 г/А-год, а хрому 0,324 г/А-год, вихід струму при залізненні в 3-5 разів більше, ніж при хромуванні, тому за цим показником залізнення є більш продуктивним та економічним способом відновлення зношених робочих поясків золотників. Крім того, при залізненні можна отримати величину шару покриття до  $1 \cdot 10^{-3}$  м з вихідною твердістю до HRC 54-55 [58, 78].

Останнім часом найбільш поширений спосіб залізнення в гарячих хлористих електролитах, при якому температура електроліту досягає 70 ... 90 °С [58, 78].

Процес залишання в гарячих хлористих електролитах досить добре висвітлений у літературі [58, 75]. Разом з тим, спосіб залізнення має ряд недоліків, що обмежують його застосування. Наприклад, складність підтримки робочого режиму, незначне відхилення від якого обумовлює появу на покритті тріщин, що зменшує міцнісні якості нанесеного покриття, втрату міцності і як наслідок - знижує ресурс відновленого золотника. Крім того, у тріщинах накопичується абразив, який посилює знос ущільнювальних поясків золотника та отвори корпусу. Важливе значення має підтримка стабільності складу електроліту. Зміни в режимі залишення та складі електроліту призводить до появи дендритів по краях робочих поясків, що різко знижує їх здатність до швидкого і чіткого відсікання потоку робочої рідини і може призвести до заклинювання золотника в корпусі.

На відміну від залізнення спосіб відновлення хромуванням дозволяє отримати покриття, що перевищує за зносними показниками серійний золотник. Це досягається за рахунок застосування електролітів, основним компонентом яких є хромовий ангідрид. Хромові електроліти є розчинами хромової кислоти ( $H_2CrO_4$ ), що утворюється при розчиненні хромового ангідриду ( $CrO_3$ ) у воді. Для виділення хрому на катоді, яким є деталь, в розчин потрібно додавати сірчану кислоту ( $H_2SO_4$ ). При цьому найбільш якісні опади хрому і найбільший його вихід по струму будуть при співвідношенні  $CrO_3 : H_2SO_4 = 1 : 100$ . Для отримання покриття на основі хрому можливе застосування наступних електролітів, г/л: універсального ( $CrO_3 - 250, H_2SO_4 - 2,5$ ), тетрахроматного ( $CrO_3 - 450, NaOH - 70, MgSO_4 - 2,5, H_2SO_4 - 5, глюкоза - 2$ ), саморегулюючого сульфатного ( $CrO_3 - 250, SrSO_4 - 0$ ), саморегулюючого сульфатно-кремнефторидного ( $CrO_3 - 250, SrSO_4 - 6, K_2 SiF_6$ ) [5, 70]. Залежно від концентрації

та температури хромового електроліту. Матові покриття характеризуються високою мікротвердістю (9000...10000 МПа), але відрізняються крихкістю і невисокою зносостійкістю. Блискучі мають високу мікротвердість (7000...9000 МПа) і зносостійкість, ніж матових, але все ж таки значна. У молодших покриттів мікротвердість менше (4000...7000 МПа), ніж у блискучих, але вони досить пластичні і зносостійкі.

1. Утворення поверхні хромового покриття сітки тріщин при товщині шару 0,01 мм.
2. Недостатньо міцне зчеплення нанесеного покриття з основним металом.
3. Досить дорогі - очисні пристрої, які дозволяють довести вміст хрому в стічних водах та інших відходах до необхідного (безпечного для навколишнього середовища) рівня.

4. Виникнення дендритів на краях та кромках деталі, що ускладнює подальшу механічну обробку.

Особливий інтерес представляє спосіб відновлення деталей хімічним нікелюванням, яке полягає в тому, що за певних умов нікель з розчину осідає на сталеву поверхню без пропускання електричного струму [25].

При хімічному нікелюванні покриття наносять на деталь у водному розчині, основними компонентами якого є солі нікелю, гіпофосфіт натрію та оцтовокислий натрій. Процес йде в розчині при температурі 90...94 °С без застосування електричного струму.

Оскільки в розчині для хімічного нікелювання завжди присутня гіпофосфіт натрію, одночасно з нікелем з розчину на поверхню осаджується фосфор. Фосфор, що потрапляє в покриття, підвищує його мікротвердість до HV 400. Після нагрівання до температури 400 °С і витримки при цій температурі протягом 1 години мікротвердість покриття підвищується до HV 600 [22].

Нікель-фосфорне покриття завдяки своїй високій мікротвердості, дрібнодисперсності, хорошій теплопровідності та теплостійкості має високий опір зносу в умовах граничного мастила. Діяльність [26] встановлено, що зносостійкість нікелевого покриття часом у 1,5 - 2 рази вище, ніж хромового.

В даний час існують технології, що дозволяють наносити кель-фосфорні покриття товщиною до 150-200 мкм.

Застосування хімічного нікелювання, на відміну від інших методів, дає можливість без будь-яких спеціальних пристроїв, що екранують, наносити рівномірні по товщині зносостійкі покриття на деталі складної конфігурації.

Оскільки хімічне нікелювання здійснюється без електролізу, для організації даного процесу не потрібно спеціального електротехнічного обладнання, обов'язкового для гальванічних цехів. Крім того, коефіцієнт завантаження ванн для хімічного нікелювання у кілька разів більший, ніж

електролітичних. Тобто за однакової виробничої програми для організації процесу хімічного нікелювання потрібні значно менші виробничі площі, ніж для гальванічних цехів. Однак, незважаючи на цінні властивості, хімічне покриття нікелю не завжди відповідає вимогам відновлення деталей.

В останні роки успішно розвивається технологія осадження композиційних хімічних покриттів (КХП). Суть методу полягає в тому, що разом з металом із розчинів на деталі осаджуються дисперсні частинки, волокна та вуса різних карбідів, боридів, оксидів, сульфідів, порошків полімерів тощо.

Включення дисперсних матеріалів покращують фізико-механічні властивості одержуваних покриттів і, головне, у кілька разів збільшують їх зносостійкість, антифрикційні характеристики, термічну та корозійну стійкість, що створює передумови для застосування даного способу при відновленні деталей [5].

Таким чином, проведений аналіз літератури показав, що існуючі способи відновлення і зміцнення зношених прецизійних деталей мають певні недоліки, внаслідок чого потрібна їхня модернізація. Особливий інтерес становить спосіб відновлення деталей гідророзподільників хімічним нікелюванням. Він відносно не складний, малотрудомісткий, а також проходить за низьких температур, що виключає появу короблення деталей. Крім того, застосування різних дисперсних порошків при хімічному нікелюванні дозволяє отримувати покриття з поліпшеними фізико-механічними властивостями, такими як мікротвердість, зносо- і корозіостійкість та ін.

#### 1.4 Композиційне хімічне нікелювання – спосіб відновлення працездатності золотників-гідророзподільників

Композиційні хімічні покриття є осадами, до складу яких входять різні сторонні включення.

Перші пошукові роботи з розробки технології отримання композиційних покриттів були проведені Ю. В. Баймаковим у 1925 р. [9], який виявив можливість спільного осадження електролітичних опадів заліза з включенням графіту до 1%. Дещо пізніше І. Принц і Дж. Фінк [107] отримали електролітичний осад міді з графітом. Однак перші дослідження у цьому напрямі не знайшли практичного застосування. Лише в 60-х роках метод спільного осадження металів і дрібнодисперсних твердих частинок знайшов практичне застосування для отримання алмазних інструментів.

Всебічні дослідження композиційних покриттів на основі електролітичного заліза з включенням частинок  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MoS}_2$  та ін. були проведені Ю. Н. Петровим, Ф. С. Ансєв, Г. В. Гуряновим та іншими дослідниками [39, 75, 106]. Ними встановлено, що зі збільшенням кількості

включень  $Al_2O_3$  та  $MoS_2$  знижується тріщинуватість покриттів, збільшується пластичність, зникає шаруватість, зростають внутрішні напруги першого роду, а також відбувається значна зміна фізико-механічних властивостей опадів. Введення в електроліт залізного карбід бору сприяло зменшенню наводнених опадів в 1,4-1,6 рази, а введення дисульфиду молібдену - в 1,2-2,4 рази. Авторами також виявлено, що наявність частинок порошку в електролітичних опадах заліза не впливає на втомну міцність покриття, а зносостійкість композиційних залізних опадів в 2-20 разів вище зносостійкості чистого заліза.

Дослідженнями Л. І. Антропова та Ю.М. Лебединського [5, 52, 53] встановлено вплив твердих частинок різних матеріалів на фізико-механічні властивості композиційних покриттів на основі нікелю. Ними виявлено, що формування цих покриттів із включенням в осад оксидів, карбідів та інших матеріалів істотно залежить від розміру та фізико-механічних властивостей частинок (щільності, електропровідності, величини та знаку заряду), режиму перемішування та хімічного складу електроліту, а також режиму електролізу. Також показано, що зносостійкість, мікротвердість та корозійна стійкість електролітичних покриттів нікелю з включенням карбідів і оксидів значно перевершують відповідні властивості покриттів нікелю без включень.

Дослідниками В. Ф. Молчановим, Ф. А. Аюповим, В. А. Вандишевим, В. М. Дзицкоком, Ю. М. Лебединський та ін [19, 52, 61], починаючи з 1962 р., були проведені роботи з удосконалення процесу хромування, особливо по боротьбі з розтравлюванням (катодною корозією), що спостерігається в процесі електролізу. Ними ж у 1964 р. було розпочато роботи з дослідження можливості отримання композиційних покриттів на основі хрому. У 1966 р. були розроблені заходи щодо вдосконалення процесу хромування в сульфатно-кремнефторидному електроліті, що саморегулюється. В даний час існує цілий ряд технологій одержання композиційних хромових покриттів із заданими фізико механічними властивостями.

У роботах [15, 18] зазначено, що композиційне гальванічне покриття (КГП) на основі хрому може бути отримане із застосуванням різних за природою матеріалів. Призначення дисперсних матеріалів полягає у наданні КГП цінних властивостей, не притаманних металу покриття. Вплив їх на метал може бути різноманітним.

Узагальнені дані щодо дисперсних матеріалів, що покращують фізико-механічні властивості покриттів, отриманих гальванічним методом, представлені в таблиці 1.5.

При введенні інертних порошкоподібних речовин у розчини хімічного нікелювання стає можливим спільне осадження металу і частинок, що знаходяться в розчині, що також призводить до корисної зміни властивостей

вихідних металевих покриттів.

Як дисперсну фазу в композиційних нікель-фосфорних покриттях (КНФП) використовують різні порошкоподібні матеріали.

Властивості основних дисперсних матеріалів, що застосовуються для отримання композиційних хімічних покриттів, представлені в таблиці 1.6.

В даний час більш детально досліджено осадження КНФП, в яких другу фазу представляє оксид алюмінію, двоокис титану, двоокис цирконію, карбід кремнію, нітрид кремнію, оксид хрому [5].

Таблиця 1.5 - Дисперсні матеріали, що впливають на властивості гальванічних покриттів

Властивості покриття	Дисперсні матеріали
Твердість та зносостійкість	$Al_2O_3$ , WC, $ZrO_2$ , TiC, $HfB_2$ , $ZrB_2$ , $B_4C$ , BN, B, $Cr_3B_2$ , ZrC, $TiO_2$ , $CeO_2$ , TaC, $WS_2$ , алмаз
Зносостійкість в умовах сухого тертя і підвищених температур	$Al_2O_3$ , $TiB_2$ , SiC, C
Жаростійкість	$Al_2O_3$ , $SiO_2$ , C, B, $B_4C$ , $ZrO_2$
Корозійна стійкість	Аморфний бір, каолін, $ZrB_2$ , $Al_2O_3$ , SiC
Антифрикційність	Аморфний бір, $CuF_2$ , WC, $MoS_2$ , BN, $BaSO_4$ , ПВХ, ПЕ, політитанат кальцію
Термостійкість	Окиси, карбіди
Пористість	Карбонільний нікель
Самозмазування	Фторований графіт, графіт, $MoS_2$ , BN, $WS_2$ , слюда, $CaF_2$
Теплопровідність	Політетрафторетилен
Ерозійна стійкість	Карбіди
Міцність	$Al_2O_3$ , SiC
Опір schoплювання	Аморфний бір

Є відомості про застосування для цієї мети алмазів, нітриду бору, дисульфиду молібдену, графіту, срібла, бору [37, 86], волокнистих наповнювачів [37]. Практичний інтерес представляє той факт, що при хімічному нікельуванні із суспензій у покриття впроваджується значно більша кількість частинок, ніж у разі гальванічного осадження, при одних і тих же концентраціях суспензії [37]. І за структурою КНФП відрізняються від гальванічних більш рівномірним розподілом частинок дисперсної фази в матриці [23, 46].

Із запровадженням наповнювача змінюється щільність покриття. Наприклад, у роботах [10, 11] наводяться дані: щільність хімічно обложеного нікелю з вмістом фосфору 9,1-9,8% за масою становить 7,8-8,1 г/см<sup>3</sup>; щільність нікель-фосфорного покриття з додаванням оксиду алюмінію 7,5% масою - 7,7 г/см<sup>3</sup>; з додаванням оксиду титану 12% масою - 7,8 г/см<sup>3</sup>.

Таблиця 1.6 - Властивості дисперсних матеріалів, які застосовуються при нанесенні КХП

Матеріал	Щільність, г/см <sup>3</sup>	Температура плавлення, °С	Коефіцієнт - лінійного розширення, $\alpha \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$	Питома теплотемність, кДж/(кг·К)	Теплопро- відність, Вт/(м·К)	Електро- провідність, См/м	Мікро - твердість, ГПа
1	2	3	4	5	6	7	8
Алмаз	3,50	3500	0,9	0,50	120...163	$1 \cdot 10^{-10} \dots 1 \cdot 10^{-2}$	80
Аморфний вуглець	-	3500	5,0...28,0	0,70...1,10	2	$1,5 \cdot 10^{-4}$	-
Бор	2,32	2200	1,1...8,3	1,15	26	$1 \cdot 10^{-4}$	34
Графіт	2,20	3500	1,0...24,0	0,67	88...360	$(1,6 \dots 28,0) \cdot 10^{-4}$	0,5...0,7
Кремній	2,33	1415	2,3	0,50...0,80	82	$4 \cdot 10^{-2}$	12
Бориди TiB <sub>2</sub>	4,50	2980	4,6	0,90	25	$6 \cdot 10^6$	33,5
ZrB <sub>2</sub>	6,17	3040	5,9	0,54	25	$1 \cdot 10^7$	22,5
VB <sub>2</sub>	5,20	2400	7,6	0,67	42	$5 \cdot 10^6$	28
CrB <sub>2</sub>	5,60	2200	10,5	0,45	32	30	22
Карбіди B <sub>4</sub> C	2,52	2440	4,5	1,50	17...35	110	42...49
a-SiC	3,21	2150	4,5	1,76	45...150	770	21...29
TiC	4,90	3140	7,4...9,3	0,42	36	$1,8 \cdot 10^6$	18...32
ZrC	6,80	3540	6,8...7,5	0,42	31	$2 \cdot 10^6$	26
HfC	12,70	3880	5,2...6,5	0,21	16	$2,1 \cdot 10^6$	20...23
TaC	14,60	3900	4,6...6,6	0,17	23...29	$5 \cdot 10^5$	19
VC	5,80	2820	6,8	0,67	35	$6 \cdot 10^5$	21...28
WC	15,80	2770	5,1...7,2	0,17	-	$5 \cdot 10^6$	28...32

Продовження таблиці 1.6

1	2	3	4	5	6	7	8
Нітриди							
$\alpha$ - BN (пекс.)	2,29	2970	2,9	0,80	15...29	$1 \cdot 10^{-11}$	0,2...0,4
$\beta$ - BN (куб.)	3,48	-	-	-	90	$1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3}$	80
AlN	3,26	2400	4,0	0,84	29	$1 \cdot 10^{-8}$	12
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3,18	1900	2,7	1,05	7	$1 \cdot 10^{-12} \dots 1 \cdot 10^{-11}$	33
Оксиди BeO							
BeO	3,00	2550	5,5...10,3	0,84	13	$1 \cdot 10^{-7}$	10...15
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,84	460	-	0,92	-	$6 \cdot 10^{-4}$	-
$\gamma$ - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,20	1200	6,5...8,0	0,84	35	$1 \cdot 10^{-9}$	10...12
$\alpha$ - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,97	2050	-	0,92	40	$1 \cdot 10^{-14}$	20...27
SiO <sub>2</sub>	2,30	1650	7,5...13,7	0,74	10...12	$1 \cdot 10^{-12}$	7...12
TiO <sub>2</sub>	3,80	1870	10,0	0,63	5	300...800	8...19
ZrO <sub>2</sub>	5,60	2900	7,0...10,0	0,46	2	$1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3}$	16
ThO <sub>2</sub>	9,70	3050	9,0...11,0	0,25	11	$2 \cdot 10^{-12}$	7...11
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,15	2335	9,6	0,87	-	10	27...29
MgO	4,11	1927	-	-	-	-	-
Силіциди							
MoSi <sub>2</sub>	6,10	2100	8,7	0,46	52	$4, 6 \cdot 10^5$	12
NbSi <sub>2</sub>	5,66	2150	10,0	0,15	-	$1,9 \cdot 10^5$	11
TaSi <sub>2</sub>	8,83	2200	9,2	0,20	-	$2, 2 \cdot 10^5$	15
HfSi <sub>2</sub>	8,03	1800	8,2	-	16	-	9
WSi <sub>2</sub>	9,25	2160	6,2	0,15	47	$8 \cdot 10^5$	10

За даними, представленими в роботах [12] пористість КХП при введенні частинок практично не збільшується, а в деяких випадках навіть знижується. Так, КХП товщиною 10 мкм з додаванням карбїду титану були без-пористими, тоді як базове покриття тієї ж товщини мало пористість 25 пор/см<sup>2</sup>.

Розміри дисперсних частинок, що вводяться в розчини хїмічного нікелювання, складають від 1 до 100 мкм. Однак можна припустити, що застосування частинок малих розмірів оприятиме рівномірному їх розподїлу в покритті і забезпечуватиме достатнє зміцнення покриття та підвищення його фізико-механїчних властивостей. Таким чином, великий на вічний інтерес представляють дослідження, присвячені впливу добавок, що модифїкують, частинок з розмірами нанометрового діапазону, проте в літературних джерелах вони відсутні.

Однією з головних завдань створення композиційних покриттів є покращення їх фізико-механїчних властивостей. Численними дослідженнями - показано, що включення дисперсних наповнювачів у хїмічне покриття на основі нікелю в багатьох випадках призводить до суттєвого підвищення його мікротвердості та зносостійкості [23, 49, 64].

Мікротвердість КНФП може досягати значень, які в 1,5-2 рази більші, ніж у базового нікелевого покриття. Величина мікротвердості визначається в першу чергу природою дисперсної фази. Так, наприклад, використання карбїду кремнію підвищує мікротвердість до 700 МПа. Термообробка покриттів забезпечує додаткове підвищення їх мікротвердості в 1,5 рази, але при температурах вище 400...500 °С вона може знижуватися [112].

Спостерігається значне підвищення зносостійкості покриттів за рахунок застосування дисперсних частинок. Знос по масі нікелевого покриття з використанням карбїду кремнію в 3-4 рази, а карбїду бору в 4-5 разів менше, ніж у покриття без частинок [12].

Важливою фізико-механїчною властивістю хїмічного покриття є корозійна стійкість.

Дослідження корозійної стійкості КХП, що включають оксиди алюмінію, титану, цирконію, проведені авторами робіт [110-112]. Збільшення її спостерігається при підвищенні концентрації дисперсної фази до максимальних значень.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що для збільшення мікротвердості та корозійної стійкості хїмічного покриття на основі нікелю можна використовувати порошки оксидів алюмінію, титану, карбїду кремнію та ін. Однак для збільшення зносостійкості недостатньо підвищувати тільки мікротвердість, необхідно також покращувати антифрикційні характеристики покриття. Найкраще для цієї мети застосовувати недорогі дисперсні порошки

різних полімерів – тефлон, політетрафторетилен (різновид тефлону), політатанат калію.

У той же час у літературних джерелах відсутні відомості про сумісне застосування таких модифікаторів, як оксид алюмінію (для підвищення мікротвердості) і полімерний наповнювач політатанату калію (для поліпшення антифрикційних характеристик покриття).

Презизійні деталі гідророзподільників відносяться до відповідальних, від їх нормальної роботи значною мірою залежить довговічність гідророзподільника та машини загалом. Існуючі способи відновлення працездатності золотників гідророзподільників мають ряд істотних недоліків, тому розробка нової технології, позбавленої їх, є актуальним завданням.

Найбільш перспективні для відновлення працездатності золотників – КХП на основі нікелю. При нанесенні таких покриттів відсутня термічна дія на деталь, що призводить до її викривлення. Поліпшення фізико-механічних властивостей КХП при відновленні золотників дозволить суттєво підвищити ресурс сполучення. Крім того, не потрібні витрати на дороге обладнання, оскільки при нанесенні КХП можна використовувати обладнання гальванічних цехів, оскільки процес практично не відрізняється від стандартного хімічного нікелювання.

### 1.5 Мета та завдання досліджень

Мета цих досліджень - збільшення міжремонтного ресурсу автотракторних гідророзподільників шляхом розробки та застосування технологічного процесу відновлення та зміцнення золотників ультра- та нанокмпозиційним хімічним нікелюванням.

Відповідно до мети були поставлені такі завдання:

1. Вивчити причини відмов гідравлічних розподільників сільськогосподарської техніки та способи відновлення їх працездатності.

2. Теоретично обґрунтувати підвищення ресурсу золотників за рахунок нанесення ультра- та нанокмпозиційного хімічного покриття на основі нікелю та оптимальні режими його отримання.

3. Розробити технологію відновлення працездатності золотників гідророзподільників застосуванням ультра- та нанокмпозиційного хімічного покриття на основі нікелю та дослідити фізико-хімічні властивості отриманого покриття.

4. Провести стендові та експлуатаційні випробування гідророзподільників та визначити техніко-економічну ефективність розробленої технології відновлення їх працездатності.

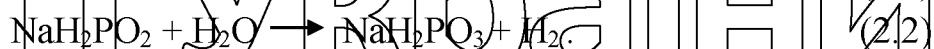
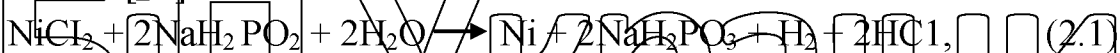
## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДО ОБГРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ЗМІНЕННЯ ЗОЛОТНИКІВ ГІДРОРОЗПОДІЛЬНИКА КОМПОЗИЦІЙНИМ ХІМІЧНИМ НІКЕЛЮВАННЯМ

### 2.1 Опис процесу утворення композиційних хімічних покриттів на основі нікелю

Для того щоб з'ясувати, чому відбувається зміщення робочих поверхонь золотників гідророзподільників композиційним нікелюванням, необхідно знати весь механізм процесу нікелювання.

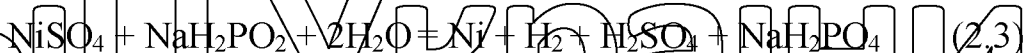
Ще в 1946 р. вченими було виявлено, що на сталевих зразках, занурених у гарячий розчин, що містить сіль нікелю і невелику кількість гіпофосфіту, осаджується покриття, зовні дуже схоже на нікелеві покриття, отримані електролітичним способом. Хімічний аналіз складу покриттів отриманих цим способом показав, що вони містять 96-97% нікелю та 3-4% фосфору [24]. Такі покриття нині називають нікель-фосфорними. Подальші дослідження виявили дуже складний характер реакцій, що протікають в даному процесі.

На початку вивчення процесу хімічного нікелювання, реакції протікають наступним чином [20]:



Причому реакція (2.2) вважається побічною. Однак ці рівняння не описують процес утворення фосфору та надходження його в покриття.

У роботах Горбунової В.П., Никифорової О.А. [28] схема процесу представлена рівнянням:

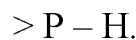
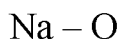


При розкладанні солей гіпофосфіту може виділятися фосфор у результаті реакції:



Як відновник нікелю при хімічному осадженні часто використовують гіпофосфіт натрію. Вибір відновника визначається, головним чином, природою металу, що осаджується.

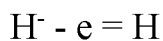
Графічну формулу гіпофосфіту ( $\text{NaH}_2\text{PO}_2$ ) можна подати таким чином:



Гіпофосфіту у розчині може дисоціювати за рівнянням:



Зв'язки P-O у молекулі гіпофосфіту сильно полярні, зв'язок P-H фактично неполярний, оскільки фосфор і водень мають однакові електронегативності рівні 2,1. Однак у літературі прийнято вважати водень у зв'язку з P-H гідридним. Гідрид іон H є сильним відновником:



У цій стадії утворюється атомарний водень. Він, у свою чергу, також є сильним відновником і в окислювально-відновних реакціях віддає свій електрон окислювачу ( $\text{H}^{\circ} = \text{H}^{+} + \text{e}$ ), якою можуть виступати, зокрема, катіони металів.

На думку інших авторів [76], сумарна реакція, представлена рівнянням (2.1), не відображає дійсного перебігу процесу, а виявляє лише кінцеві продукти реакції. Аналіз результатів досліджень механізму процесу хімічного нікелювання показує, що він є складнішим, ніж представлений наведеними рівняннями.

Для пояснення механізму цього процесу останніми роками було запропоновано кілька гіпотез [24]. Одна з них передбачає, що відновлення нікелю відбувається за рахунок утворення гальванічного елемента, в якому - анодом є водень, а катодом - метал, що покривається.

В іншій гіпотезі схема процесу представлена у вигляді багатоступінчастої реакції. Відновлення іона нікелю здійснюється шляхом отримання ним електрона з поверхні металу, тоді як передача електронів від гіпофосфіту до металу відбувається за рахунок радикалу BiH.

Тим не менш, на початкових стадіях кристалізація нікелю йде по - островковому механізму (рисунок 2.1) [104]. Острівці орієнтуються таким чином, що найбільш щільноупакована грань гранецентрованої кристалічної (ГЦК) решітки розташовується переважно паралельно поверхні катода, а в площині катода орієнтуються хаотично. Розміри острівців коливаються від 10 нм до 50 нм [104].

При збільшенні часу осадження острівці ростуть на щільно запакованій грані  $\langle 111 \rangle$  і з'єднуються один з одним [14].

Розглянемо утворення кристаліту, що складається з атомів А. Розташування атомів (А) у межі  $\langle 111 \rangle$  показано на рис. 2.2 а. Атоми після - дуючих шарів укладаються на трикутні порожнечі - «дірки». Якщо атоми спочатку займають позиції З, та був В, то будується ГЦК - грати з послідовністю атомних верств ABCABCABC... (рисунок 2.2 б) . Якщо атоми вкладаються в положення С (рисунок 2.2), то може утворитися дефект упаковки атомів.

Порушення послідовності упаковки атомних шарів призводить до утворення кристаліті області з новою орієнтуванням по відношенню до матриці. Ці області будуть площинними дефектами кристалічних ґрат.

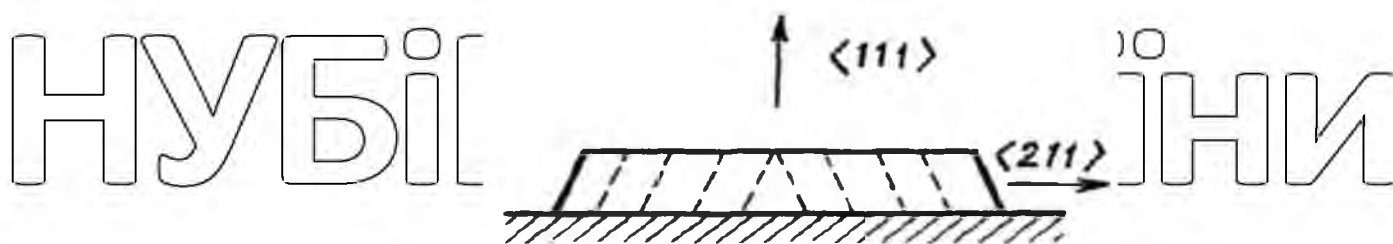
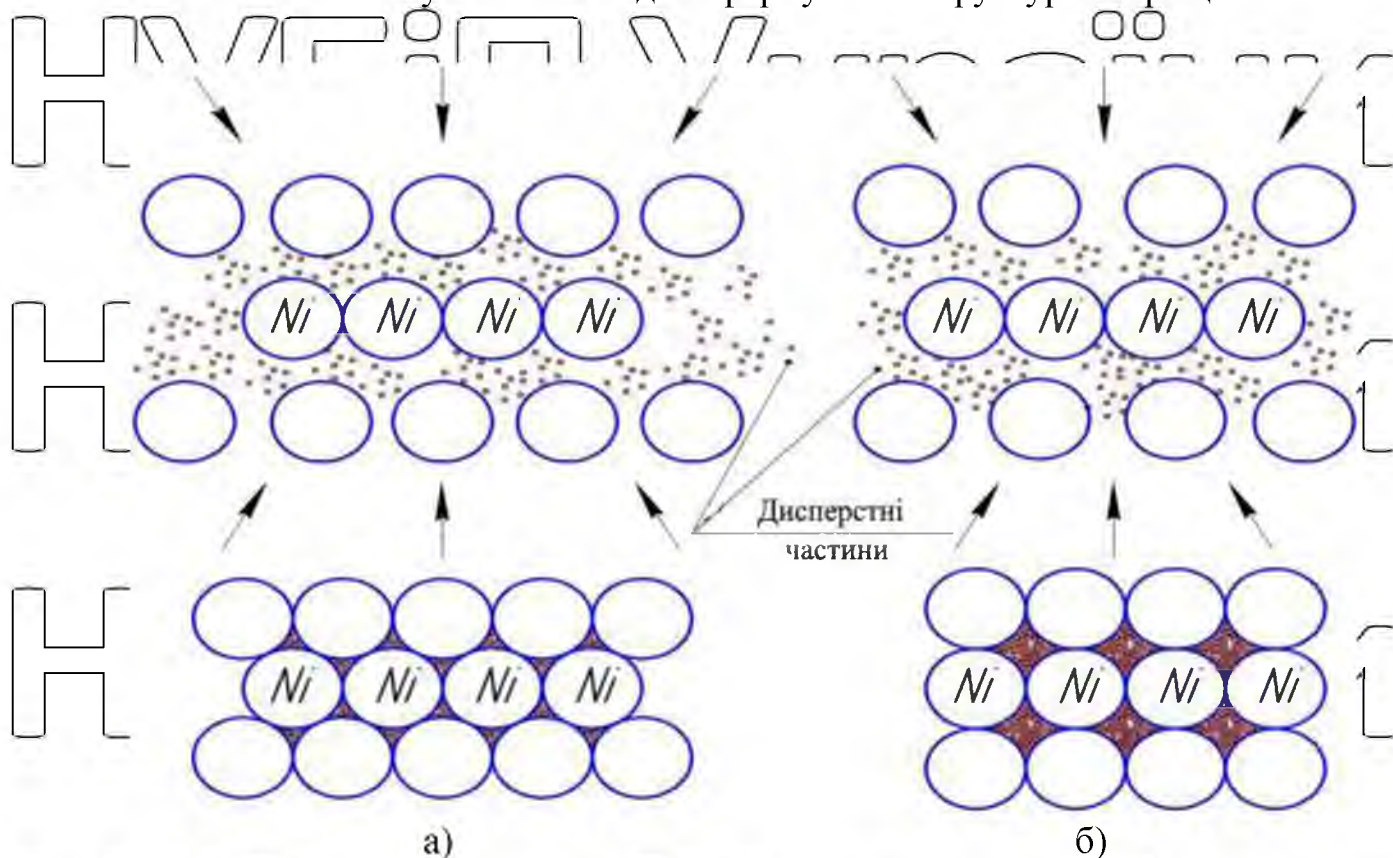


Рисунок 2.1 - Модель формування структури острівців

Рисунок 2.2 - Моделі розташування зерен  $Ni$  в кристалі в нормальному положенні (а) та дефектному (б)

При введенні порошкоподібних речовин у розчини хімічного нікелювання стає можливим спільне осадження металу та частинок, що знаходяться в розчині, тобто. формування композиційних покриттів, що призводить до зміни властивостей вихідних покриттів.

Можна припустити, що частинки дисперсного порошку, що вводиться в розчин нікелювання, хаотично рухаючись у всьому обсязі, заповнюють дефекти кристалічних ґрат і тим самим підвищують щільність упаковки атомних шарів.

Композиційні хімічні покриття одержують із суспензій, що представляють собою розчин з добавкою певної кількості дисперсного порошку. На поверхні матеріалу, що покривається, осаджується метал (перша фаза або матриця) і частинки порошку (друга фаза, або зміцнювач), які зарощуються матрицею, утворюючи структуру покриття.

Особливістю освіти КХЛ, проти чистими, і те, що у процесі осадження в покриття безперервно впроваджуються частки різних матеріалів. При хімічному нікелюванні із суспензій в покриття входить значно більша кількість частинок, ніж у разі гальванічного осадження, при одних і тих же концентраціях суспензії [42]. І за структурою КХП відрізняються від гальванічних більш рівномірним розподілом частинок дисперсної фази в матриці [44]. Практично цим методом будь-яка проста або складна речовина, диспергована в розчині, може бути зарощена металом. Важливим залишається розмір застосовуваних частинок. У літературі йдеться про порошки металів та сплавів з розмірами частинок від 0,01 до 100 мкм. Можна висловити гіпотезу про те, що застосування частинок з меншим розміром буде найефективнішим, оскільки такі частки мають більшу седиментаційну стійкість.

У зв'язку з цим великий інтерес представляє вивчення механізму осадження частинок і подальше зарощування їх металом.

В утворенні композиційних покриттів Р. С. Сайфуллін [45] виділив три важливі етапи:

- 1) зустріч частинок із поверхнею металу;
- 2) затримання частинок на поверхні, що покривається;
- 3) заростання часток.

Зустріч частинок з поверхнею металу здійснюється в результаті перемішування суспензії штучним або природним шляхом. Штучне перемішування проводиться пропелерною мішалкою, рециркуляцією розчину, повітрям або газом. Природне перемішування є наслідком електростатичного перенесення, дифузії, броунівського руху, седиментації частинок.

При затриманні частинок на поверхні металу відбуваються такі різноманітні маловивчені явища, як адгезія, налипання, адсорбція, змочуваність, взаємодія металу з частинками, зіткнення твердих частинок з блоками кристалів, а також із зародками та іншими незавершеними структурами. Подібні явища відбуваються під час зіткнення частинок між собою. Імовірність зіткнення дуже велика внаслідок відмінності їх конфігурації, величини заряду, макро- і мікронестаціонарності потоків розчину, що викликаються його перемішуванням і гідравлічним ударом про структуру, що формується і т. д. Все це може призвести до виштовхування і виламування частинок з поверхні металу. Побудова в цьому випадку логічної і тим більше математичної моделі цих процесів ускладнюється ще й низкою інших факторів, зокрема наявністю дефектів структури матриці (пор, тріщин, капілярів, мікро- і макронерівності тощо). Всі ці фактори можуть або сприяти або перешкоджати утриманню частинок на поверхні.

Стадія зарощування частинок зростаючим осадом визначає кількість

дисперсних частинок у покритті, що утворилося, міцність з'єднання їх з матрицею, локальні неоднорідності структури, мікропластичні деформації, напруги в покритті і фізико-механічні властивості покриття.

Перебуваючи в безпосередній близькості від металу або контактуючи з ним через тонку плівку рідини, частка впливає на процес осадження металу. Цей вплив проявляється в екрануванні частинкою частини поверхні металу, у зміні фактичної площі металу, що покривається.

Викладене показує, що для зарощування частинок зростаючим осадом бажаний безпосередній контакт їх з поверхнею металу, але і за наявності рідкого прошарку товщиною менше деякої критичної відстані утворення композиційного покриття цілком можливо. Безпосередній контакт частинок з металом у процесі його кристалізації залежить від багатьох факторів і, насамперед, від властивостей частинок порошку, їх адгезійної здатності, зарядів.

На думку В.Ф. Молчанова [61], для підтримки стійкості суспензії та включення частинок у покриття оптимальні розміри їх повинні становити - 0,01...0,05 мкм. Автор вказує, що грубі частинки (0,1...10 мкм) важче заростають покриттям, легше седиментують і уникають поверхні покриваного металу, тому їх діюча (активна) концентрація завжди нижче рецептурної.

Найчастіше застосовують суспензії з концентрацією частинок 5...100 г/л [61]. Бажаючи отримати покриття, багаті на включення, ряд авторів [71-74] використовують розчини з більш високою концентрацією частинок. Але в цьому випадку ступінь використання покриттям частинок різко знижується, тобто відбувається свого роду перенасичення покриття частинками.

Викладене свідчить про те, що механізм осадження частинок з хімічним покриттям маловивчений і визначається складним кореляційним взаємозв'язком факторів, що залежать від форми та розмірів частинок.

## 2.2 Сутність зміцнення хімічних покриттів дисперсними матеріалами

Дисперсні частинки, впроваджуючись у хімічне покриття, призводять до зміни його структури та фізико-механічних властивостей. Більшість дослідників [39, 61] стверджують, що ультрадисперсні частинки сприяють зміцненню покриття, ще особливо важливо для створення зносостійких покриттів. Тому механізм зміцнення КХП потребує детального розгляду.

Як зазначалося раніше, у поєднанні «золотник - корпус» гідророзподільника відбувається абразивний знос. Для пояснення механізму зміцнення КХП розглянемо механізм зношування покриття абразивними частинками в процесі експлуатації.

Абразивний знос буває газо- і гідроабразивним. Загальним є механізм процесу зношування, який полягає у впровадженні абразивного тіла в металі

його просуванні при терті вздовж поверхні, внаслідок чого відбувається деформування металу або відділення мікроостружки, або скол. Відділення металу, що визначає знос деталі, відбувається в результаті одно-або багаторазової дії абразиву. По краях видавленої подряпини метал може мати у навалах значні пошкодження і в цьому випадку легко відокремлюватися при подальшому впливі абразиву.

На думку вчених М. М. Хрущова і М. А. Бабичева [99] при абразивному зносі покриттів, отриманих різними методами, визначальним фактором руйнування є деформація внаслідок великих напружень, що виникають від дії абразивних частинок.

А.Р. Ржаніцин [82] у своїх працях виділив такі стадії зношування поверхневого шару покриттів:

- зародження та виникнення тріщин;
- подальший розвиток тріщин;
- руйнування.

Абразивна частка навіть при малих зовнішніх навантаженнях впроваджується в робочу поверхню деталі і просувається по лінії дії сили тертя. Маючи розклинювальну дію, частка 1 залишає за собою слід деформованого металу покриття 2 нанесеного на поверхню деталі 3 (рисунк 2.3,а).

Внаслідок деформацій у мікрооб'ємах металу покриття виникають напруги, що збільшуються з подальшою дією абразивної частинки. По краях деформованого металу виникають мікротріщини, які збільшуються внаслідок багаторазової дії абразивної частини (рисунк 2.3,б). Тріщини можуть досягти основного металу. У результаті при критичному значенні напруги відбувається руйнування та відділення мікрооб'ємів металу покриття (рисунк 2.3, в).

Відомі американські фахівці з боротьби зі зносом тертьових поверхонь - Норман і Ейвері запропонували поділ абразивного зношування на типи:

- при високих напругах;
- при малих напругах;
- в результаті довбання, що зазвичай супроводжується ударом.

Ейвері дає такі пояснення: при високих напругах зношування має місце в тих випадках, коли абразивні частинки потрапляють між твердими металевими поверхнями, що знаходяться в відносному русі. При роздавлюванні абразивного зерна утворюються частинки з гострими ребрами та плоскими гранями, здатні не тільки різати, а й деформувати метал. Крім того, висока місцева напруга на металевій поверхні може призвести до дроблення крихких структурних складових та утворення мікротріщин. Як приклад Ейвері наводить зношування куль у кульових барабанних млинах, а також поверхонь сполучених тертьових деталей, між якими потрапляє пил.

Абразивне зношування при малих напругах менш інтенсивне, ніж попереднє. Воно відбувається під впливом твердих і зазвичай гострих частинок, причому головною причиною виникнення в металі напруги при контакті його з частинками є швидкість їх руху. При її збільшенні різко зростають напруги в металі. Найбільш інтенсивне абразивне зношування третього типу, пов'язане з проявом високих напруг, що захоплюють великий об'єм металу, і з ударним навантаженням. Приклади таких умов експлуатації деталі: робота зубів ковша екскаватора, робота шків камнедробілки.

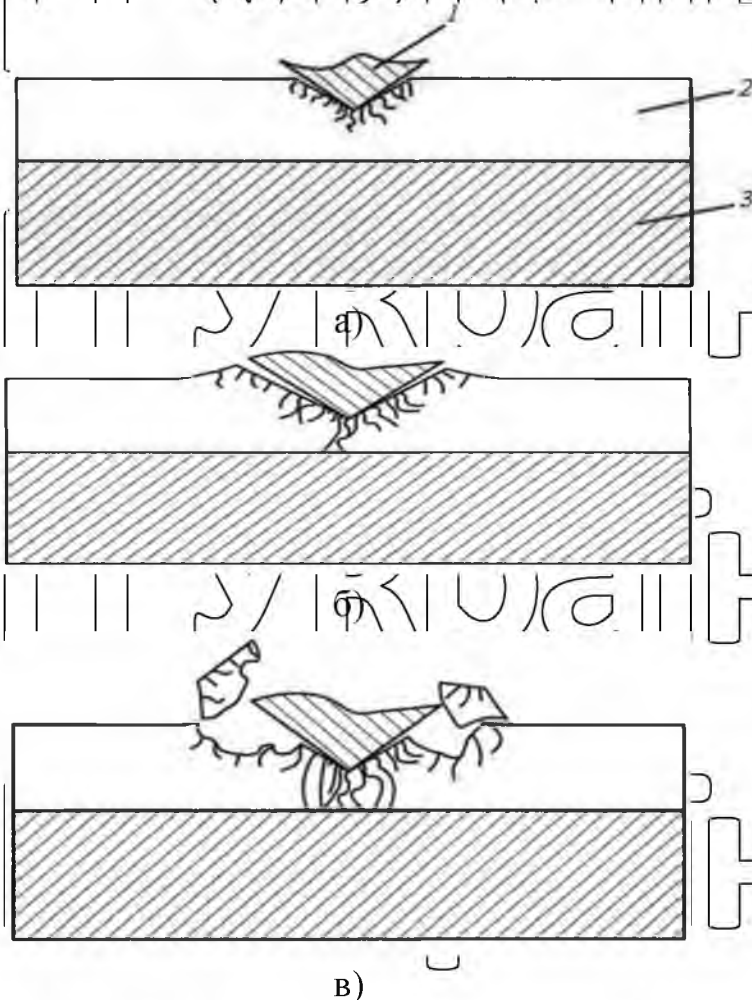


Рисунок 2.3 - Схема абразивного зношування покриття: *а* - утворення мікротріщин; *б* - подальший розвиток мікротріщин; *в* - руйнування

Можна припустити, що в механізмі абразивного зношування хімічного покриття руйнівним фактором є не різання і відокремлення мікророзружки, а деформація і скол внаслідок виникнення високих напруг в області контакту абразивної частинки з поверхнею тертя.

Для поліпшення фізико-механічних властивостей хімічного покриття нікелю, таких, як мікротвердість, зносостійкість, а також надання його поверхні антифрикційних властивостей пропонується вводити до складу ванни нанодисперсний порошок оксиду алюмінію  $Al_2O_3$  ультрадисперсний порошок

політитаната калію з загальною  $K_2O \cdot nTiO_2$ .

Найчастинки  $Al_2O_3$  розмірами від 30 до 50 нм збільшують мікротвердість композиційного нікель-фосфорного покриття. Щоб зрозуміти причини цього, розглянемо формулу оксиду алюмінію. Електронегативність алюмінію має значення 1,5 (по Полінгу), а кисень - 3,5. Тобто зв'язок між киснем і алюмінієм формально чисто іонної, тому різниця електронегативностей дорівнює 2. Однак у зв'язку з тим, що іон алюмінію повинен мати заряд  $3+$ , електронегативність у алюмінію повинна збільшитися, і зв'язок стає більш ковалентним. Фактично заряд на атомі алюмінію в  $Al_2O_3$  стає не  $+3$ , а  $+0,4$ . Як відомо, ковалентний зв'язок має високу міцність.

Збуджений атом алюмінію на зовнішньому електронному рівні має 3 електрони (один s- і два p-електрони), тобто відбувається  $sp^2$ -гібридизація електронів, що визначає плоску просторову структуру з'єднань алюмінію. Атоми кисню мають  $sp^3$ -гібридизацію, що при взаємному з'єднанні алюмінію з киснем має сформувати ажурну регулярну структуру, що і реалізується практично. Форма кристалів  $Al_2O_3$  представлена Рис. 2.4.

Така структура має підвищену твердість. У зв'язку з тим, що представлену структуру можна з наближенням вважати двовимірною, на частинки цієї речовини можуть розподілятися в структурі металу по міжкристалітних порожнинах і в місцях дислокацій, ущільнюючи кристалічну структуру нікелевого покриття і посилюючи тим самим його міцність та ударостійкість.



Рисунок 2.4 – Структура кристала оксиду алюмінію

Крім того, завдяки невеликій поляризації зв'язку «алюміній - кисень» неподілені електронні пари кисню можуть утворювати частковий координаційний зв'язок з d-підрівнем нікелю, посилюючи таким способом взаємозв'язок між нікелевими кристаллітами.

При введенні в композиційний матеріал політитанату калію утворення подібного координаційного зв'язку стає малоімовірним, оскільки високий позитивний заряд титану робить зв'язок «метал - кисень» ще менш полярним, ніж у попередньому випадку.

Положення катіонів у політитанаті та їх координаційні числа, що

визначають специфіку структури кристала, стають у разі цього з'єднання - особливо наочними. Титанат калію має частково кристалічну шарувату структуру.

Так, на рис. 2.5 ясно видно ланцюжковий характер структури політитанату, в якому  $Ti$  — октаедри, пов'язані один з одним вершинами, утворюють колонки, паралельні ребру елементарного осередку. Цей тип структури - поширений серед бінарних сполук. Завдяки такій шаруватості добавка політитанату калію повинна надавати покриттю антифрикційних властивостей.



Рисунок 2.5 Структура кристала політитанату калію

Зі сказаного можна зробити висновок про те, що при осадженні нікель-фосфорних покриттів відбувається порушення послідовності упаковки атомних шарів, що призводить до утворення в кристалі дефектних областей - порожнин.

Дисперсні частинки, що вводяться в розчин, здатні заповнювати ці порожнечі, що призводить до ущільнення кристалічної структури покриття. Внаслідок цього, мабуть, змінюються фізико-механічні властивості нікель-фосфорного покриття.

### 2.3 Теоретичне обґрунтування підвищення довговічності деталей відновлених (зміцнених) композиційним хімічним нікелюванням

Як зазначалося раніше, при абразивному зношуванні покриттів руйнівним фактором є не різання та відділення мікростружки, а виникнення високих напруг в області контакту абразивної частинки з поверхнею тертя внаслідок деформації. З часом величина напруги збільшується і досягає критичного значення, в результаті відбувається руйнування покриття.

Для вивчення механізму абразивного зношування деталей відновлених - композиційним хімічним нікелюванням можна використовувати теорію накопичення пошкоджень, розроблену А.Р. Ржаніцин [82,83].

У процесі зношування поверхневого шару деталі змінюються його фізико-механічні властивості, зокрема, знижується його міцність, тобто матеріал стає менш зносостійким.

У ситуації, коли міцність матеріалу деталі залежить від тривалості - докладання навантаження і режиму навантаження, фундаментальною характеристикою здатності матеріалу чинити опір руйнуванню виявляється довговічність оцінювана ресурсом. У даному випадку показником довговічності є час від моменту застосування напруги до моменту руйнування матеріалу.

Як критерій руйнування матеріалу вибирали умову, коли будь-який з аналізованих параметрів досягне критичного значення. У роботі [83] А.Р. Ржаніци запропонував зношування характеризувати параметром миттєвої міцності матеріалу  $S$ , що зменшується з часом під дією прикладеного навантаження і рівного напрузі в момент руйнування. Тобто:

$$S = \sigma_{кр} - \text{умова руйнування}, \quad (2.6)$$

де  $S$  - параметр миттєвої міцності, що характеризує рівень опірності - матеріалу,

$\sigma_{кр}$  - критичне напруження, МПа.

$$S > \sigma_{кр} - \text{умова міцності}. \quad (2.7)$$

У нашому випадку золотник можна розглядати як товстостінну оболонку з рівномірною товщиною покриття, режим навантаження поясків золотника - як динамічний. Для спрощення прийняли припущення, що зношувані поверхні працюють в умовах «олійного голодування». Опірність матеріалу зношування залежатиме від фактичної напруги, що виникає в поверхневому шарі. Критичний знос (руйнування) спостерігатиметься в міру наближення значення фактичної напруги до значення межі плинності матеріалу покриття. На думку Ржаніцина А.Р., Качанова Л.М. [44, 83]:

$$S = \sigma_{\phi} + \sigma_{\phi} k_{знос}$$

$$\sigma_{кр} = 75\% \sigma_{\phi}$$

$\sigma_{\phi}$  - фактична напруга в покритті, МПа;

$k_{знос}$  - коефіцієнт впливу зносу;

$\sigma_{\phi}$  - межа міцності, МПа.

Тоді умову (2.6) можна записати так:

$$\sigma_{\phi}(1 + k_{знос}) = 075 \sigma_{\phi}, \quad (2.8)$$

Фактична напруга є результуючою між межами плинності та міцності:

$$\sigma_{\phi}^2 = \sigma_{\phi}^2 + \sigma_{\tau}^2 \quad (2.9)$$

де  $\sigma_{\phi}$  - межа міцності матеріалу, МПа;

$\sigma_{\tau}$  - межа текучості матеріалу, МПа.

Так як режим навантаження деталі динамічний і в процесі зношування матеріал змінює свої характеристики міцності, то  $\sigma_{\phi}$  і  $\sigma_{\tau}$  будуть змінюватися в часі, причому залежність може бути як лінійна, так і нелінійна. У нашому випадку скористалися нелінійною квадратичною залежністю виду:

$$\sigma(t) = \sigma_0 + at + b(t)^2 \quad (2.10)$$

де  $\sigma_0$  – початкова напруга, що дорівнює напрузі на діаграмі деформування матеріалу, МПа;  
 $a, b$  – коефіцієнти функції, отримані на основі експериментальних даних для групи матеріалів, в яку входить досліджуване покриття, при аналогічних режимах навантаження;

$t$  – час, год.

Коефіцієнт впливу зносу на деформацію покриття знаходимо з виразу - [68]:

$$k_{\text{зносу}} = \sqrt{\frac{h_{\text{зносу}}}{h_0} \left( 1,99 - 0,41 \frac{h_{\text{зносу}}^3}{h_0^3} - 38,48 \frac{h_{\text{зносу}}^3}{h_0^3} + 53,85 \frac{h_{\text{зносу}}^3}{h_0^3} \right)}, \quad (2.11)$$

де  $h_{\text{зносу}}$  – товщина зношеного шару покриття, мкм;

$h_0$  – початкова товщина покриття, мкм.

У нашому випадку у виразі (2.10) як початкова напруга необхідно використовувати межі міцності  $\sigma_T$  і  $\sigma_0$  плинності Від, визначені на діаграмі деформування матеріалів. Так для чистого нікелю  $\sigma_T = 120$  МПа,  $\sigma_0 = 500$  МПа, а для композиційного  $\sigma_T = 276$  МПа,  $\sigma_0 = 680$  МПа.

Початкову товщину отриманого покриття та його зношеного шару встановлювали за допомогою мікрометричної скоби МЛ-75 до і після випробувань. У результаті отримали такі дані: у базового покриття  $h_0 = 23$  мкм,  $h_{\text{зносу}} = 12$  мкм, а у композиційного покриття  $h_0 = 36$  мкм,  $h_{\text{зносу}} = 8$  мкм. Таким чином, підставивши наявні дані у вираз (2.8) і виконавши математичні перетворення, отримали рівняння з одним невідомим  $t$  – критичним часом або часом до повного зношування покриття.

Для чистого покриття:

$$497432,8 + 3935,3t - 1832,5t^2 - 0,65t^3 + 0,04t^4 = 0 \quad (2.12)$$

Для композиційного покриття:

$$1696218,9 + 1104,6t - 342,2t^2 - 1,098t^3 - 0,068t^4 = 0 \quad (2.13)$$

Розв'язавши рівняння (2.12) та (2.13) знайшли змінну  $t$ . В результаті отримали, що для вихідного (базового) покриття час до повного зношування становить 11 хв, а для покриття з додаванням ультра-і нанодисперсних частинок – 16 хв, що в 1,5 рази більше.

Для перевірки отриманих результатів проводили серію експериментів із випробування покриттів на зносостійкість, а точніше на схоплювання. Мета випробувань: визначити час до повного зношування покриття в умовах «олійного голодування».

Випробування зразків проводили машиною тертя МІ-1М за схемою «ролик – колодка». Колодки виготовляли із сірого чавуну СЧ 20. Довжина колодки по колу – 20 мм, ширина – 10 мм. Ролик виготовляли із середньовуглецевої сталі 40 діаметром 50 мм та шириною 12 мм.

На ролик наносили експериментальні покриття. Дослідженням підвергали зразки, покриті композиційним та чистим хімічним покриттям на основі нікелю. Експерименти проводили в умовах «масляного голодування», підведення мастила в зону тертя здійснювали періодично кожні 3 хв експерименту волоссяним пензлем. Як мастильний матеріал використовували індустріальне масло I-20. Початкове навантаження на зразку складало 800 Н, далі навантаження підвищували на 150 Н через кожні 3 хв, протягом яких момент тертя приймав постійну величину для даного ступеня навантаження. Тривалість випробувань фіксували за допомогою секундоміра до моменту схоплювання поверхонь, що труться. Схоплення визначали за стрибкоподібною зміною моменту тертя.

В результаті проведених випробувань встановлено, що для вихідного (базового) покриття час до зношування становить 9 хв, а для покриття з додаванням частинок - 15 хв.

З отриманих теоретичних та експериментальних даних видно, що у композиційного покриття, по відношенню до базового час до схоплювання та переходу до критичного зносу підвищується в середньому в 1,5-1,7 рази.

Ресурс відновлених золотників виражається відомою залежністю:

$$T_d = \frac{I_d \cdot t}{h} \quad (2.14)$$

де  $I_d$  - величина допустимого зношування, мкм;

$h$  - Товщина зношеного шару, мкм;

$t$  - час зношування, год.

З виразу (9) видно, що із збільшенням часу зношування ресурс деталей збільшується.

На рис. 2.5 зображено залежності ресурсу відновлених деталей від часу зношування на підставі теоретичних та експериментальних даних. З графіка видно що при відновленні деталей композиційним хімічним покриттям ресурс деталей зростає в 1,5-1,7 рази, по відношенню до базового покриття без частинок.

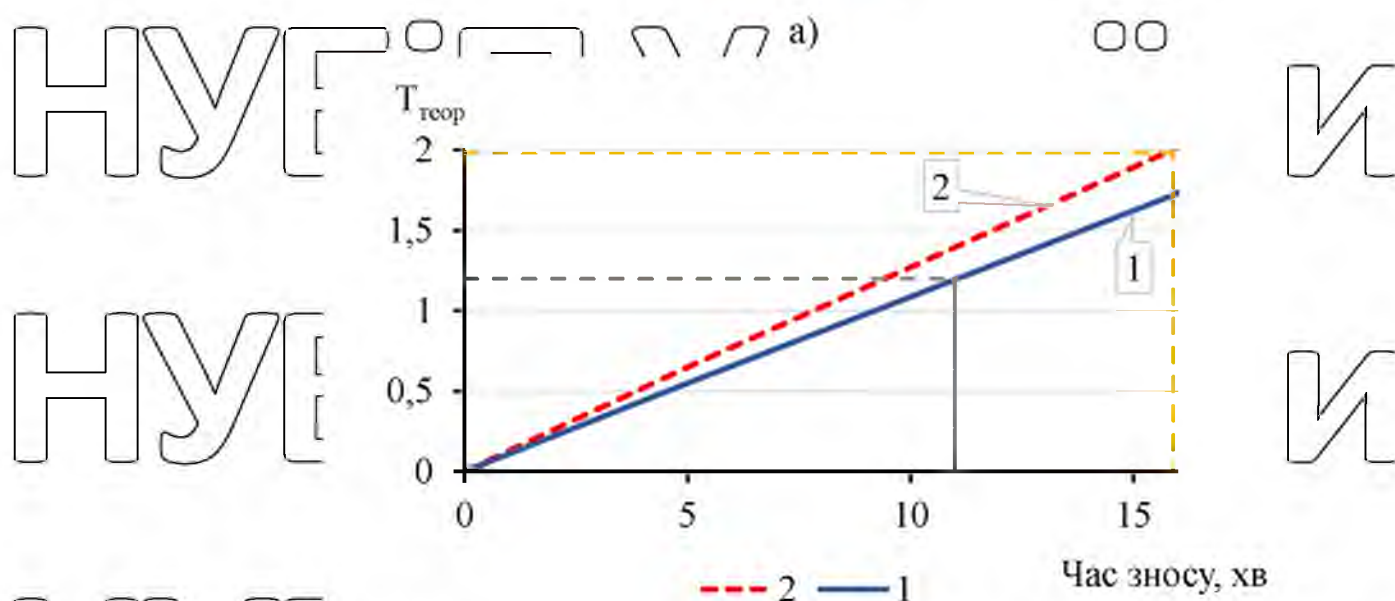
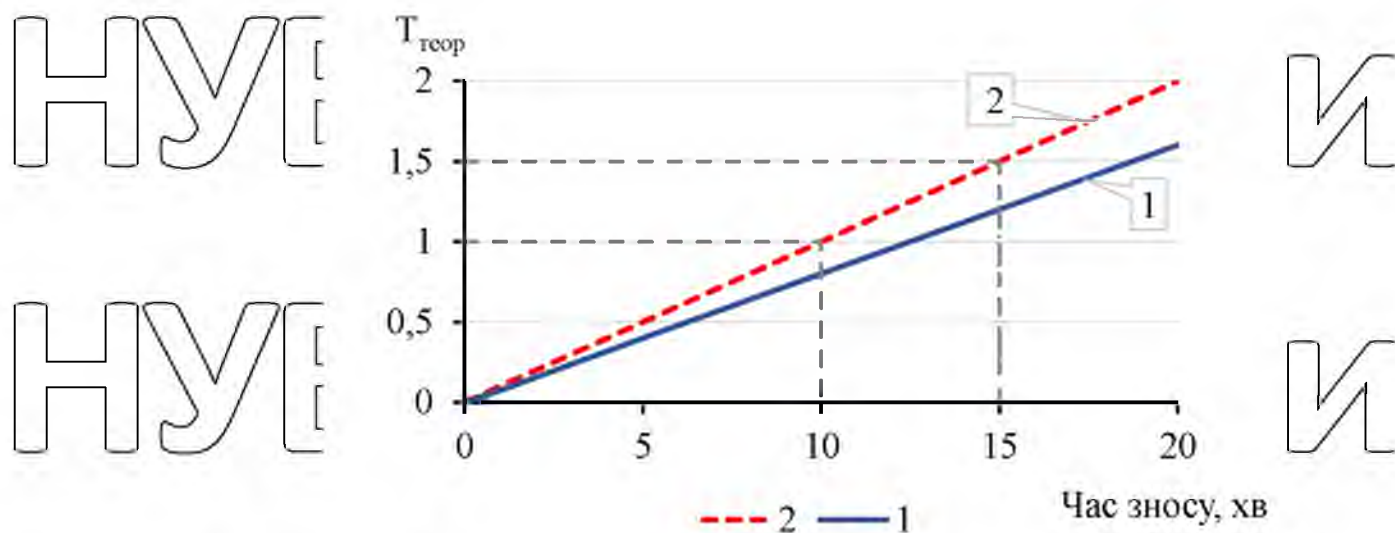


Рисунок 2.5 – Залежності ресурсу відновлених деталей від часу зношування: 1 – базове покриття; 2 – композиційне покриття;

а – теоретична залежність;

б – експериментальна залежність

Таким чином, застосування дисперсних частинок дозволить покращити основні фізико-механічні властивості одержуваних покриттів на основі нікелю і як наслідок підвищити довговічність відновлюваних деталей та агрегатів автотракторної техніки.

НУБІП України

## РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОТРИМАНИХ ПОКРИТТІВ

### 3.1. Програма досліджень

Відповідно до поставлених завдань і для досягнення мети було прийнято таку програму досліджень:

- експериментально-теоретичні дослідження впливу складу ванни та режимів композиційного нікелювання на фізико-механічні властивості покриттів;
- Дослідження структури поверхні покриттів;
- Дослідження хімічного складу отриманих покриттів;
- Порівняльні випробування покриттів на зносостійкість;
- прискорені корозійні випробування покриттів;
- стендові та експлуатаційні випробування гідравлічних розподільників типу Р80, з відновленими золотниками.

Для виключення технологічних помилок при дослідженнях було передбачено:

- а) виготовити всі зразки (в межах своєї групи) з однієї марки сталі , покриття наносити з одного складу розчину на одному обладнанні при строгому дотриманні технологічного процесу;
- б) при нанесенні покриттів підтримувати температуру повітря в приміщенні 18...22 °С і відносну вологість повітря - 45-55 %;
- в) наносити покриття на зразки протягом одного проміжку часу.

Фізико-механічні властивості одержаних покриттів вивчали шляхом - вимірювання мікротвердості, зносостійкості, корозійної стійкості та адгезії - покриттів з основним металом. Структуру поверхні покриттів досліджували за допомогою комплексу на базі растрового електронного мікроскопа « MIRA II TESCAN» (Чехія). Зносостійкість відчували машиною тертя MI-1M. Прискорені корозійні випробування здійснювали в спеціальній камері при підвищеній відносній вологості і температурі періодичною конденсацією сольового туману.

Стендові прискорені зносні випробування відновлених гідророзподільників проводили дотримуючись ОСТ 114 68.9.542-85.

Експлуатаційні випробування відновлених гідророзподільників проводили на тракторах ДТ-75М, МТЗ-80(82), Т-150К, що виконують різні види робіт.

### 3.2 Методика одержання композиційного хімічного покриття на основі

#### нікелю

В даний час хімічне покриття на основі нікелю одержують з кислих та лужних розчинів. Покриття, отримані з кислих розчинів мають ряд переваг: високі твердість до 600 МПа і швидкість осадження до 20 мкм/год. Тому для

отримання КХП на основі нікелю було обрано стандартний кислий розчин наступного складу: нікель сірчаноокислий - 30 г/л, сірковокислий натрій - 10 г/л, гіпофосфіт - 15 г/л. Для нанесення КХП використовували дисперсний порошок із частками розміром 0,01...0,03 мкм.

Аналіз існуючих технологій отримання нано- та ультрадисперсних матеріалів дозволив вибрати метод плазмової переконденсації, що дозволяє - окривувати дисперсні порошки різних металів розміром частинок від 10 до 50 нм. Метод заснований на випаровуванні великодисперсного порошку (сировини) у плазмовому потоці з температурою 4500...6000°C та конденсації пари до частинок необхідного розміру. Зовнішній вигляд установки для одержання - дисперсних порошоків металів подано на рис 3.1.

Отримані ультрадисперсні частинки характеризувалися такими параметрами: розміром - 0,01...0,03 мкм, питомою поверхнею 100...150 м<sup>2</sup>/г, мали сферичну форму.

При виборі матеріалу дисперсних додавок для нанесення покриттів керувалися такими основними міркуваннями:

- дисперсні порошки повинні мати високу твердість для збільшення мікротвердості покриття;
- частинки в розчині нікелювання повинні мати високу хімічну стійкість та змочуваність;
- частинки повинні сприяти підвищенню корозійно-і зносостійкості покриття.

Відповідно до цих вимог і на підставі літературних даних та проведених досліджень була обрана наступна група порошоків : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ; BN, TiC, AlN, SiC, B і K<sub>2</sub>O·nTiO<sub>2</sub>.



Рисунок 3.1 - Установка для одержання дисперсних порошоків

Політитанат калію (K<sub>2</sub>O·nTiO<sub>2</sub>) - це новий клас сполук, що представляє собою шаруватий кристал лускатої форми, товщиною 20-80 нм. Політитанат

кацію має шарувату структуру, аналогічну структурі графіту та дисульфиду молібдену. Тому лускатий політитанат кацію є новим дешевим наповнювачем високоміцних композиційних матеріалів. Використовувати цей порошок можна як:

- армуючого наповнювача фрикційних композиційних матеріалів, що дозволяє істотно підвищити їх зносостійкість, збільшити допустимі навантаження;

- компонента антифрикційних матеріалів та покриттів (прокладки, сальники);

- компонента високоефективних мастил та паст, здатних працювати при підвищених температурах;

- наноструктуруюча добавка до металів та сплавів, що дозволяє збільшити їх механічну міцність у 3-4 рази.

Приготування розчину-суспензії полягало в наступному. Спочатку в ванні нагрівали дистильовану воду до температури 60 °С. Далі в окремій порцеляновій ємності змішували її з певною кількістю дисперсного матеріалу (модифікатора) і шляхом розтирання протягом 30 хв доводили до однорідного стану. Отриману концентровану суспензію вносили в основну ємність (ванну) при постійному перемішуванні. Далі в суспензію додавали необхідну кількість сірчано-кислого нікелю і оцтовокислого натрію. Розчин-суспензію, що вийшов, нагрівали до температури 80 °С і додавали гіпофосфіт натрію. Після ретельного перемішування піднімали температуру до 92 °С.

У ремонтному виробництві найбільш широко використовують реактори з нержавіючої сталі. Реактори з анодним захистом та реактори з хімічного скла застосовують значно рідше. Однак нами в лабораторних дослідженнях був використаний реактор з хімічного скла як найбільш оптимальний для випробувань.

Технологічний процес нанесення КХП складається з наступних основних операцій:

- Підготовка поверхні деталі;
- Нанесення покриття на зразок;
- термічної обробки покриття;
- Контроль якості покриття.

Підготовка поверхні деталі до нанесення КХП включала знежирення і травлення.

Знежирення проводили у розчині наступного складу:

- тринатрій фосфат 30... 70 г/л;
- вуглекислий натрій 20... 25 г/л;
- їдкий натр 5... 15 г/л;

- скло рідке  $\delta \dots 7$  г/л.

Температура розчину  $60 \dots 70$  °С, час знежирення - 20 хв.

Потім зразки промивали в гарячій воді при температурі  $70-80$  °С протягом 1-2 хв і далі в проточній воді при кімнатній температурі протягом 1-2 хв.

З метою видалення з поверхні різного роду оксидів: іржі, окалини та продуктів корозії проводили травлення в 10% розчині соляної кислоти  $50 \dots 100$  г/л. Температура розчину  $15 \dots 30$  °С, час травлення 1-2 хв.

Потім зразок промивався у проточній воді протягом 1-2 хв.

Нанесення покриття на зразок проводили на лабораторній гальванічній установці «Valenza» (Італія) (рисунок 3.2). Температуру розчину підтримували за допомогою регулятора  $90 \dots 92$  °С. Перемішування здійснювали за допомогою магнітної мішалки з частотою обертання  $30$  хв<sup>-1</sup> якої укомплектована установка.

Термічну обробку КХП проводили в печі муфельної марки СНОЛ 12/16 при температурі  $400$  °С протягом 1 год (рисунок 3.3).

Контроль якості КХП здійснювали візуально. Зразки зі здуттями, порами та непокритими ділянками відбраковувалися.

У процесі роботи ванни склад розчину нікелювання безперервно змінювався. Для підтримки необхідної концентрації компонентів розчин періодично коригували шляхом введення в нього нових порцій компонентів, їх визначали відповідно до методики, представленій в літературі [72].

Аналіз та коригування розчину на вміст сірчаноокислого нікелю після нікелювання кожної партії деталей.

Вміст сірчаноокислого нікелю визначали методом титрування, заснованим на здатності іонів нікелю утворювати міцні безбарвні внутрішньокмплесні сполуки з трилоном Б в аміачному середовищі.



Рисунок 3.2 - Лабораторна гальванічна установка



Рисунок 3.3 – Муфельна піч СНОЛ-12/16

Необхідні реактиви: азотна кислота (1:4); лимоннокислий натрій (5%-й розчин); аміак (25% водний розчин); індикатор мурексиду; трилон Б (0,1). Аналіз проводили наступним чином: 30-40 мл розчину нікелювання попередньо кип'ятили з 5 мл азотної кислоти (1:4) протягом 5-10 хв для розкладання гіпофосфіту натрію. Потім 2 мл розчину з цієї проби поміщали в конічну колбу на 250 мл, додавали 50 мл води, 20 мл 5 %-го розчину лимоннокислого натрію, 20 мл 25 %-го водного розчину аміаку, 0,1-0,2 г індикатора мурексиду і титрували розчином трилону Б до появи червоно-фіолетового фарбування.

Вміст сірчаноокислого нікелю обчислювали за формулою:

$$\text{NiSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O} = \frac{a \cdot 0,0029345 \cdot 1000}{n} \cdot 4,78$$

де  $a$  - кількість розчину трилону Б, витрачене на титрування, мл;  
 $n$  - кількість розчину нікелювання, взяте для аналізу, мл.

Вміст гіпофосфіту натрію визначали з розрахунку, що на 5,15 г сірчаноокислого нікелю припадає 5,65 г гіпофосфіту натрію, допускається працювати без коригування розчину при досягненні концентрації сірчаноокислого нікелю не менше 15 г/л.

Необхідну кількість сірчаноокислого нікелю та гіпофосфіту натрію розчиняли в окремих ємностях у холодній воді і через фільтр вводили у робочу ванну, при цьому розчин ретельно перемішували. Коригування розчину тільки сірчаноокислим нікелем або гіпофосфітом натрію не допускається.

Через 2-3 коригування основних компонентів необхідну кількість оцтовокислого натрію (1-2 г/л) розчиняли в окремій ємності в холодній воді і через фільтр вводили в робочу ванну після додавання сірчаноокислого нікелю і гіпофосфіту натрію.

Воду, що випарувалася, доливали в розчин хімічного нікелювання тільки при коригуванні, причому застосовували тільки дистильовану воду.

Коригування рН проводили 25% розчином аміаку. Додавання 175 мл 25%-го розчину підвищує значення рН на 0,1, при безпосередньому додаванні у ванну аміак розбавляли водою у співвідношенні 1:4 і заміри рН виробляли перед

завантаженням кожної партії деталей.

Вищеписана методика дозволяє стабільно отримувати якісні композиційні покриття на основі нікелю з включенням нано- та ультрадисперсних частинок.

### **3.3 Методика вибору міцного матеріалу хімічного нікелевого покриття**

З метою визначення найбільш ефективного матеріалу, що зміцнює покриття були проведені попередні експерименти.

Покриття наносили на зразки у вигляді пластин, виготовлені із середовищ невуглецевої сталі 25 ГОСТ 1050-88, розмірами 100\*15\*2 мм за методикою, описаною раніше. Концентрацію порошків у розчині, яка становила 0,3 г/л, вибирали дослідно-експериментальним шляхом.

Ефективність зміцнюючого матеріалу оцінювали по мікротвердості та товщині отриманих композиційних покриттів. Товщину отриманих покриттів вимірювали мікрометричною скобою МЛ-25.

Визначивши найефективніший зміцнювальний матеріал, подальші дослідження фізико-механічних властивостей КХП проводили лише з використанням даного порошку.

### **3.4 Дослідження фізико-механічних властивостей покриттів**

#### **3.4.1 Методика визначення мікротвердості покриттів**

Однією з найважливіших властивостей КХП з урахуванням нікелю - мікротвердості як основний чинник, що впливає його зносостійкість.

Мікротвердість покриттів визначали на приладі ПМТ-3 вдавлюванням алмазної піраміди згідно з ГОСТ 9450-76 "Вимір мікротвердості вдавлюванням алмазних наконечників" (рисунок 3.4). Так як товщина покриття на зразках різна, то вимір мікротвердості доцільно проводити на металографічних шліфах, вдавлюючи алмазну піраміду в шліфований торець пластини.



Рисунок 3.4 - Мікротвердомір ПМТ-3

Площина металографічного шліфу повинна бути строго перпендикулярна покриттю. Для запобігання завалу кромek зразок заливали епоксидною смолою марки ЕП-10. При заливці зразок поміщали в заливальну форму перпендикулярно площині її основи. Підготовлені зразки шліфували шліфкою з поступовим переходом від крупнозернистої до дрібно зернистої (абразив марки 100, 180, 240, 320, 600, 1000, 2000), не перевищуючи час шліфування 30-40 с на шліфці. При кожній зміні шліфки напрям шліфування змінювали на  $90^\circ$ . Остаточне полірування протягом 2-3 хв проводили на фетровому колі за допомогою пасти ГОІ № 2 з величиною зерна 4-8 мкм. Для отримання чіткої межі між металевими шарами після полірування здійснювали травлення шліфу протягом 2-3 с у розчині наступного складу:

- азотна кислота - 5 см<sup>3</sup>;
- ізопропіловий спирт - 95 см<sup>3</sup>.

Випробуванням піддавали по 3 зразки досліджуваних покриттів. З метою зниження ймовірності помилки при випробуванні робили 6 вимірів кожного зразка. Випробування проходили під час навантаження 20 г.

### 3.4.2 Методика визначення міцності зчеплення покриття з основним металом

Одна з важливих фізико-механичних характеристик покриття - міцність його зчеплення з основним металом.

У процесі експлуатації покриття піддається впливу температури,

механічних навантажень та інших зовнішніх та внутрішніх сил. Найбільш напружене місце в покритті - межа розділу між ним і основним металом деталі.

У зв'язку з цим для випробування стриманих покриттів на міцність зчеплення з основою було обрано метод вигину та метод зміни температур згідно з ГОСТ 9.302-88 [30]. Ці методи дозволяють оцінити міцність зчеплення покриття з основним металом.

Покриття наносили на зразки у вигляді пластин розмірами 100x20x2 мм, виготовлених із середньовуглецевої сталі 23 ГОСТ 1050-88. В якості зміцнювального матеріалу застосовували НДП оксиду алюмінію та політitanату кальцію, які за результатами раніше проведених досліджень показали найкращі результати. Після нанесення покриття зразки піддавали термообробці при температурі 400 °С протягом 1 год. Для достовірності результатів експерименту було досліджено 6 зразків з покриттям.

При використанні методу зміни температур зразок з покриттям нагрівали в муфельній печі СНОЛ 12/16 до температури 300 °С, витримували при даній температурі протягом 15 хв і швидко охолоджували у воді з температурою 15...25°С. Міцність зчеплення покриття з основою оцінювали за наявності на поверхні зразка здуття, тріщин і відшаровування.

Метод вигину полягав у випробуванні пластинчастих зразків на вигин під кутом 90° обидві сторони. При високій міцності зчеплення відшаровування покриття повинно бути відсутнім.

Одним із показників, що характеризують адгезійні властивості покриттів, є товщина дифузійного шару. Для її визначення були проведені металографічні дослідження шліфу зразка з КХП після термообробки на дослідницькому комплексі на базі растрового електронного мікроскопа «MIRA II TESCAN» (Чехія).

### 3.5 Методика дослідження якісного та кількісного складу покриттів

З метою визначення елементного складу композиційного нікелевого покриття та виявлення в ньому присутності нано- та ультрадисперсних частинок порошок оксиду алюмінію та політitanату кальцію було проведено емісійний аналіз зразків по дифракції відбитих електронів.

Дослідницький комплекс на базі PEM "MIRA II TESCAN" забезпечений мікроаналізаторами хімічного складу, що дозволило отримати більш повну інформацію про досліджуване покриття.

В основу визначення хімічного складу покриття покладено метод дифракції відбитих електронів. Важливою особливістю дифракції є залежність від атомного номера елементів. Якщо атомний номер елемента в точці падіння первинного пучка електронів малий (легкі атоми), то утворюється менша

кількість відбитих електронів з малим запасом енергії. В областях зразка, що містять високу концентрацію атомів з великим атомним номером (важкі атоми), більше електронів відбивається від цих атомів. Ці закономірності використовуються при отриманні елементного складу зразка.

### 3.6 Методика трибологічних випробувань

Однією з основних властивостей, що характеризують якість поверхневого шару матеріалу деталей машин, що працюють в умовах інтенсивного зносу, є зносостійкість. Процес зношування поверхневого шару деталі залежить від багатьох факторів і пов'язаний зі складними фізико-механічними, структурними та хімічними змінами в поверхневих шарах, що відбуваються при терті.

У поєднанні «золотник – корпус» розподільника Р80 основним видом тертя є тертя ковзання. Найбільш близько його можна відтворити на машині тертя МІ-1М за схемою «ролик – колодка» (рисунк 3.7). Для цього колодки виготовляли із сірого чавуну СЧ 20 довжиною по колу  $< 20$  мм, шириною – 10 мм. Ролик виготовляли із середньовуглецевої сталі 40 діаметром 50 і шириною 12 мм.

На ролик наносили експериментальні покриття. Дослідженням підвергали зразки, вкриті композиційним і чистим хімічним покриттям нікелю. Використовували кварцовий абразив з розмірами частинок 8...12 мкм при концентрації 0,08% масою.



Рисунок 3.7 - Машина тертя МІ-1М

Навантаження для здійснення випробувань визначали в такий спосіб. Спочатку встановлювали критичне навантаження, коли відбувалося сколювання поверхонь зразків без покриття. Початкове навантаження на зразку без покриття становило 600 Н, далі його підвищували на 150 Н через кожні 3 хв,

протягом яких момент тертя приймав постійну величину для даного ступеня навантаження. Схоплювання визначали за стрибком образної зміни моменту тертя. Таким чином, основне навантаження випробувань складало 900 Н.

Перед випробуваннями зразки пар тертя додавали протягом 3 год на режимах основного випробування. Зношування зразків визначали зважуванням на аналітичних вагах марки ВЛА-200М з точністю вимірювання  $1 \cdot 10^{-4}$  г.

Під час випробувань зразків з експериментальними покриттями на зносостійкість контролювали наступні параметри: момент тертя та знос.

### **3.7 Методика корозійних випробувань**

Корозійне руйнування металів відбувається внаслідок хімічної та електрохімічної взаємодії із зовнішнім середовищем. Під дією корозії знижуються міцність і пластичність поверхні металу, порушуються його фрикційні властивості.

На швидкість корозії металів значно впливають вологість повітря, вміст у ньому забруднень (гази, частинки солі) та час перебування вологи на поверхні металу.

Корозійні випробування досліджуваних покриттів проводили згідно з ГОСТ 9.308-85 «Покриття металеві та неметалеві неорганічні. Методи прискорених корозійних випробувань» при підвищеній відносній вологості та температурі з періодичною конденсацією вологи та введенням агресивної складової - хлористого натрію ГОСТ 4233-77.

Зразки виготовляли як пластин розмірами 100x15x2 мм. Для проведення випробувань було підготовлено 12 зразків. На 6 з них наносили хімічне покриття на основі нікелю, на інші 6 - композиційне хімічне покриття. Перед випробуванням зразки зважували на аналітичних вагах типу ВЛА-200М, після чого їх поміщали в камеру корозійних випробувань (рисунок 3.8).

Для отримання сольового туману використовували розчин натрію хлористого концентрацією 50 г/дм<sup>3</sup>. Зразки поміщали в камеру корозійних випробувань, яку нагрівали до температури 60 °С за допомогою вбудованого - нагрівача (див. рисунок 3.8). Тривалість випробувань становила 12 год. Розпорощення сольового туману проводили на початку кожної години випробувань.

Корозійну стійкість покриттів оцінювали втратою маси зразків після видалення продуктів корозії.

Для цього зразки після випробувань поміщали у ванну з 8% розчином NaOH, в якій вони знаходилися протягом 30 хв при температурі 20 °С.

НУ

НУ

НУ



Рисунок. 3.8 – Камера корозійних випробувань.

84

### 5.8 Методика стендових випробувань

В даний час для визначення ефективності нових технологій відновлення та зміцнення деталей машин широко використовуються прискорені зносні випробування.

Необхідність проведення стендових випробувань диктується тим, що при малих витратах як часу, так і матеріальних засобів можна отримати результат, що дозволяє говорити про доцільність способу відновлення, що розробляється.

У зв'язку з цим для визначення ефективності розробленої технології відновлення золотників гідророзподільників композиційним хімічним нікелюванням були відремонтовані гідророзподільники типу Р80-3/1-222. Експериментальні гідравлічні розподільники комплектували серійним золотником, золотником відновленим залізненням (існуючий спосіб відновлення), і золотником, відновленим композиційним хімічним нікелюванням. Перед початком випробувань гідророзподільники регулювали та перевіряли відповідно до ТУ 23.1.20-77 «Розподільники гідравлічного типу Р75. ГОСТ 87-54-71» на стенді КІ-4200. Для цього виконували мікрометраж робочих поверхонь золотника мікрометром МК-25 кл. 1 у двох площинах і двох поясах замірів. Прискорені випробування кожного розподільника проводили із застосуванням ілущного забруднювача на стенді КІ-4200 (рисунок 3.9). Як забруднювач робочої рідини застосовували кварцовий порошок марки КІО101 ГОСТ 2138-91 (середній діаметр фракції 8...12 мкм) при концентрації 0,08 %.

Для підтримки седиментаційної стійкості абразиву масло в баку - періодично перемішували лопатевою мішалкою. Для імітації роботи золотників стенд КІ-4200 забезпечили додатковим пристосуванням власного виготовлення (рисунок 3.10). Пристосування дозволяє випробовувати кожен золотник у позиціях «Підієм», «Опускання», «Плаваюче» та «Ній-

85

тральне». Пристосування складається з електродвигуна 1, пружної муфти 2, черв'ячного редуктора 3, шатуна 4 і подовжувача 5, з'єднаного з випробуваним золотником розподільника. Частота обертання валу ротора електродвигуна 1800 хв. Обертання передається через пружну муфту на провідний вал редуктора, передатне відношення якого 0,05.



Рисунок 3.9 Стенд для випробувань гідророзподільників КІ-4200

Отже, на веденому валу редуктора частота обертання 90 хв. За один оборот веденого валу золотник здійснює один повний цикл роботи. Таким чином, один повний цикл роботи золотника триває 1,5 с. Тривалість випробувань кожного золотника 40 год.

Випробування проходили у 5 етапів. Перший етап полягав у підробітку кожного золотника (тиск 6...8 МПа, олія без забруднювача, тривалість 8 год). Чотири етапи, що залишилися, проводили при основних режимах роботи (тиск 16...18 МПа, олія, забруднена абразивом, тривалість 32 год).

Для перевірки витоків у поєднанні «золотник – корпус» на стенді КІ-4200 необхідно контролюваний золотник встановити в положення «Підйом», створити дроселем тиск в системі 7... 10 МПа.

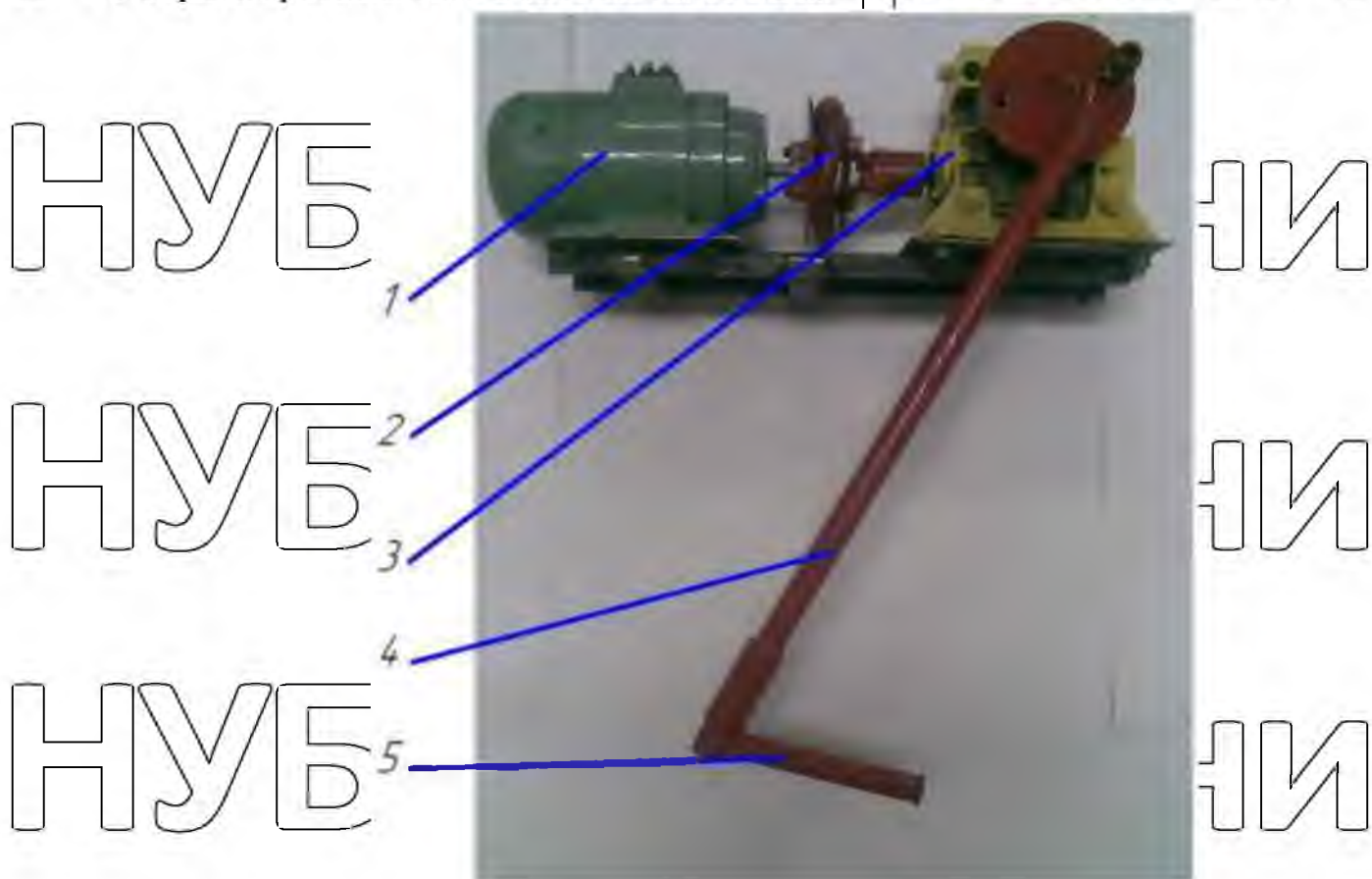


Рисунок 3.10 - Додатковий пристрій до стенду КІ-4200

Витки в парах перепускного клапана і золотникових пар збираються в нижній кришці розподільника і через приєднувальний фланець стікають в бак. При визначенні витоків у золотникових парах необхідно відокремити їх від витоків у клапанному механізмі. Для цього були внесені зміни до кришки розподільника (рисунок 3.11, а). Між відсіками замикаючих пристроїв золотника в кришці були зроблені перегородки 2 для поділу витоків кожного золотника (рисунок 3.11, б). Для оцінки витоків у кришку вмонтували штуцери 3. Витоків реєстрували через кожні 8 годин випробувань. Обсяг витоків вимірювали за допомогою мірювальної мензурки.

НУБІП України

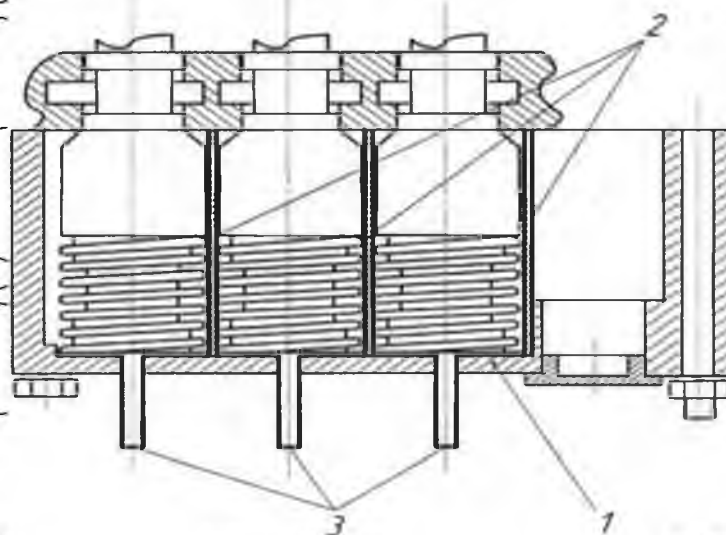


Рисунок 3.11 - Зовнішній вигляд (а) та схема (б) допрацьованої кришки розподільника Р80

88

### 3.9 Методика експлуатаційних випробувань

Експериментальні гідророзподільники були встановлені на тракторах МТЗ-80, Т-150К, які виконували різні типи сільськогосподарських робіт.

Перед початком випробувань гідророзподільники регулювали, чи перевіряли на відповідність ТУ 23.1.20-77 «Розподільники гідравлічного типу Р75 ГОСТ 87-54-71» на стенді КІ-4200. Також виконували мікрометраж робочих поверхонь золотників.

Тривалість випробувань кожного розподільника в середньому становила 842 мото-год. У процесі експлуатаційних випробувань контролювали напрацювання та через кожні 400 мото-год технічний стан розподільників величину витоків у з'єднанні «золотник - корпус».

Для оцінки витоків при експлуатаційних випробуваннях використовували універсальний гідротестер KI-28240. Даний гідротестер дозволяє проводити безрозбірне діагностування гідравлічної системи тракторів та сільськогосподарських машин.



Рисунок 3.12 - Універсальний гідротестер KI-28240

Щоб перевірити витік в золотникових парах гідророзподільника, вхідну магістраль гідротестера приєднали до нагнітальної порожнини розподільника, а вихідну магістраль - до гідробака трактора. Далі рукоятку гідротестера встановили в положення «Відкрито», запустили дизель і встановили максимальні обероти колінчастого валу. Важіль діагностованого золотника встановили в положення «Підйом», обертаючи рукоятку гідро тестера, встановили тиск 10 МПа і за показаннями лічильника-витратоміра визначили витрату масла при включеному розподільнику. Потім отриману величину перерахували до наведеної витрати масла  $g_{пр}$  за формулою 3.1 відповідному номінальному швидкієному режиму роботи дизеля.

$$Q_{пр} = Q_{зм} \frac{n_{д}}{n_{зм}} \quad (3.1)$$

де  $Q_{зм}$  - виміряна витрата масла, л / хв;

$n_{зм}$  - виміряна частота обертання колінчастого валу, хв<sup>-1</sup>

$n_{д}$  - частота обертання колінчастого валу дизеля, що відповідає його номінальному режиму, хв<sup>-1</sup> (для МТЗ-80(82)  $n_{д} = 2200$ , для Т-150К  $n_{д} = 2100$ );

Витік в золотниковій парі визначали за формулою:

$$\Delta = Q_{п.н} - Q_{зм} \quad (3.2)$$

де  $Q_{п.н}$  - номінальна подача насоса, л/хв ( для МТЗ-80 (82)  $Q_{п.н} = 45$ , для

Т-150К  $Q_{п.н} = 86$ ).

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

## 4.1 Дослідження фізико-механічних властивостей покриттів

## 4.1.1 Результати випробувань на мікротвердість та визначення найбільш ефективного зміцнюючого матеріалу

Для випробування на мікротвердість були взяті зразки покриттів з ультрананодисперсними частинками  $Al_2O_3$ , BN, TiC, AlN, SiC і  $K_2O_nTiO_2$ . Концентрація порошку – 0,3 г/л. Після нанесення зразки піддавали термодобробці при 400 °С. Мікротвердість вимірювали на металографічних шліфах (рисунки 4.1).

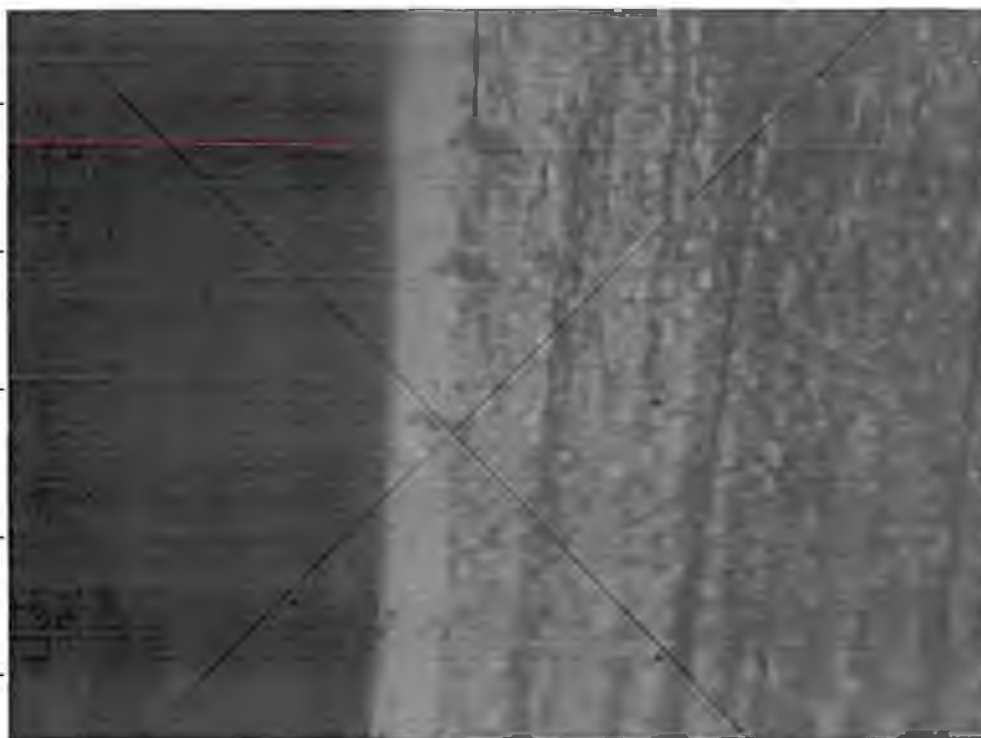


Рисунок 4.1 Шліф зразка з покриттям після вимірювання мікротвердості

Результати вимірювання мікротвердості та товщини отриманих покриттів представили у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Результати вимірювання мікротвердості та товщини композиційних нікелевих покриттів

Матеріал нанодисперсних	Середня величина мікротвердості	Середня товщина, мкм
$Al_2O_3$	910	18
$K_2O_nTiO_2$	882	26
$Al_2O_3 + K_2O_nTiO_2$	927	36
SiC	644	16
TiC	430	18

AlN	360	10
B	610	18
BN	680	17
Покриття без НДП	522	20

З представлених у таблиці 4.1 даних видно, що найбільшою мікро-твердістю і товщиною мають покриття з додаванням НДП оксиду алюмінію та УДП політитанату калію. Це пояснюється, швидше за все, не тільки високою твердістю  $Al_2O_3$ , так як і інші частинки також володіють достатньою твердістю, але і тим, що  $Al_2O_3$  на відміну від карбідів і нітридів більш термостійкий, у звичайних умовах не розкладається і не перетворюється на інші сполуки.

Як відомо, зносостійкі покриття повинні мати підвищену мікротвердість і високі антифрикційні властивості. У зв'язку з цим було запропоновано вводити до складу розчину нікелювання НДП оксиду алюмінію з метою збільшення мікротвердості покриття та УДП політитанату калію для покращення антифрикційних характеристик.

В результаті експериментів була визначена дисперсна фаза, що дозволяє досягти найбільшого, порівняно з аналізованими порошками, підвищення мікротвердості та товщини покриття. Усі наступні експерименти проводили тільки з порошком оксиду алюмінію та політиту ната калію.

## 4.2 Дослідження структури поверхні та складу покриття

### 4.2.1 Результати дослідження структури поверхні покриття

Механічні та експлуатаційні властивості КХЛ залежать від структури матриці, концентрації та властивостей дисперсної фази.

Поверхні чистого та композиційного хімічного покриттів на основі нікелю до термообробки та після представлені на рис 4.5.

Як видно з рис. 4.5, зовнішній вигляд покриттів досить сильно відрізняється. Стандартне (базове) покриття гладке, без будь-яких включень. КХЛ на основі нікелю має велику кількість включень різного розміру по всій поверхні. Причому видно, що процес впровадження частинок відбувається рівномірно, і вони зарощуються на різних стадіях формування покриття.

Проведені дослідження показали, що на поверхні композиційного нікелевого покриття не було виявлено пір, тоді як при звичайному нікелюванні на поверхні були виявлені наскрізні пори (до 5 шт.) на  $0,5 \text{ мм}^2$  (див. рисунок 4.5, а). Відсутність пір у КХЛ свідчить про підвищення його корозійної стійкості.

Крім того, встановлено, що частинки НДП розподіляються у покритті досить рівномірно (див. рис. 4.5 б).

Поверхня композиційного покриття сильно відрізняється від поверхні чистого нікелю, так як ультра- і нанодисперсні частинки, що вводяться в розчин, активізують процес нікелювання і є центрами кристалізації нікелю, що призводить до отримання більш щільної структури, обумовленої мікроскопічною деформацією нікелевої решітки навколо дисперсних частинок.

Після термообробки на поверхні покриття з'являються кольори перебігу (див. Рис. 4.5, *б*) через утворення на ній найтоншої окисної плівки.

Крім поверхні покриттів досліджували торець з'єднання КХП безпосередньо до та після термообробки при температурі  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  протягом 1 год.

Після осадження на зламі покриття виявляється ряд паралельних шарів (рисунок 4.6 *а*). Наявність яскраво виражених шарів можна пояснити зміною концентрації фосфору за товщиною осаду [24]. Крім того, у товщині осаду можна розглянути впроваджені частинки дисперсної фази (рис. 4.6 *б*).

Після термообробки при  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  протягом 1 години шаруватість у нікелевому осаді повністю зникає [24]. На рис. 4.6 *б* видно, що межа між шарами слабо помітна. Це підтверджують дані досліджень вчених [23, 24].

Отже, частинки дисперсної фази, впроваджуючись у покриття, змінюють його структуру, але не порушують звичного перебігу процесу хімічного осадження нікелю.

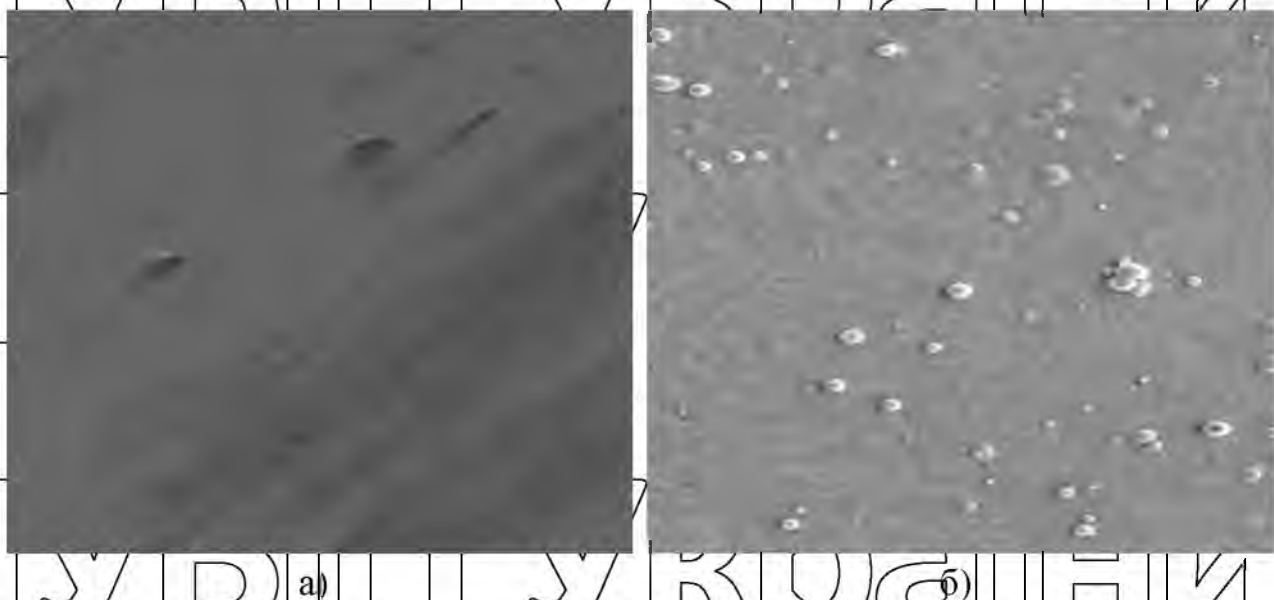


Рисунок 4.5 - Зовнішній вигляд хімічних покриттів на основі нікелю ( $\times 1000$ ):  
*а* - стандартне (базове) покриття; *б* – наноконпозиційне хімічне покриття

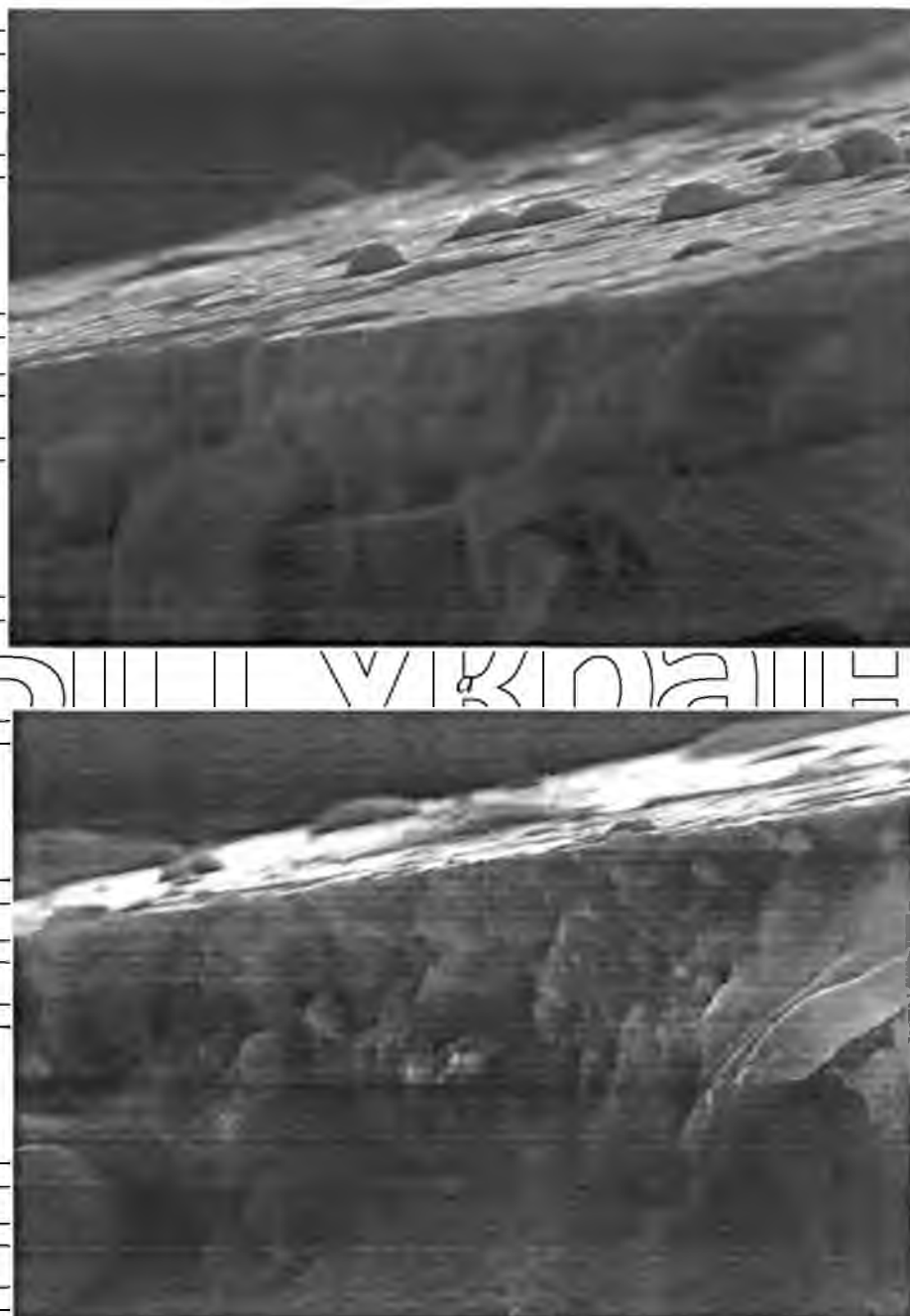


Рисунок 4.6 - Злам КХП (x3000): *а* - до термообробки; *б* - після термообробки

#### 4.2.2 Результати дослідження покриттів

#### Результати дослідження якісного та кількісного складу покриттів

Для перевірки впровадження частинок у покриття та визначення кількості алюмінію та політитанату калію в композиційному покритті було проведено спектральний аналіз нікельованих зразків.

В результаті аналізу були отримані спектрограми чистого та композиційного покриттів на основі нікелю (рисунок 4.7), за якими було розраховано вміст елементів у кожному з них (таблиця 4.2). Вміст елементів, які

наведені у таблиці 4.2, - трохи більше 0,05 %.

Як видно з представлених даних, композиційне покриття, крім нікелю, фосфору та натрію містить алюміній, калій, титан. Це підтверджує те, що ультра-і нанодисперсні частинки впроваджуються в покриття.

Таблиця 4.2 - Зміст основних елементів у покриттях, %

Елемент у покритті	Вміст елементів у покритті, %	
	нйстому (базовому)	композиційно
N	64,07	57,19
P	14,83	10,56
Na	2,12	2,2
K	-	2,4
Ti	-	20,35
Pro	-	6,59
Al	-	1,24

#### 4.3 Результати лабораторних випробувань на зносостійкість

Випробування на зносостійкість проводили відповідно до методики, представленої в розділі 3. Результати випробувань зразків, покритих композиційним та чистим нікелевим покриттям, представлені на рисунках 4.8-4.9.

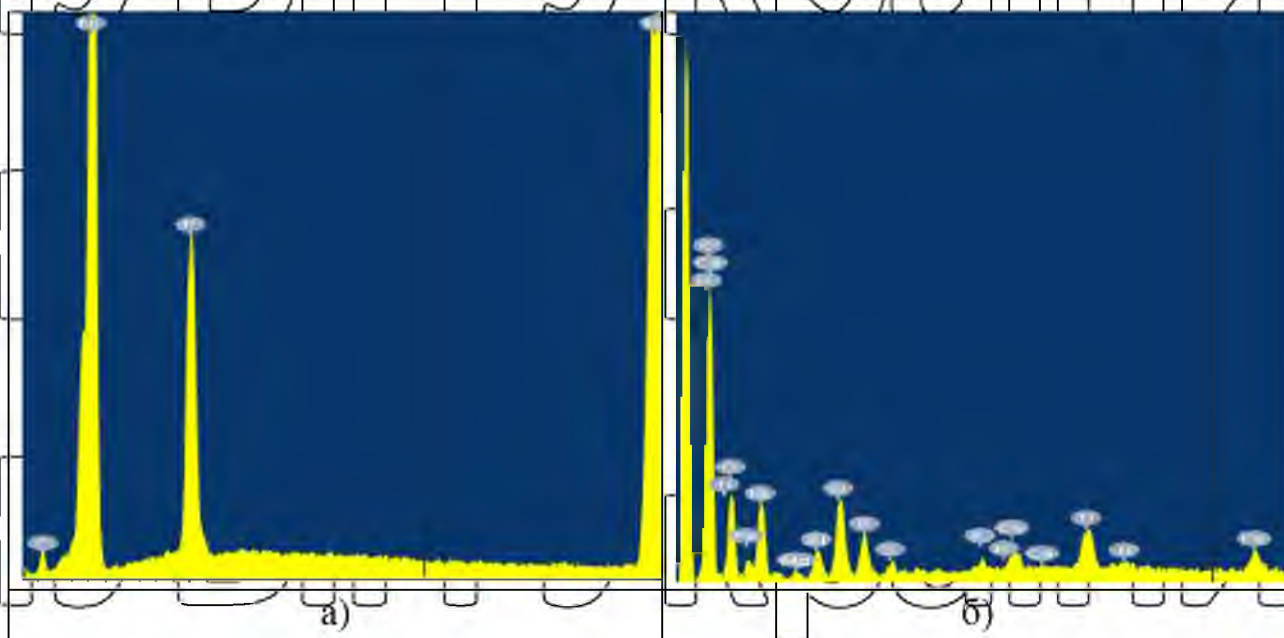


Рисунок 4.7 - Спектрограми чистого (а) та композиційного (б) покриттів на основі нікелю.

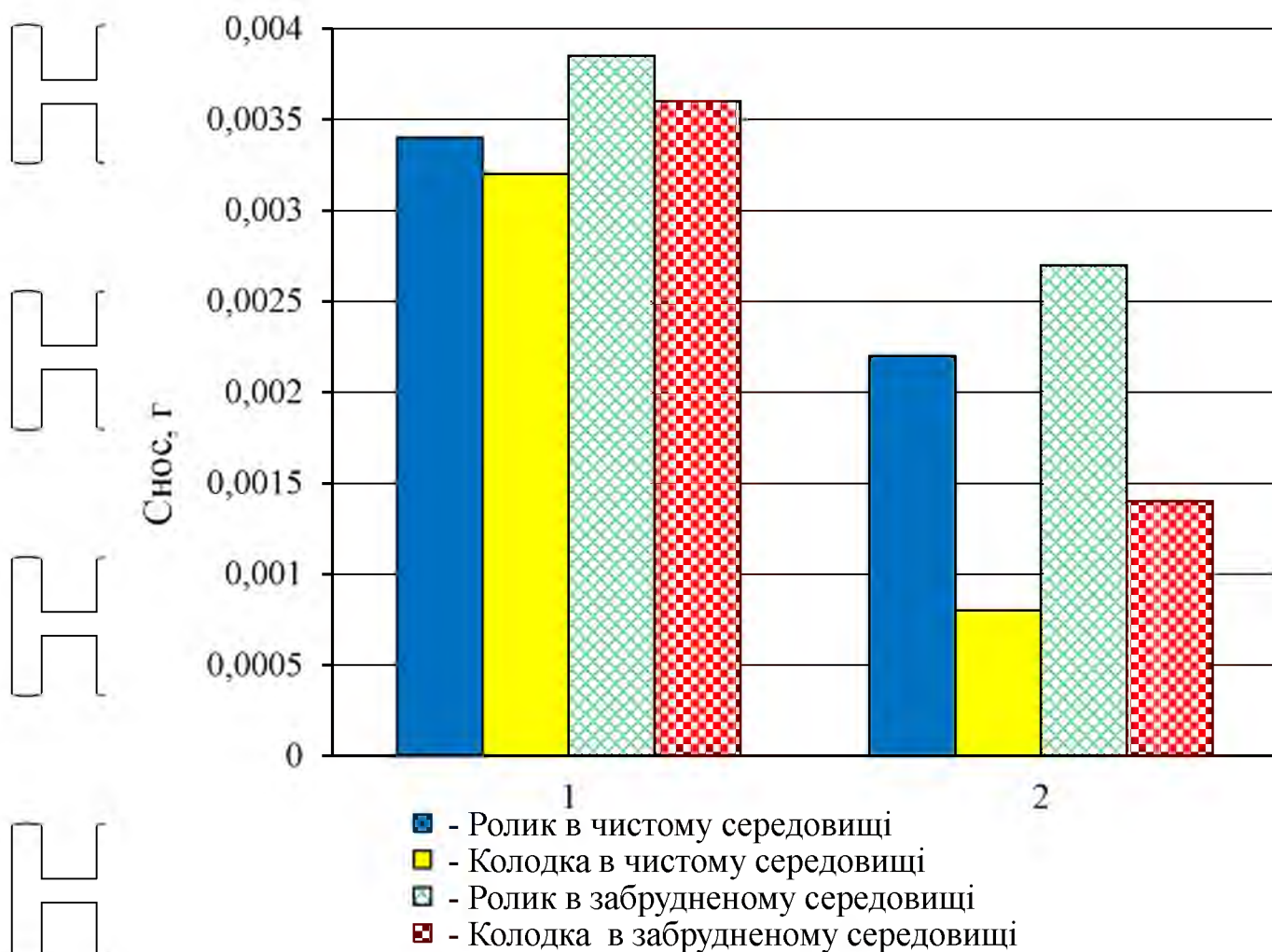


Рисунок 4.8 - Зношування зразків у процесі випробування на зносостійкість:

1 - базове покриття на основі нікелю  
 2 - ультра- та нанокompозиційне покриття на основі нікелю

Мінімальний знос по масі спостерігається у ролика з композиційним хімічним покриттям на основі нікелю при випробуванні на чистому індустріальному маслі, і становить 2,2 мг, тоді як знос у зразка з базовим покриттям - 3,4 мг. Таким чином, знос за масою зразків з КХП при випробуванні в 1,5 рази менше, ніж знос зразків з нікелевим покриттям без додавання частинок (див. рисунок 4.8). При випробуванні на забрудненій олії масове зношування ролика з композиційним покриттям на основі нікелю в 1,4 рази менше, ніж у ролика з базовим покриттям.

Крім того, при випробуванні КХП було помічено зниження моменту тертя в 1,2 рази по відношенню до базового покриття (див. рисунок 4.9). Значна зносостійкість КХП на основі нікелю пояснюється високою мікротвердістю таких покриттів, а також особливостями їхньої структури.

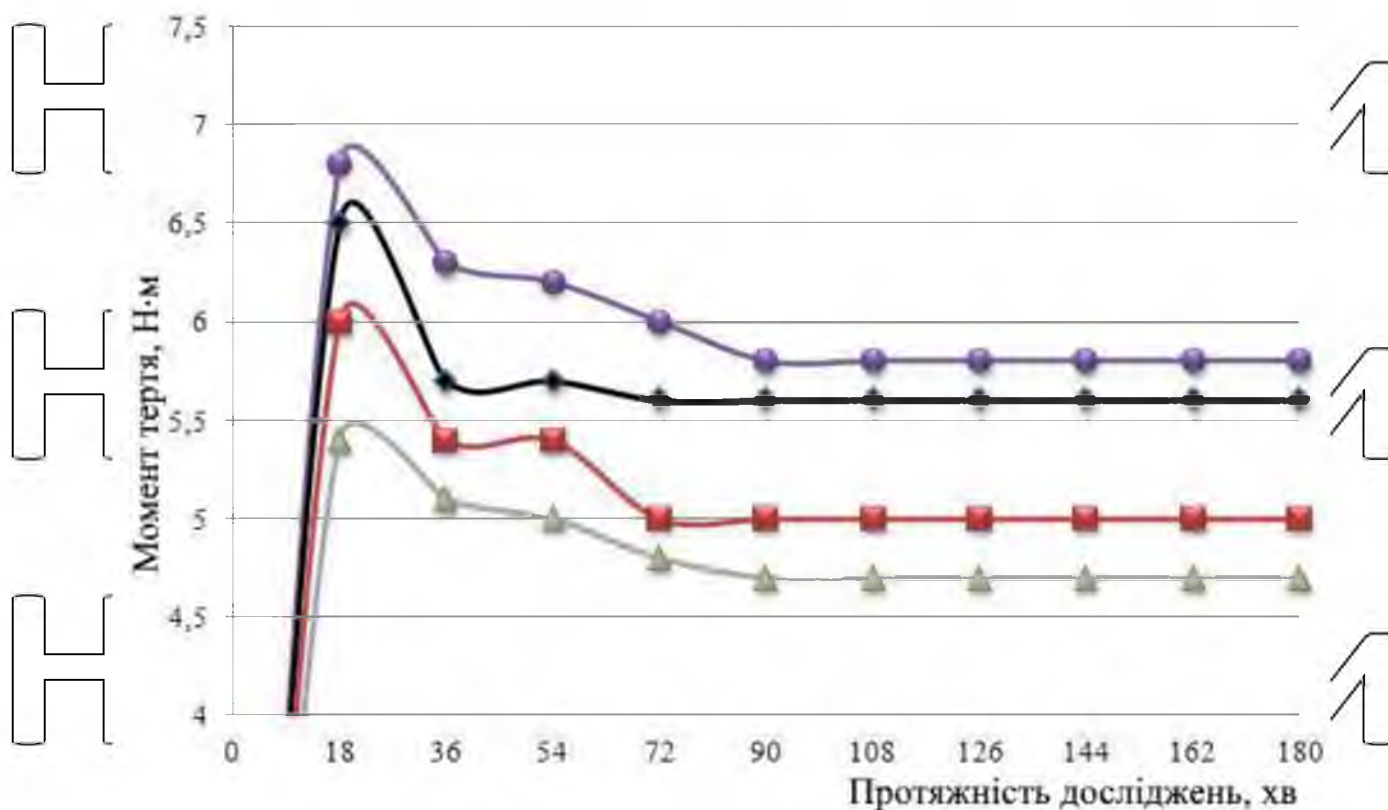


Рисунок 4.9 - Зміна моменту тертя у процесі випробування:

- - базове покриття на забрудненому мастилі;
- - композиційне покриття на забрудненому мастилі;
- ◆ - базове покриття на чистому мастилі;
- ▲ - композиційне покриття на чистому мастилі.

Зокрема, відсутність пір і рівномірний розподіл частинок у покритті сприяє тому, що не відбувається сколювання його поверхні в результаті взаємодії з тілом, що сполучається.

Крім цього, було зафіксовано зниження зносу по масі біля колодки, що працює в контакт з роликом на який нанесено КХП (див. рис. 4.8). Зношування колодки, що працює по ролику з КХП при випробуванні на чистому мастилі, в 4 рази менше, ніж колодки, що працює по ролику з базовим покриттям нікелю, і в 2,2 рази менше - при випробуванні на забрудненому мастилі. Це пояснюється найімовірніше, впровадженням частинок політитаната калію в покриття. Політитанат калію за своїми властивостями не поступається  $\text{MoS}_2$  і має гарні антифрикційні характеристики.

Таким чином, КХП на основі нікелю в порівнянні з чистим нікелевим покриттям має підвищену зносостійкість і хороші антифрикційні характеристики за рахунок рівномірного впровадження частинок з високою твердістю і антифрикційними властивостями.

#### 4.4 Результати корозійних випробувань

Як зазначалося в розділі 1, великий вплив на знос золотників надає корозія, під дією якої знижуються міцність і пластичність поверхні металу, погіршуються фрикційні властивості деталей.

Результати корозійних випробувань наведено у таблиці 4.3. У результаті проведених випробувань на корозійну стійкість було встановлено, що зменшення маси зразків з КХП на основі нікелю, в середньому становило 0,32 г, а у зразків з чистим хімічним нікелем - 0,58 г, що в 1,8 раза менше.

Таблиця 4.3 – Результати корозійних випробувань

Зразок	Маса зразка до випробування, г	Маса зразка після випробування, г
З базовим покриттям	51,1	50,52
З композиційним покриттям	53,45	53,12

Збільшення корозійної стійкості композиційного покриття можна пояснити так. Оскільки корозійні процеси починаються на відкритих поверхнях, то більш щільна структура, обумовлена мікропластичними деформаціями матриці навколо дисперсних частинок, перешкоджатиме поширенню корозії в глибину покриття за рахунок відсутності в ньому тріщин і пір. Крім того, процес руйнування металу супроводжується виникненням електричного струму, що протікає між анодними і катодними ділянками металу. Тому на збільшення корозійної стійкості композиційного покриття впливає також природа дисперсних частинок. Оскільки нано- та ультрадисперсні частинки оксиду алюмінію та полі- титанату калію електронейтральні, то вони будуть збільшувати корозійну стійкість покриття за рахунок створення перешкод (електричний опір) для поширення корозійного струму.

#### 4.5 Результати стендових випробувань

Працездатність гідророзподільника в процесі прискорених стінових - випробувань характеризувалася величиною витоків у золотниковій парі.

Значення граничного витoku в парі «золотник - корпус» при робочому тиску у системі має перевищувати 25 див<sup>3</sup>/хв [96,100].

Результати стендових випробувань представлені рис. 4.11.

З отриманих даних видно, що після закінчення випробувань витoku в серійній золотниковій парі перевищили допустиме значення. У золотниковій парі, відновленій композиційним хімічним нікелюванням, величина витоків у 1,4 рази менша, ніж у серійної, і в 1,3 рази менша, ніж у пари відновленої

залізненням. Пояснюється це більш високою зносостійкістю та підвищеними антифрикційними характеристиками композиційного нікелевого покриття.



Рисунок 4.11 Величина витоків внаслідок стендових випробувань золотникової пари.

#### 4.6 Результати експлуатаційних випробувань

Результати експлуатаційних випробувань - заключний показник характеризує працездатність відновлених деталей. Відновлені композиційним покриттям золотники встановлювали в корпуси гідророзподільника Р80. Порівняння проводили з новими гідророзподільниками. Відремонттованих розподільників встановлювали на трактори МТЗ-80 (82), Т-150К, умови роботи тракторів ідентичні (рисунок 4.12). В середньому напрацювання гідророзподільників склало 842 год. За період випробувань відмов у роботі серійних та досвідчених гідророзподільників не спостерігалося. Розмір витонів перебувала межах регламентованих ТУ З. У 00235814-002-93.

НУБІП України

НУБІП України



Рисунок 4.12 Гідроподільник Р80 із золотниками, відновленими ультра- та наноконпозиційним нікелюванням, при експлуатаційних випробуваннях.

#### 4.6.1 Прогнозування міжремонтного ресурсу гідророзподільників із золотниками, відновленими ультра- та наноконпозиційним нікелюванням

При прогнозуванні міжремонтного ресурсу відремонтованих гідророзподільників використовували метод визначення залишкового ресурсу згідно з ГОСТ 21571-76 «Методи визначення відхилення параметра технічного стану, що допускається, і прогнозування залишкового ресурсу складових частин агрегатів машин».

Манічи початкове значення витоків у відремонтованому розподільнику, а також величину витоків, що визначається шляхом діагностування в момент виконання прогнозу, розраховують залишковий ресурс

$$T_{заг} = t \left[ \left( \frac{x_n - x_{рем}}{x(t) - x_{рем}} \right)^\alpha - 1 \right] \quad (4.1)$$

де  $t$  — напрацювання розподільника з моменту експлуатації, мото-год;  
 $x_n$  — гранична величина витоків у зазорах золотникових пар, що характеризує вихід з ладу розподільника,  $\text{см}^3/\text{хв}$  ( $x_n = 25 \text{ см}^3/\text{хв}$ );

$x_{рем}$  — величина витоків у відремонтованому розподільнику на початку експлуатації,  $\text{см}^3/\text{хв}$  ( $x_{рем} = 2,5 \text{ см}^3/\text{хв}$ , визначається за методикою, описаною в 3 розділі);

$x(t)$  — величина витоків після 842 мото-год,  $\text{см}^3/\text{хв}$  ( $x(t) = 7 \text{ см}^3/\text{хв}$ );

$\alpha$  — показник функції, що характеризує зміну величини витоків (для

лінійного характеру зміни  $\alpha = 1$ )

Залишковий ресурс становив  $T_{\text{за}} = 3368$  мото-год. Повний ресурс експериментальних гідророзподільників:

$$T_{\text{п}} = t + T_{\text{злв}} \quad (4.2)$$

Таким чином, прогнозований міжремонтний ресурс розподільника із золотниками, відновленими ультра- та нанокompозиційним нікелюванням, складе не менше 4210 мото-годин при заявленому заводом-виробником 3500 мото-год. Прогнозований ресурс відремontованого гідророзподільника становитиме 120% від нового ресурсу. Теоретична залежність контрольованих параметрів від напрацювання представлена на рис. 4.13.117

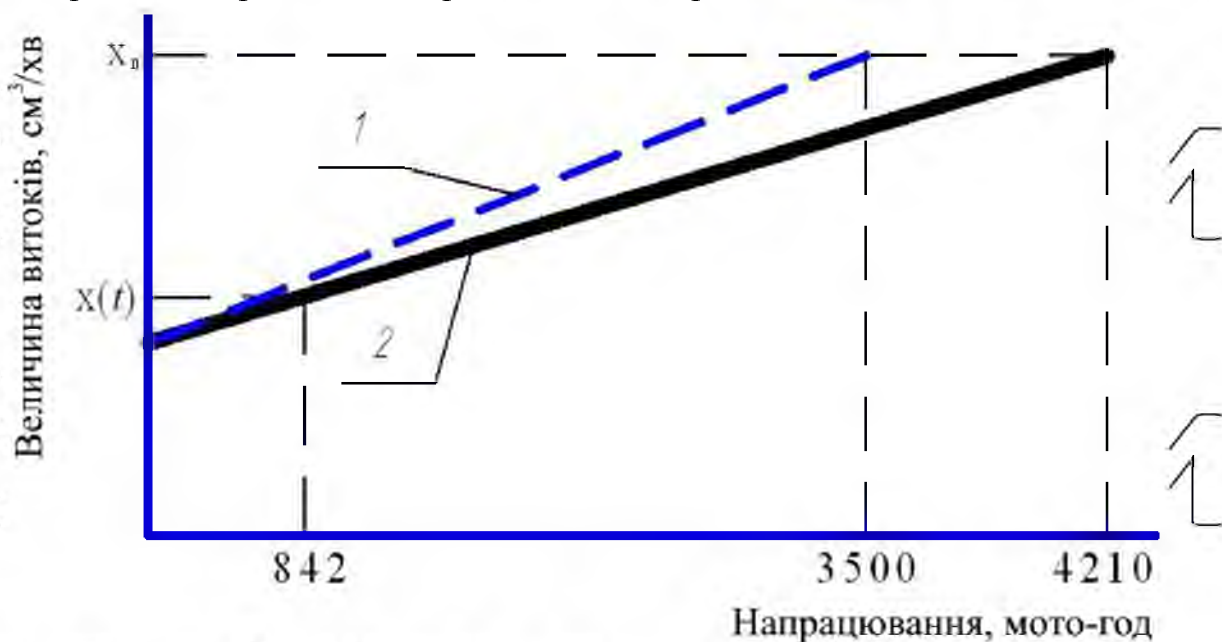


Рисунок 4.13 - Середнє значення прогнозованого ресурсу відремontованого розподільника: 1 - укомплектованого серійними золотниками; 2 - укомплектованого експериментальними золотниками

## РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІДНОВЛЕННЯ ЗОЛОТНИКІВ ГІДРОРОЗПОДІЛЬНИКА Р80 УЛЬТРА І НАНОКОМПОЗИЦІЙНИМ ХІМІЧНИМ НІКЕЛЮВАННЯМ

Економічну ефективність впровадження технології відновлення золотників гідророзподільника Р80 композиційним хімічним нікелюванням з додаванням ультра- та наноконпозиційних частинок враховували за формулою:

$$E = \left[ (C_1 + E_n K_1) \frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n} - (C_2 + E_n K_2) \right] A_2, \quad (5.1)$$

де  $C_1, C_2$  - собівартість деталі сполучення, відновлених відповідно - залізненням і композиційним нікелюванням, грн. на деталь;

$K_1, K_2$  - питомі капітальні вкладення придбання і встановлення ремонтно-технологічного устаткування що у існуючому і запропонованому технологічних процесах, грн. на деталь;

$E_n$  - нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень,  
 $E_n = 0,15$ ;

$P_1, P_2$  - величини, обернені ресурсу сполучення, відновлених існуючої та пропонованої технології;

$A_2$  - річний обсяг відновлення деталей композиційним хімічним нікелюванням, шт.

При визначенні економічної ефективності приймали наступний режим роботи ділянки з відновлення золотників гідророзподільника Р80: кількість робочих змін - 1, тривалість зміни - 8 год, кількість робочих днів у тижні - 5, тривалість робочого тижня - 40 год, кількість робочих днів на рік - 250.

Річний обсяг відновлення золотників пропонованої технології визначали за формулою:

$$A_2 = A_1 K_{\max}^{\text{II}} \quad (5.2)$$

де  $A_1$  - річна програма капітального ремонту гідророзподільника, шт;  
 $K_{\max}^{\text{II}}$  - найбільший коефіцієнт повторюваності дефекту відновлюваного композиційним хімічним нікелюванням.

Річний обсяг відновлення гідророзподільників:  $A_1 = 45$  шт. Найбільший коефіцієнт повторюваності дефекту, що відновлюється пропонованої технології:

$K_{\max}^{\text{II}} = 0,90$ . Тоді річний обсяг відновлення деталей композиційним хімічним нікелюванням:

$$A_2 = 45 \cdot 0,9 = 27 \text{ шт}$$

Величини, обернені ресурсу сполучень, відновлених існуючою і

запропонованою технологіям, вираховували із співвідношення:

$$P_1 = \frac{T_1}{W_1}, \quad P_2 = \frac{T_2}{W_2}, \quad (5.3)$$

де  $W_1, W_2$  - середні міжремонтні ресурси сполучення відновлених за існуючою та запропонованою технологіями.

Для тракторів, забезпечених гідророзподільниками типу Р80 середньорічне напрацювання становить  $T = 1000$  мото-год. Середні міжремонтні ресурси сполучень, відновлених залізненням і композиційним

Келюванням рівні:  $W_1 = 3500$  мото-год,  $W_2 = 4210$  мото-год. Звідси:

$$P_1 = \frac{1000}{3500} = 0,4 \quad P_2 = \frac{1000}{4210} = 0,33$$

Собівартість відновлення золотників за існуючою і запропонованою технологіям знаходили за рівнянням:

$$C = C_{зн} + C_M + C_{тз} + C_{ел} + C_a + C_3 + C_i \quad (5.4)$$

де  $C_{зн}$  - весті виробничих робочих з нарахуваннями, грн.;

$C_M$  - вартість матеріалів, грн.;

$C_{тз}$  - транспортно-заготівельні витрати, грн.;

$C_{ел}$  - Витрати на електроенергію, грн.;

$C_a$  - Витрати на амортизаційні відрахування, грн.;

$C_3$  - заводські витрати, грн.;

$C_i$  - інші витрати, грн.

Заробітну плату виробничим робітникам розраховували за формулою:

$$C_{зн} = C_{осн} + C_{доп} + C_{сс} \quad (5.5)$$

де  $C_{осн}$  - основна заробітна плата виробничих робітників, грн.;

$C_{доп}$  - додаткова заробітна плата, грн.;

$C_{сс}$  - відрахування на соціальні потреби, грн.

Основна заробітна плата виробничих робітників, зайнятих у існуючому - технологічному процесі складала:  $C_{осн}^1 = 50 \text{ грн.}$

Основну заробітну плату виробничих робітників, зайнятих у запропонованому технологічному процесі розраховували виходячи з норм часу на виконання операцій та діючої тарифної сітки

$$C_{осн}^2 = C_{т.в.}^2 \cdot T_{шт}^2 \quad (5.6)$$

де  $C_{т.в.}^2$  - годинна тарифна вартість виконуваної роботи, грн.;

$T_{шт}^2$  - штучний час відновлення одного золотника, год.

Усі роботи з відновлення деталей композиційним хімічним нікелюванням виконували робітники четвертого та п'ятого розрядів, для яких годинна тарифна

ставка становила  $C_{т.в.}^2 = 35$  грн./год. Штучний час відновлення одного золотника:  $T_{шт}^2 = 1,32$  год. Звідси основна заробітна плата:

$$C_{осн}^2 = 1,32 \cdot 35 = 46,2 \text{ грн}$$

Додаткову заробітну плату розраховували за виразом:

$$C_{доп} = C_{осн} \cdot 0,1, \quad (5.7)$$

$$C_{доп}^1 = 50 \cdot 0,1 = 5,5 \text{ грн}$$

$$C_{доп}^2 = 46,2 \cdot 0,1 = 4,62 \text{ грн}$$

Відрахування на соціальні потреби обчислювали за такою формулою:

$$C_{с.н} = 0,26(C_{доп} + C_{осн}), \quad (5.8)$$

$$C_{с.н}^1 = 0,26(50 + 5,5) = 14,43 \text{ грн},$$

$$C_{с.н}^2 = 0,26(46,2 + 4,62) = 13,5 \text{ грн},$$

Заробітна плата виробничих робітників, зайнятих у існуючому та запропонованому технологічних процесах, дорівнює:

$$C_{з.н}^1 = 50 + 5,5 + 14,43 = 69,93 \text{ грн},$$

$$C_{з.н}^2 = 46,2 + 4,62 + 13,5 = 64,32 \text{ грн},$$

Витрати матеріали розраховуються за формулою:

$$C_m = \sum M_i \cdot C_i, \quad (5.9)$$

де  $M_i$  – витрата матеріалів, кг;

$C_i$  – Вартість застосовуваних матеріалів, грн.

Витрати на матеріали, що витрачаються на відновлення золотників залізницею та хімічним нікелюванням, представлені в таблицях 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – Матеріали, що застосовуються для відновлення золотників існуючою технологією

найменування матеріалу	Норма на виріб	Ціна	Ціна виробу, грн.
Мадапалам	0,24 м <sup>2</sup>	35 грн./м <sup>2</sup>	8,4
Лабомід	0,6 кг	10 грн./кг	6
СОЖ	2 л	13,5 грн./л	27
Хлориде залізо	5 г	490 грн./кг	2,4
Соляна кислота	0,3 г	82 грн./кг	0,02
Силікат натрію	0,1 г	58 грн./кг	0,04
Разом			144

Транспортно-заготівельні витрати:

$$C_{т.з} = 1,2C_{зал}, \quad (5.10)$$

де  $C_{зал}$  - залишкова вартість ремонтного фонду, грн.

Таблиця 5.2 - Матеріали, що застосовуються для відновлення золотників запропонованою технологією

Найменування матеріалу	Норма на виріб	Ціна	Ціна виробу, грн.
Хлористий нікель	4,4 г	73,16 грн./кг	0,32
Сірчана кислота	0,09 г	25,84 грн./кг	0,002
УДП політитанату калію та оксиду алюмінію	0,27 г	3000 грн./кг	0,81
Їдкий натр	4,63 г	28,8 грн./кг	0,13
Натрій янтарнокислий	2,75 г	19,37 грн./кг	0,05
Скло натрієве рідке	0,88 г	32,8 грн./кг	0,03
Гілофосфіт	4,63 г	49,56 грн./кг	0,23
Перхлорвінілова емаль	100 г	20 грн./кг	2
Вода дистильована	1 л	10 грн./л	10
Мадапалам	0,18 м <sup>2</sup>	35 грн./м <sup>2</sup>	6,3
Дабомід	0,3 кг	10 грн./кг	3
ЕОЖ	1 л	13,5 грн./л	13,5
Разом			36,37

Залишкова вартість ремонтного фонду:

$$C_{зал} = 0,03 \cdot C_n, \quad (5.11)$$

де  $C_n$  - вартість нового золотника, грн.

Середня вартість нового золотника за цінами 2022 становить:

$C_n = 850$  грн., Тоді залишкова вартість:  $C_{зал} = 25,5$  грн., А транспортно - заготівельні витрати складуть:  $C_{тз} = 30,6$  грн.

Технологічне обладнання, що застосовується при відновленні золотників у існуючому та запропонованому технологіями наведено в таблиці 5.3

Таким чином, вартість обладнання, що застосовується в поточній і запропонованому технологічних процесах:  $C_0^1 = 416427$  грн,  $C_0^2 = 357446$  грн.

Потужність споживачів енергії:  $P^1 = 94$  кВт,  $P^2 = 34$  кВт

Таблиця 5.3 - Устаткування, що застосовується при відновленні золотників

існуючої та пропонованої технології

Найменування обладнання	Кількість, шт		Потужність, кВт	Вартість одиниці обладнання, грн.
	Існуючий	Пропонований		
Машина мийна	1	1		112000
Ванна мийна	1	2	-	12545
Стіл для дефектації деталей	1	1	-	21125
Верстат шліфувальний	1	0	4,00	135420
Верстат довідковий 3A833	0	1	4,00	105000
Верстат слюсарний	1	1	-	7785
Скриня для обтиральних - матеріалів	1	1		1082
Муфельна піч СНОЛ 12/16	0	1	30	47409
Випрямляч ВАК-12/6-1600 УЧ	1	0	48	93470
Ванна для знежирення	1	1	-	15000
Ванна	1	0	-	18000
Ванна для нікелювання власного виготовлення	0	1	10	35500
Разом			Існуюча технологія	416427,00
			Пропонована технологія	357446,00

Витрати на електроенергію розраховували за такою формулою:

$$C_{ел} = \frac{P \cdot \Delta t_{ел} \cdot K_c \cdot T_n}{A_e} \quad (5.12)$$

де  $P$  – потужність силових споживачів електроенергії відповідно, кВт;

$\Delta t_{ел}$  - вартість 1 кВт електроенергії, грн./кВт-год ( $\Delta t_{ел} = 2,34$  грн./кВт-год);

$T_n$  - середньорічне споживання електроенергії, год ( $T_n = 50$  год);

$K_c$  - коефіцієнт попиту, що враховує завантаження та ККД силового обладнання,  $K_c = 0,75$ .

$$C_{el}^1 = \frac{94 \cdot 2,34 \cdot 0,75 \cdot 50}{27} = 305,5 \text{ грн.}$$

$$C_{el}^2 = \frac{34 \cdot 2,34 \cdot 0,75 \cdot 50}{27} = 110,5 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизаційні відрахування обчислювали за такою формулою:

$$C_a = \frac{0,08 C_o}{A_2}, \quad (5.13)$$

де  $C_o$  - балансова вартість обладнання, грн.;

$$C_a^1 = \frac{0,08 \cdot 416427}{27} = 3053,8 \text{ грн.}$$

$$C_a^2 = \frac{0,08 \cdot 357446}{27} = 2621,3 \text{ грн.}$$

приймаємо у розмірі 350%:

$$C_3 = 3,5 C_{zn}, \quad (5.14)$$

Тоді заводські відрахування на існуючий та запропонований технологічні процеси складуть:

$$C_3^1 = 2 \cdot 69,93 = 139,86 \text{ грн.};$$

$$C_3^2 = 2 \cdot 64,32 = 128,65 \text{ грн.}$$

Інші відрахування розраховуються за такою формулою:

$$C_n = 0,15 C_m, \quad (5.15)$$

Інші відрахування на існуючі та запропоновані технологічні процеси складуть:

$$C_n^1 = 0,15 \cdot 44 = 6,6 \text{ грн.};$$

$$C_n^2 = 0,15 \cdot 36,37 = 5,45 \text{ грн.}$$

Собівартість відновлення одного золотника за існуючою та запропонованою технологіями, згідно з формулою (5.4), склали:

$$C^1 = 69,93 + 44,0 + 30,6 + 305,5 + 139,8 + 6,6 = 596,4 \text{ грн.};$$

$$C^2 = 64,32 + 36,4 + 30,6 + 110,5 + 128,6 + 5,45 = 375,9 \text{ грн.}$$

Питомі капітальні вкладення:

$$K = \frac{C_p}{A_2}, \quad (5.16)$$

Питомі капітальні вкладення в існуючий та запропонований технологічні процеси рівні:

$$K^1 = \frac{416427}{27} = 15423,22 \text{ грн.};$$

$$K^2 = \frac{357446}{27} = 13238,74 \text{ грн.}$$

Для порівняння економічної ефективності капітальних вкладень

розрахувати показник мінімуму наведених витрат за формулою:

$$C_i + E_H \cdot K_i \rightarrow \min \quad (5.16)$$

Показник мінімуму наведених витрат у існуючій та запропонованій технологічній процесі склав:

$$596,4 + 0,15 \cdot 15423,22 = 2909,9 \text{ грн.};$$

$$375,9 + 0,15 \cdot 13238,74 = 2361,7 \text{ грн.}$$

Економічну доцільність ремонту розраховали за такою формулою:

$$\frac{C_H - C_{зд}}{T_H} \geq \frac{C_P + E_H \cdot K_U}{T_P} \quad (5.17)$$

$$\frac{850 - 25,5}{5000} \geq \frac{375,9 + 0,15 \cdot 1323,7}{5500}$$

$$0,165 \geq 0,104$$

Оскільки умова нерівності виконується, ремонт вважається економічно доцільним.

Економічний ефект від впровадження запропонованого технологічного процесу, згідно з формулою (5.1), склав:

$$E = \left[ (596,4 + 0,15 \cdot 15421,2) \cdot \frac{0,4 + 0,15}{0,33 + 0,15} - (375,9 + 0,15 \cdot 13231,7) \right] \cdot 27 = 26277,38 \text{ грн.}$$

Термін окупності додаткових капітальних вкладень визначали за виразом [96]:

$$T_o = \frac{K_d}{E}$$

де  $K_d$  - додаткові капітальні вкладення, які включають витрати на обладнання для нікелювання: робочу ванну - 3550 грн, мийні ванни - 2 · 12545 = 25090 грн., Ванну для знежирення - 15000 грн. та довідковий верстат - 10500 грн.

$$K_d = 3550 + 25090 + 15000 + 10500 = 40640,0 \text{ грн.}$$

$$T_o = \frac{40640,2}{26277,4} = 1,54 \text{ роки}$$

## ВИСНОВОК

1. Аналіз літературних даних показав, що у гідравлічну систему тракторів припадає до 24 % відмов від їх загального числа. Однією з основних причин низької надійності гідравлічної системи є низький ресурс гідророзподільників. Існуючі способи відновлення золотникових пар трудомісткі і забезпечують їх заданого ресурсу.

2. Теоретично обґрунтовано підвищення ресурсу золотників відновлених композиційним хімічним покриттям на основі нікелю. Оптимальні режими нанесення композиційного хімічного покриття на основі нікелю та склад розчину-суспензії, визначені за допомогою математичного планування експерименту, дозволили отримати покриття з мікротвердістю до 10 ГПа.

3. Дослідженнями поверхневого шару композиційного покриття - встановлено, що ультра- та нанодисперсні частинки впроваджуються в нього. За допомогою маспектрального аналізу зразків виявлено, що композиційне покриття на основі нікелю містить 1,24% алюмінію, 2,4% калію, 20,35% титану, тоді як у базовому нікелевому покритті такі речовини відсутні.

Трибологічні випробування нікельованих зразків показали, що з ніс зразків, на які нанесено композиційне покриття на основі нікелю, в 1,4 - 1,5 рази менше, ніж зразків із чистим покриттям нікелю.

Випробування на корозійну стійкість встановлено, що зразки з наноконпозиційним нікелевим покриттям мали корозійну стійкість у 1,8 рази вищу, ніж зразків з базовим нікелевим покриттям.

4. Запропоновано технологію відновлення сполучення «золотник - корпус» гідророзподільника ультра- та наноконпозиційним хімічним нікелюванням.

Стендовими випробуваннями визначили, що в золотникових парах відновлених наноконпозиційним хімічним нікелюванням, величина витоків у 1,4 раза менша, ніж у серійних, і в 1,3 раза менша, ніж у пар відновлених за існуючою технологією (залізненням).

5. Експлуатаційні випробування показали, що при напрацюванні 842 мото-год. відмов через знос золотникових пар не виявлено. Прогнозований ресурс відремонтованого гідророзподільника на 20 % вищий за ресурс нового. Річний економічний ефект від впровадження розробленої технології відновлення золотників композиційним хімічним нікелюванням при річній виробничій програмі 27 шт. становив понад 25 тис. грн.

НУБІП України

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Абдулін, І. А. Композиційні покриття з полімерною матрицею / І. А. Абдулін, Г. Г. Богатєєв, А. Б. Касімов, //: КДТУ. - 2004. - С. 18.
2. Авдєєв, М. В. Технологія ремонту машин та обладнання / М. В. Авдєєв, Є. Л. Воловик, І. Є. Ульман. - М.: Агропромиздат, 1986. - 247 с.
3. Адлер, Ю. П. Планування експерименту при пошуку оптимальних умов. / Ю. П. Адлер, Є. В. Маркова, Ю. В. Грановський. - М.: Наука, 1986. - 128 с.
4. Антипов, В. В. Знос прецизійних деталей та порушення характеристик гідравлічної апаратури тракторів / В. В. Антипов. - М.: Машино будова, 1992. - 184 с.
5. Антропов, Л. І. Композиційні електрохімічні покриття / Л. І. Антропов, Ю. Н. Лебединський. - Київ: Техніка, 1989. - 200 с.
6. Артем'єв, Ю. Н. Якість ремонту та надійність машин у с/г / Ю. Н. Артем'єв. - М.: Колос, 1991. - 239 с.
7. Астров, Є. І. Плаковані багат шарові метали. / Є. І. Астров. - М.: Металургія, 1985 - 239 с.
8. Ачкасов, К. А. Прогресивні способи ремонту сільськогосподарської техніки / К. А. Ачкасов. - 2-ге вид., перераб. та дод. - М.: Колос, 1992. - 271 с.
9. Баймаков, Ю. В. Електроліз у металургії: навчальн. посібник для втузів / Ю. В. Баймаков. - М.: Металургіздат, 1986.
10. Барішев, В. І. Підвищення надійності та довговічності гідросистем тракторів в експлуатації / В. І. Барішев. - Челябінськ, 1990.
11. Батищев, А. М. Ресурсозберігаюча технологія відновлення деталей - гальванічними покриттями / О. М. Батищев // Дисс. докт. техн. наук. - М.: МІСН, 1992. 53 с.
12. Батищев, А. М. Відновлення деталей сільськогосподарської техніки / А. М. Батищев, І. Г. Голубєв, В. П. Лялькін. - М.: Інформагротех. 1995. 295 с.
13. Бахтіаров, Н. І. Технологія обробки прецизійних пар / Н. І. Бахтіаров, В. Є. Логінов. - М.: Машигіз, 1989. - 287 с.
14. Бахтіаров, Н. І. Підвищення надійності роботи прецизійних пар / Н. І. Бахтіаров, В. Є. Логінов, Н. І. Лиханов. - М.: Машинобудування, 1985. - 286 с.
15. Борисенко, А. І. Отримання композиційних покриттів методом хімічного осадження / О. І. Борисенко, І. В. Гусєв. - Л.: Наука. - 1995. - 56 с.
16. Бородин, І. Н. Порошкова гальванотехніка / І. Н. Бородин. - М.: Машинобудування, 1990. - 218 с.
17. Бородин, І. Н. Зміщення деталей композиційними покриттями / І. Н. Бородин. - М.: Машинобудування, 1982. - 141 с.
18. Браутман, Л. А. Композиційні матеріали / Л. А. Браутман, Р. В. Крок. -

М.: Світ, 1981. - 672 с.

19. Вандишев, В. А. Відновлення зношених деталей будівельних машин композиційними електролітичними покриттями на основі хрому з метою підвищення їх довговічності та надійності / В. А. Вандишев. - Київ, 1973. - 186 с.

20. Ванснівська, К. М. Металеві покриття, нанесені хімічним способом. / К.М. Ванснівська. - М: Машинобудування, 1995. - 46 с.

21. Веденякін, Г. В. Методика експериментального дослідження та обробки дослідних даних / Г. В. Веденякін. - М.: Колос, 1983. - 200 с.

22. Воловик, Є. Л. Довідник з відновлення деталей / Є. Л. Воловик. - М.: Колос, 1981. - 351 с.

23. Вишеньков, С. А. Хімічні та електрохімічні способи осадження металопокриттів / С. А. Вишеньков. - М.: Машинобудування, 1985. - 312 с.

24. Вишеньков, С. А. Підвищення надійності та довговічності деталей машин хімічним нікелюванням / С. А. Вишеньков, С. В. Каспарова. - М.: Машгіз, 1989. - 207 с.

25. Гаврилюк, К.М. Обґрунтування оптимальної геометрії розмірів деталей прецизійних пар для селективного складання в умовах ремонту / К.М. Гаврилюк. - М., 1983. - (Праці / ДЕРЖАННЯ; т.38). - 1973.

26. Газове зварювання та напавлення кольорових металів та сплавів. / Т. А. Асінювська [та ін.]. - М.: Машинобудування, 1984. - 118 с.

27. Голованенко, С. А. Виробництво біметалів / С. А. Голованенко, Л. В. Меандров. - М.: Металургія, 1986. - 304 с.

28. Горбунова, К. М. Фізико-хімічні основи процесу хімічного нікелювання. / К. М. Горбунова, А. А. Нікіфорова, - М.: Наука, 1990. - 207 с.

29. ГОСТ 9.308 - 85. Єдина система захисту від корозії та старіння. Покриття металеві та неметалеві неорганічні. Методи прискорених корозійних випробувань. - М.: Вид-во стандартів, 1986. - 21 с.

30. ГОСТ 9.302 - 88. Єдина система захисту від корозії та старіння. Покриття металеві та неметалеві неорганічні. Методи контролю. - М.: Вид-во стандартів, 1990. - 39 с.

31. ГОСТ 9450 - 76. Вимірювання мікротвердості вдавлюванням алмазних наконечників. - М.: Вид-во стандартів, 1976. - 21 с.

32. ГОСТ 23.224 - 86 Забезпечення зносостійкості деталей. Методи оцінки зносостійкості відновлених деталей. - М.: Вид-во стандартів, 1986. - 23 с.

33. Грінберг, А. М. Оптимізація гальванічних процесів у гальваній техніці / А. М. Грінберг, Ю. В. Грановський, В. С. Калмуцький. - М.: Машинобудування, 1982. - 128 с.

34. Губкін, С. І. Пластична деформація металів / С. І. Губкін. - М.: Металургіздат, 1990.

35. Губкін, С. І. Теорія та обробка металів тиском / С. І. Губкін. - М.: Металургія, 1991.

36. Гуляєв, А. П. Металознавство / А. П. Гуляєв. М.: Металургія, 1988. 647 с.

37. Гусєва, І. В. Хімічне осадження покриттів із включенням волокнистих наповнювачів / І. В. Гусєва, Т. С. Машенко // Тр. 9-го Всесоюз. з мовлення по жаростійким покриттям. - Л.: Наука, 1989. - 68 с.

38. Гуревич, Д. Ф. До теорії зношування прецизійних пар / Д. Ф. Гуревич // Автомобільна промисловість. - 1988. - Вип. 10. - С. 26-28.

39. Гур'янов, Г. В. Електроосадження зносостійких композицій / Г. В. Гур'янов. - Кишинів. Штіінця, 1985. - 238 с.

40. Деформованість металів. / С. І. Губкін [та ін]. - М.: Металургіз-дат, 1992.

41. Єлінек, Г. В. Успіхи гальванотехніки. Огляд світової спеціальної літератури за 2001-2002 роки. Нікель та його сплави / Г. В. Єлінек. // Гальванотехніка та обробка поверхні. - 2003. Т. XI - № 2. - С. 14-20.

42. Зубчетов, Н. П. Дослідження насосів розподільного типу / Н. П. Зубчетов / Тр. НАТН. - М.: 1980. - С. 23-28.

43. Кальбус, Г. Л. Основи експлуатації навісних систем тракторів / Г. Л. Кальбус; Україн. акад. с.-г. наук. - Київ, 1984.

Качанов, Л. М. Теорія повзучості / Л. М. Качанов. - М.: Фізматліт, 1960. - 455 с.

44. Кіпер, Є. В. Точність обробки отворів корпусів гідророзподільників різними методами / О. В. Кіпер. - М.: Трактори та сільгоспмашини, 1989 - 198 с.

45. Конкін, М. Ю. Ресурсозбереження при експлуатації автотракторної техніки. / М. Ю. Конкін. - М.: Інформагротех, 1998. 73 с.

46. Конструкційні матеріали: Довідник / За ред. Арзамасова Б. М. М.: Машинобудування, 1990. - 480 с.

47. Костецький, В. Я. Тертя, мастило та знос у машинах / В. Я. Костецький. - Київ: Техніка, 1983. - 215 с.

48. Кравчук, В. С. Опір деформуванню та руйнуванню по верхнесно-змінених деталей машин та елементів конструкцій / В. С. Кравчук, О. О. Юсеф, О. В. Кравчук. - Одеса: Астропринт, 2000. - 160 с.

49. Лайнер, В. І. Захисні покриття металів / В. І. Лайнер. - М.: Металургія, 1984. - 398 с.

50. Лайнер, В. І. Сучасна гальванотехніка / В. І. Лайнер. - М.: Металургія, 1987. - 384 с.

51. Лататусєв, В. І. Сучасна технологія нанесення металевих покриттів хімічним способом / В. І. Лататусєв, Г. Н. Ганай, А. Д. Денисов. - Барнаул: Алт. кн. вид-во, 1993. - 159 с.

52. Лебединський, Ю. Н. Комбіновані електролітичні покриття / Ю. Н.

Лебединський. – Київ: Техніка, 1980. – 174 с.

53. Лебединський, Ю. Н. Композиційні електрохімічні покриття, що застосовуються на підприємствах Мінбуддормашу / Ю. Н. Лебединський. – М.: ЦНДІТ Естроймаш, 1985. – 280 с.

54. Лебединський, Ю. Н. Дисперсне зміцнення електрохімічних покриттів / Ю. Н. Лебединський, Л. І. Антропов // Застосування металопокриттів при виробництві та ремонті деталей машин. – Київ: Металургія, 1987. – С. 308

55. Лівшиць, Б. Г. Металографія / Б. Г. Лівшиць. – М.: Металургія, 1990. – 336 с.

56. Матвєєв, А. А. Залежність працездатності тракторної гідросистеми від стану робочої рідини / А. А. Матвєєв. – М.: Техніка в сільському господарстві, 1988. – 90 с.

57. Машков, Ю. К. Трибологія конструкційних матеріалів. / Ю. К. Машков. – Омськ: Вид-во ОмДТУ, 1996. – 304 с.

58. Мелков, М. П. Електролітичне нарощування деталей машин твердим залізом / М. П. Мелков. – Саратов: Приволж. кн. з-во, 1974. – 202 з.

59. Мелкумов Я. С. Економічна оцінка ефективності інвестицій / Я. С. Мелкумов. М.: ІКЦ «ДІС», 1997. – 160 с.

60. Мітряков, А. В. Надійність відновлювальної технології / А. В. Мітряков. – Саратов: Вид-во Сарат. ун-ту, 1979. – 184 с.

61. Молчанов, В. Ф. Отримання комбінованих покриттів при хромуванні / В. Ф. Молчанов. – Київ: Машинобудування, 1964. – 89 с.

62. Мягков, В. Д. Короткий довідник конструктора / В. Д. Мягков. – Л.: Машинобудування, 1975. – 814 с.

63. М'ясоїдов, Н. С. Дослідження зносу золотникових пар гідророзподільників / Н. С. М'ясоїдов // Праці ДЕРЖАННЯ. – М.: 1982. – 120 с.

64. Нікандрова, Л. І. Хімічні способи отримання металевих покриттів / Л. І. Нікандрова. – Л.: Машинобудування, 1971. – 104 с.

65. Нікітін, Г. А. Про заземлення плунжерів гідроагрегатів / Г. А. Нікітін // Праці ДЕРЖАННЯ. – М., 1979. – 116 с.

66. Ногін, М. І. Удосконалення процесу хімічного нікелювання / М. І. Ногін, В. Д. Скопінцев // Праці ЦНДІТМАШ, 1991. С. 121 - 130.

67. Загальномашинобудівні нормативи часу на гальванічні покриття та механічну обробку поверхонь до та після покриття. – М.: Економіка, 1998. – 123 с.

68. Овчинніков, І. Г. Напружений стан циліндричної оболонки піддається зношуванню / І. Г. Овчинніков, Г. А. Гончарова // Будівництво та архітектура. Вісті вузів. – 1989. – № 3. – С. 53-56

69. ОСТ 114.68.9.542-85. Гідророзподільники золотникового типу. Методи прискорених випробувань на надійність. – М.: ДЕРЖСНІПТИ, 1985. – С. 18

70. Пат. 2213167 Російська Федерація, МКІ 3 25 D 15/00. Зносостійкий - композиційне покриття / Великолуг А. М. [та ін.]. - № 2002107768/02; заявл. 26.03.02; опубл. 27.09.03, Бюл. №18

71. Пат. 2023749 Російська Федерація, МКІ 3 22 B 23/00. Спосіб хімічного нікелювання / Петросянц С. П. [та ін.]. - №5050921/02; заявл. 06.07.1992, опубл. 30.11.94, Бюл. №23/2001

72. Пат. 2108416 Російська Федерація, МКІ 3 25 B 15/00. Розчин для хімічного осадження композиційних нікелевих покриттів / Кузнєцов Е. А. та ін. - №95118631/02; заявл. 30.10.1995, опубл. 10.04.98, Бюл. №31/2002

73. Пат. 2135635 Російська Федерація, МКІ 3 23 3 18/36. Розчин для хімічного нікелювання / Ломовський О. І. [та ін.]. - № 98108127/02 за явл. 27.04.1998, опубл. 27.08.99, Бюл. №16/2004

74. Пат. 2287612 Російська Федерація, МКІ 3 23 3 18/50. Розчин для отримання композиційного покриття хімічним осадженням / Данюшкіна Г. А. [та ін.]. - №2005113858/02; заявл. 05.05.2005, опубл. 20.11.2006, Бюл. №32.

75. Петров, Ю. Н. Ремонт автотракторних деталей гальванічними покриттями / Ю.М. Петров. - Кишинів: Картя молдовеняске, 1983. - 149 с.

76. Петухов, І. В. Початкові стадії хімічного нікелювання та структури - хімічно відновлених нікелевих покриттів / І.В. Петухов, Є.В. Ковалів. - Перм, 1994. - 27 с.

77. Плазмове напилення хромонікелевих сплавів, легованих бором та кремнієм з подальшим сплавленням напилених шарів / О.С. Шамшур [та ін.]// Прогресивна технологія машинобудування: зб. наук, робіт. - Свердловськ, 1982. - Вип. IV.

78. Плетньов, Л. В. Основи технології зносостійких матеріалів / Л.В. Плетньов, В.М. Брусенцова. - М: Машинобудування, 1980. - 270 с.

79. Польовий С. Н. Зміцнення металів: С. Н. Польовий, В. Д. Євдокимов. - Довідник, М.: Машинобудування, 1986. - 320 с.

80. Пустильник, Є. І. Статистичні методи аналізу та обробки на блуд / Е. І. Пустильник. - М.: Наука, 1988. - 288 с.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

**ДОДАТКИ**

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України