МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет будівництва, архітектури та дизайну
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології»
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)
бакалавра
(ступінь вищої освіти)

на тему: **ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ГІДРОАПАРАТУРИ ПЛАЗМОВИМ НАПИЛЕННЯМ**

Виконав: студент 4 курсу, групи БАД–212

Спеціальності 132 «Матеріалознавство»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

«Композиційні та порошкові матеріали,

Покриття »

КОЖУШНИЙ О. О.
(прізвище та ініціали)

Керівник ПЕТРАШОВ О. С.
(прізвище та ініціали)

Рецензент к.т.н., доц. БЕРЕЖНИЙ С. П.
(прізвище та ініціали)

2026

Форма № 25

Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет Будівництва, архітектури та дизайну
Кафедра Композиційних матеріалів, хімії та технологій
Ступінь вищої освіти (освітній ступінь) бакалаврат
Спеціальність 132 - Матеріалознавство
(код і назва)
освітня програма (спеціалізація) Композиційні та порошкові матеріали, покриття
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. завідувача каф. КМХТ (Акімов І.В..)
« 20 » 04 2026 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
КОЖУШНОМУ Олександру Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) підвищення зносостійкості деталей гідроапаратури плазмовим напиленням

керівник проекту (роботи) ПЕТРАШОВ Олександр Сергійович ст. викл.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від «17 » 04 2026 р., № 173
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 04.06. 2026 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) обрати обладнання та оптимізувати параметри режимів для плазмового напилення поршня аксіального гідронасоса порошковим дротом марки 120Х14Р2С1
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): розробка технологічного процесу відновлення поршня аксіального гідронасоса плазмовим методом, визначення механічних властивостей покриття та побудова залежностей
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів): презентація 17слайдів

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	Петрашов О.С.	20.04.26	12.05.26
2	Петрашов О.С.	12.05.26	15.05.26
3	Петрашов О.С.	15.05.26	29.05.26
Нормоконтроль	Петруша Ю.Ю.		
Перевірка на плагіат	Петрашов О.С.		

7. Дата видачі завдання «___20___» _____04_____2026__року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№№ п.п.	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ, розділ 1	23.04.2026	
2	Розділ2	15.05.2026	
3	Розділ 3, презентація	25.05.2026	
4	Попередній захист	01.06.2026	

Студент _____ Олександр КОЖУШНИЙ
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)_____ Олександр ПЕТРАШОВ
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Робота складається з 39 сторінок, 11 рисунків, 6 таблиць, 27 джерел.

ПЛАЗМОВО-ДУГОВЕ НАПИЛЕННЯ, ПОРОШКОВИЙ ДРІТ, ПОРШЕНЬ АКСІАЛЬНОГО ГІДРОНАСОСА, МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ, МІКРОТВЕРДІСТЬ.

Об’єкт досліджень – процеси підвищення комплексу властивостей покриттів, що призначені для відновлення поршнів аксіального гідронасоса.

Предмет дослідження – технологія плазмово-дугового нанесення покриттів, що призначена забезпечити отримання кінцевого виробу підвищеної якості.

Мета роботи – вирішення матеріалознавчої задачі підвищення фізико-механічних, технологічних і експлуатаційних властивостей покриттів, що призначені для підвищення експлуатаційної надійності поршнів аксіального гідронасоса.

Суть дипломної роботи полягає в розробці технологічного процесу та оптимізації параметрів режиму відновлення деталей гідроапаратури з застосуванням методу плазмового напилення.

Виконана дипломна робота містить наступні складові: аналітичний огляд технічної літератури за темою дипломної роботи; опис матеріалів і обладнання для дослідження та аналіз експериментальних даних; висновки.

ABSTRACT

The research work consists of 39 pages, 11 figures, 6 tables, 27 sources.

PLASMA ARC SPRAYING, FUSED WIRE, AXIAL HYDRAULIC PUMP PISTON, BOND STRENGTH, MICROHARDNESS.

The object of research is the processes for improving the complex properties of coatings intended for the restoration of axial hydraulic pump pistons.

The subject of research is plasma arc coating technology, which is designed to ensure the production of a high-quality final product.

The purpose of the work is solving the materials science problem of improving the physical, mechanical, technological and operational properties of coatings designed to increase the operational reliability of axial hydraulic pump pistons.

The essence of the thesis is to develop a technological process and optimize the parameters of the restoration mode of hydraulic equipment parts using the plasma spraying method.

The completed thesis contains the following components: an analytical review of technical literature on the topic of the thesis; a description of materials and equipment for research and analysis of experimental data; conclusions.

ЗМІСТ

С.

Перелік скорочень, умовних познак, одиниць і термінів.....7

Вступ.....8

1 Аналітичний огляд……..……..…...10

1.1 Методи підвищення експлуатаційної надійності деталей гідроапаратури…….……....10

1.1.1 Методи зміцнення поверхонь……..…….…...11

1.1.2 Використання кольорових сплавів та покриттів.……..…..11

1.1.3 Конструктивні особливості та проблеми експлуатації...…….....12

1.2 Плазмове напилення - як метод зміцнення деталей ……..13

1.3 Завдання досліджень…….……....17

2 Матеріали, обладнання та методи дослідження властивостей покриття..19

2.1 Вибір матеріалів……..……...19

2.2 Методика виготовлення порошкового дроту…….…19

2.3 Обладнання для нанесення покриттів та режими……..20

2.4 Визначення міцності з’єднання покриття з основою…..……....21

2.5 Визначення мікротвердості…….……..……....23

2.6 Металографічні дослідження……23

2.7 Методика визначення зносостійкості……...24

3 Технологія відновлення і зміцнення деталей гідроапаратури……..….25

3.1 Аналіз умов експлуатації деталей гідроапаратури ……....25

3.2 Технологічний процес відновлення…….……..…..27

3.3 Вибір режимів нанесення покриттів……29

3.4 Дослідження властивостей напиленого покриття……32

Висновки.....36

Перелік джерел посилань.....37

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

СТС – самофлюсівні тверді сплави;

КВМ – коефіцієнт використання матеріалу;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

КВП - коефіцієнт використання порошку;

СВЧ – струми високої частоти;

БДМ – будівельно-дорожні машини;

Град. – градуси;

Об/хв – оберти на хвилину;

л/с – літрів за секунду.

ВСТУП

Сучасні вимоги до підвищення ефективності та якості промислового виробництва зумовлюють необхідність впровадження новітніх технологічних процесів. Це першочергово стосується забезпечення високої експлуатаційної надійності обладнання, що працює в умовах екстремального тиску, високих швидкостей та інтенсивного зношування.

З огляду на широке застосування гідравлічної апаратури в сучасному виробництві, критичного значення набувають питання підвищення її надійності та чутливості. Ці параметри безпосередньо впливають на продуктивність обладнання і значною мірою залежать від обраних матеріалів та технології виготовлення компонентів.

Досвід експлуатації показує, що відповідальні деталі гідроапаратури часто мають недостатню зносостійкість. Традиційні методи зміцнення, такі як термічна та хіміко-термічна обробка, нанесення гальванічних покриттів, не завжди забезпечують необхідний ресурс роботи в агресивних середовищах.

Перспективним напрямком розв'язання цієї проблеми є впровадження методу плазмового напилення [1]. Ця технологія дозволяє створювати покриття з унікальним поєднанням властивостей:

- висока корозійна та зносостійкість;
- відмінні антифрикційні або фрикційні характеристики;
- можливість відновлення геометрії зношених вузлів.

Дослідження та світова практика підтверджують ефективність використання плазмового методу нанесення захисних покриттів з використанням порошкових дротів. Цей метод успішно застосовується для зміцнення та відновлення таких критичних деталей, як вали прокатних станів, плунжери гідравлічних систем, гільзи і штоки гідроциліндрів, корпусні деталі гідроапаратури, золотники, клапани, вентилі гідророзподілювачів та ін.

Отже, впровадження плазмового напилення для створення зносостійких покриттів є актуальним науково-технічним завданням, що має прямий економічний ефект за рахунок подовження терміну служби дороговартісного сучасного обладнання.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Методи підвищення експлуатаційної надійності деталей гідроапаратури

На сьогодні деталі гідроапаратури виготовляють переважно з високолегованих і високоміцних інструментальних та нержавіючих сталей, які відрізняються підвищеною зносостійкістю, малим коефіцієнтом лінійного розширення та мінімальною деформацією під час термічної обробки.

Для гідроциліндрів використовують матеріали з межею міцності $\sigma_в$ = 150…900 МПа залежно від робочого тиску. Матеріали для виготовлення пар тертя (поршень, шток, напрямні), крім високої міцності, повинні мати добрі антифрикційні властивості при значних швидкостях зворотно-поступального руху.

У таблиці 1.1 наведено відомості щодо матеріалів, які застосовуються для виготовлення основних деталей гідроприводу [2].

Таблиця 1.1 – Матеріали основних деталей гідроприводу [2]

Найменування деталі	Матеріал	Вид зміцнення
Гільзи циліндрів	Сталь 45, 40Х, 30ХГСА	Гартування СВЧ, хромування
Штоки, плунжери	Сталь 45, 40Х, 38Х2МЮА	Гартування СВЧ, азотування, хромування
Золотники	Сталь 12ХН3А, 20Х, ХВГ	Цементація, гартування, азотування
Направляючі втулки	Бронза БрАЖ 9-4, БрОФ 10-1	-

1.1.1 Методи зміцнення поверхонь

Для підвищення міцності, твердості та зносостійкості деталі піддають різним видам обробки [3]:

- термічна обробка: об'ємне гартування та відпуск;

- поверхневе зміцнення: гартування струмами високої частоти (СВЧ) - найбільш вживане для циліндрів та штоків;

- хіміко-термічна обробка (ХТО): цементація, азотування, борування.

Золотники та інші відповідальні деталі піддають ХТО для підвищення втомної міцності та твердості шляхом дифузійного насичення поверхневих шарів вуглецем, азотом або бором.

1.1.2 Використання кольорових сплавів та покриттів

Широке застосування знайшли антифрикційні бронзи, які забезпечують мінімальне зношування спряжених деталей, низький коефіцієнт тертя, добру припрацьовуваність та корозійну стійкість. Найчастіше використовують олов’яні та алюмінієво-залізні бронзи. Наприклад, деформівна бронза Бр.АЖН 10-4-4 після термічної обробки забезпечує границю міцності $\sigma_в$ = 650 МПа та твердість 200…240 НВ.

Для захисту від корозії та зношування застосовують спеціальні покриття:

- тверде хромування. Використовується для штоків та плунжерів. Забезпечує високу твердість (60…62 HRC) та зносостійкість, що у 10…15 разів перевищує показники конструкційних сталей у вологому середовищі;

- ферросульфідування. Застосовується для поверхонь плунжерів та золотників, що працюють на стирання в середовищі робочої рідини;

- захисні покриття. Цинкування, кадміювання та фосфатування для поверхонь, що не піддаються тертю [4].

1.1.3 Конструктивні особливості та проблеми експлуатації

Вимоги до робочих поверхонь часто є суперечливими:

- в золотникових парах робочі поверхні мають бути максимально твердими та більш крихкими ніж пластичними;

- на кромках плунжерів обов'язково мають бути гострі краї — це зменшує ризик заклинювання, оскільки гостра кромка руйнує тверді мікрочастинки, що потрапляють у зазор;

- у гідроциліндрах підвищення твердості лише однієї деталі може призвести до прискореного зносу іншої. У зв’язку з цим, поршень (менш складну деталь) часто виготовляють із м'якішого матеріалу, щоб зберегти дорожчу гільзу циліндра.

При виготовлені складових вузлів гідроапаратури завжди існують проблеми виробництва. Потужні гідроприводи прокатного обладнання потребують великої кількості дефіцитних матеріалів (бронзові втулки, заливка поршнів). Ситуація ускладняється високим рівнем браку при литві через пори та раковини. Тому якщо робити висновок щодо надійності то слід констатувати, що збереження діаметральних розмірів (радіального зазору) та осьових розмірів (перекриття вікон) є критичним для чутливості системи. Допустимий лінійний знос складає лише 40…50 мкм. Оскільки навіть незначна втрата маси призводить до виходу з ладу високовартісного обладнання та тривалих простоїв, в умовах інтенсифікації прокатного

виробництва необхідний пошук нових, ефективніших методів зміцнення деталей.

1.2 Плазмове напилення - як метод зміцнення деталей

У роботі [5] показано, що метод плазмового напилення дозволяє створювати на робочих поверхнях деталей покриття, що мають високу зносостійкість і хороші антифрикційні властивості. Зазначається [6], що в нашій країні щорічно через передчасний вихід з ладу деталей машин і споруд втрати оцінюються мільярдами гривень, а в останні роки спостерігалося експоненціальне збільшення кількості деталей, що піддаються напиленню.

Використання низькотемпературної плазми (10^3…10^5 °К) дозволяє значно розширити діапазон матеріалів, що застосовуються для захисту деталей від зносу та корозії, а також для надання робочим поверхням високих антифрикційних властивостей. Фірми «Метко» (Італія), «Плазма-Технік AG» (Швейцарія) [7] широко застосовують напилення для нанесення зносо- та корозійностійких покриттів на деталі машин, зокрема в металургії при виготовленні насосів, гідроприводів, у хімічному машинобудуванні та в інших галузях промисловості.

Для газотермічного напилення, зокрема плазмового, випускається широка гама порошкових матеріалів. Так, фірма «Woll C/» (США) та «Метко» (Італія) виробляють десятки найменувань багатоцільових порошків [8]. Серед них чільне місце посідають порошки самофлюсівних твердих сплавів (СТС) на основі нікелю та хрому з присадками бору та кремнію, а також порошки інтерметалідів системи нікель-алюміній.

СТС за зносостійкістю перевершують конструкційні сталі у вузлах тертя у 5…30 разів. Висока зносостійкість СТС пов'язана як із високою твердістю

(здатністю чинити опір впровадженню абразиву в поверхню), так і зі здатністю блокувати дислокації при зрізі мікроструктури або видавлюванні канавок, а також із високою когезійною міцністю [9]. Зносостійкість покриттів із СТС типу СНГН у парах тертя «СНГН — сталь ХНГ, У8А, 45, 40Х» вища за зносостійкість сталей, що працюють у парі одна з одною, у 4…9 разів. При цьому знос сталей, що працюють у парі з СНГН, зменшується в 1,5…2,5 рази, а коефіцієнт тертя в парах «покриття — сталь» при вихідній шорсткості *R*a = 0,16…0,3 мкм менший у 1,8…2,2 рази, ніж у парах «сталь — сталь», а при шорсткості сталого режиму знос менший у 2…10 разів. Відносна зносостійкість для сплаву СНГН у діапазоні навантажень 5…25 МПа дорівнює 9…14, при цьому коефіцієнт тертя в 3…4 рази нижчий за коефіцієнт тертя «сталь по сталі». Знос спряженого з покриттям контртіла у 8…13 разів нижчий, ніж при терті його по чавуну [10]. Важливою службовою властивістю цих сплавів є здатність заполіровуватися, чим зумовлена їхня хороша зносостійкість при сухому терті по металу. Напилення покриттів із псевдосплавів системи «сталь-мідь», «сталь-бронза» дозволяє підвищити допустиме граничне навантаження в підшипниках ковзання в 1,5…2,5 рази і заощадити значну кількість кольорового металу [11].

Хімічний склад та фізико-механічні властивості сплавів наведені в таблицях 1.2 та 1.3, складених за даними робіт [12].

Таблиця 1.2 – Хімічний склад порошків [12]

Марка порошку	Вміст компонентів у %							
	C	Cr	Si	Ni	Mn	B	Fe	W
СНГН-50	0,5-0,7	13,0-15,0	3,0-3,7	решта	≤ 1,0	2,7-3,2	≤ 3,5	-
СНГН-60	0,7-1,1	16,0-19,0	4,0-5,0	решта	≤ 1,0	4,0-4,7	≤ 4,5	-
ВСНГН-80	4,7-5,3	2,5-3,0	0,7-1,0	14,0-18,0	≤ 1,0	0,6-0,9	≤ 0,8	решта
ВСНГН-88	5,0-5,5	1,0-1,5	0,4-0,6	8,0-11,0	-	0,3-0,6	≤ 0,5	решта
ПГ-СР2	0,2-0,5	12,0-15,0	2,0-3,2	решта	-	1,5-2,1	5,0	-
ПГ-СР4	0,6-1,0	15,0-18,0	3,0-4,5	решта	-	2,8-3,8	5,0	-

Таблиця 1.3 – Фізико механічні властивості порошків [12]

Марка порошку	Властивості				
	Твердість, HRC	Температура плавлення, °С	Густина, г/см^3	Грануляція, мм	Зносостійкість по відношенню до сталі 45
СНГН-50	48-52	1020-1100	7,8-8,0	0,01-0,15	3,5-4,0
СНГН-60	58-61	1020-1100	7,8-8,0	0,01-0,15	3,6-4,2
ВСНГН-80	55-60	1050-1080	8,5-8,7	0,01-0,15	10-12
ВСНГН-88	60-63	1050-1080	8,5-8,7	0,01-0,15	12-16
ПГ-СР2	45-48	1050-1080	7,6-7,8	0,04-0,45	3,0-4,5
ПГ-СР4	58-62	1060-1080	7,6-7,8	0,04-0,45	3,0-4,5

Сплави типу ПГ-СР, СНГН, ВСНГН рекомендується застосовувати для нанесення покриттів на деталі, що працюють в агресивних середовищах, а також в умовах абразивного зносу з помірними ударними навантаженнями при температурах до 600…700 °С [13].

Бор і кремній у цих сплавах утворюють із нікелем і хромом легкоплавкі евтектики з температурою плавлення 950…1080 °С, а також відновлюють оксидні плівки на поверхні частинок порошку та підкладки з утворенням боросилікатних шлаків, які спливають на поверхню покриття при оплавленні, чим і пояснюється ефект самофлюсування цих сплавів. Ці елементи збільшують також твердість і зносостійкість сплавів, оскільки практично весь бор перебуває у сплаві у вигляді боридів нікелю Ni_3B та хрому CrB і Cr_5B_3, які мають не тільки високу твердість, але й є менш крихкими, ніж карбіди, і, отже, менше викришуються під дією абразивних зерен. Кремній, збільшуючи активність хрому в твердому розчині на основі нікелю, сприяє утворенню боридів хрому (CrB), що надають найбільшої твердості сплавам заліза. Вуглець у СТС перебуває у вигляді карбідів хрому CrC_3, $Cr_{23}C_6$ у кількості до 40 % і карбоборидів до 80 % – що ще більшою мірою підвищує зносостійкість цих матеріалів [14].

В останні роки, з розвитком техніки плазмового напилення, цей метод почали застосовувати для нанесення покриттів на великогабаритні деталі,

низка закордонних фірм [15] переходять із гальванічного хромування на технологію нанесення зносостійких покриттів напиленням.

Роботи з нанесення покриттів методом плазмового напилення, проведені в різних країнах, також показали значне підвищення зносостійкості деталей порівняно зі зміцненими хромуванням. Так, зміцнення плунжерів покриттям із СТС типу ПГ-СР4 дозволило підвищити їхню стійкість у 5…7 разів порівняно з хромованими плунжерами, виготовленими зі сталі 12Х18Н10Т [16].

При призначенні режимів плазмового напилення виходять із вирішення основного завдання – отримання міцного зв'язку покриття та підкладки, що забезпечується процесами фізико-хімічної взаємодії між основою та матеріалом, який напилюється, у процесі напилення. Методи регулювання фізико-хімічної взаємодії основи та напилюваного матеріалу умовно поділяють на дві групи: термічні та хімічні.

Термічні методи активації процесів фізико-хімічної взаємодії передбачають підвищення ентальпії частинок і температури підкладки. Частинки порошку, що мають високу температуру та певний запас кінетичної енергії, при ударі об поверхню деформуються і розтікаються по ній, забезпечуючи тим самим зближення атомів на межі «покриття-підкладка», що за сприятливих умов може призвести до розвитку сил хімічного зв'язку.

У роботах [17, 18] показано, що збільшення міцності зчеплення покриття з підкладкою та активація процесу утворення покриття можливі шляхом перегріву частинок, що напилюються, тобто залежать від того, наскільки повно відбувається процес передачі енергії плазмового струменя цим частинкам. Відомо [20], що плазмотрони для напилення покриттів мають низький ефективний ККД ($\eta_{еф} \leq 2$ %). Його підвищення дозволить покращити якість покриттів, збільшити коефіцієнт використання порошку (КВП) та підвищити продуктивність установок плазмового напилення, а також розширити сфери виробничого застосування плазмових покриттів.

Підвищення КВП в умовах розширення номенклатури деталей та загального зростання обсягу робіт із плазмового напилення покриттів зі СТС, є важливим завданням.

У роботі [20] наведено дані з дослідження міцності зчеплення та щільності покриття, отриманих при напиленні та оплавленні порошків СТС типу ПГ-СР та СНГН. Як показали експерименти, основне завдання створення міцного зв'язку між покриттям і підкладкою вирішується в процесі оплавлення напиленого шару, а в процесі напилення необхідно забезпечити лише достатньо щільний контакт між ними для запобігання окисленню підкладки та відшаруванню покриття під час оплавлення. Тому при напиленні покриттів зі СТС міцність зчеплення не є визначальним фактором, і переважного значення набуває ефективність процесу напилення (з точки зору повнішого використання енергії плазмового струменя та підвищення КВП). Наявні відомості [21] вказують на перспективність застосування у процесі плазмового напилення природного газу для регулювання окислювально-відновного потенціалу та енергетичних характеристик струменя.

Вищевикладені відомості свідчать про велику актуальність даного методу підвищення експлуатаційної надійності деталей гідроприводу.

1.3 Завдання досліджень

Технологічний процес нанесення плазмових покриттів, що мають високі механічні властивості та міцність зв'язку з підкладкою, ускладнюється значною кількістю (понад 60) факторів, які тією чи іншою мірою впливають на властивості покриттів. Ці фактори пов'язані з конструктивними параметрами установки плазмового напилення, режимом роботи плазмотрона та умовами введення порошку в плазмовий струмінь, а також фактори,

пов'язані з властивостями матеріалу порошку, підкладки та умовами напилення. Вони справляють комплексний вплив на властивості покриття та економічні показники процесу напилення, а тому в кожному конкретному випадку зміцнення деталей плазмовим напиленням потрібне ретельне відпрацювання технології нанесення покриттів.

З огляду на викладене, у даній роботі ставляться такі завдання:

- дослідження процесу плазмового напилення з метою визначення оптимальних параметрів та його інтенсифікації (підвищення продуктивності та КВП);

- удосконалення установки та дослідження процесу напилення із застосуванням як транспортувального газу – плазмоутворювального газу;

- розробка технології та виготовлення дослідних партій деталей гідроапаратури з нанесенням зносостійких та антифрикційних покриттів.

2 МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТТЯ

2.1 Вибір матеріалів

На основі аналізу літературних джерел [22] були обрані матеріали на основі системи C-Cr-B-Si і проведений розрахунок шихти порошкових дротів для плазмового напилення.

2.2 Методика виготовлення порошкового дроту

Для виготовлення порошкового дроту використовувалася холоднокатана стрічка з низьковуглецевої сталі 08кп з поперечним перерізом 0,3 мм × 12 мм, яку пропускали через калібровані отвори (волоки) і завертали в трубку. На попередньо підвальцьовану стрічку за допомогою дозуючого пристрою насипалася порошкова шихта певного гранулометричного та хімічного складу. Отриманий таким чином трубчатий дріт з шихтою всередині протягувався через декілька волок до отримання діаметра 2,0 мм.

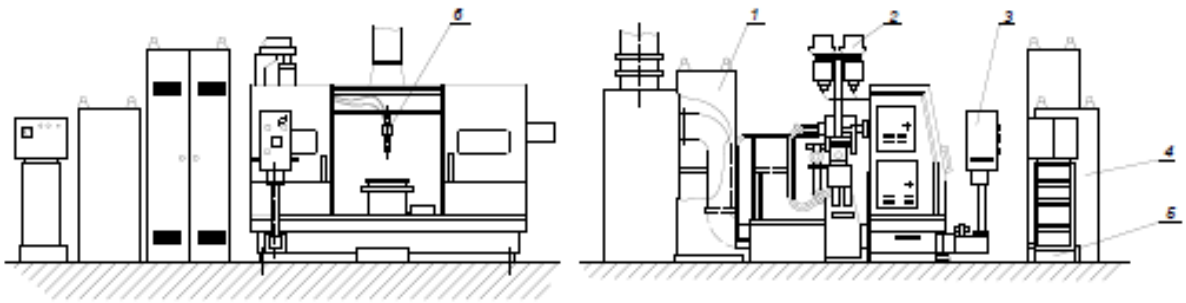
Шихта порошкових дротів містила нікелевий порошок ПНК (ДСТУ 9722-97), Ферохром ФХ-400 (ДСТУ 4757:2009), Феробор ФБ-1 (ДСТУ ISO 4552-1:2010), Феросиліцій ФС-75 (ДСТУ 4127:2002), залізний порошок ПЖ-1 (ДСТУ ISO 3954:2016).

Введення легуючих компонентів в склад порошкового дроту у вигляді феросплавів дозволяє підвищити технологічність виготовлення дроту, а також збільшити коефіцієнти використання матеріалу та переходу легуючих елементів з дроту в покриття [23].

Коефіцієнт заповнення порошкових дротів складав 0,3…0,4 і визначався у процесі виготовлення по відношенню маси відрізка порошкового дроту з наповнювачем до маси пустої оболонки.

2.3 Обладнання для нанесення покриттів та режими

Нанесення покриттів з використанням порошкового дроту виконували на установці Київ – 7 (див. рис. 2.1).



1-шафа керування; 2-блок подавання дротів; 3-пульт керування; 4-блок електроживлення; 5-блок керування; 6- плазмотрон.

Рисунок 2.1 – Загальний вигляд установки Київ-7 [24]

Установка Київ-7 складається з джерела живлення (АПР-402), блока керування, плазмотрона (ПУН-1); блока подавання дротів; блока автономного охолодження. Також установка комплектується напівавтоматом 15В-Б.

Вмикання установки та управління параметрами режиму проводили за допомогою пульта управління, до якого були підключені плазмотрон з подавальним пристроєм, балон з аргоном і джерело живлення. Також установка оснащена шлангами з проточною водою для охолодження плазмотрона і витяжною вентиляцією.

Нанесення покриттів відбувалося за схемою з струмоведучим дротом за наступними режимами (див. табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Параметри режимів плазмового напилення

Сила струму, А	Напруга на дузі, В	Витрата газу, л/с	Швидкість подачі дроту, м/с	Дистанція до поверхні напилення, мм
150…300	70…130	0,30…0,80	0,05…0,30	50…180

Попередній вибір режимів нанесення покриттів здійснювався шляхом оцінки мікротвердості покриттів, фракційного складу і структури частинок металізаційного потоку та коефіцієнта використання матеріалу.

2.4 Визначення міцності з’єднання покриття з основою

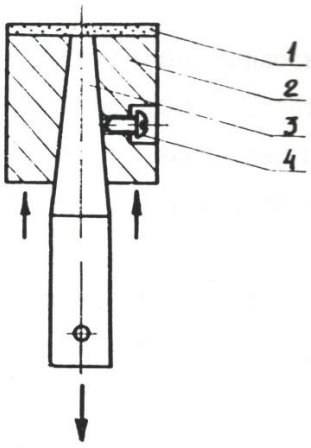
Необхідною умовою забезпечення надійності роботи конструкцій з покриттям в умовах механічних навантажень є наявність високої адгезійної міцності або міцності зчеплення покриття з поверхнею основного матеріалу.

При вимірюванні такої міцності зазвичай користуються питомими значеннями величин, беручи опір руйнування по відношенню до одиниці площі контакту (при відриві, зсуві, крученні і т. ін.).

В роботі використовували найбільш поширений метод визначення міцності зчеплення покриття з основою – витягання конічного штифта [25]. Схема показана на рис. 2.2.

Покриття 1 наносили на підготовлену поверхню втулки 2 і торець конічного штифта 3. Штифт має конічну форму з метою зменшення зазору на площі контакту та зниження похибки вимірювань. Штифт фіксується у втулці за допомогою стопорного гвинта 4. Після нанесення покриття штифт з

втулкою встановлюється в спеціальний пристрій, стопорний гвинт при цьому знімають і зразок навантажується до відриву штифта від покриття.



1 – покрить тя; 2 – втулка; 3 – торець конічного штифта; 4- стопорний гвинт

Рисунок 2.2 – Схема визначення міцності зчеплення за методом витягання конічного штифта [25]

Випробування проводилися на розривній машині UIT STM 100 при швидкості навантаження 15 мм/хв та зусиллі до 5000 Н. Обладнання оснащене комп'ютерною системою керування та реєстрації даних, що дозволяє отримувати цифровані результати випробувань.

Зразки для нанесення покриттів виготовлялися із сталі 45. Торцьові поверхні зразків перед напиленням піддавали піскоструменевій обробці електрокорундом з розмірами фракцій від 500 мкм до 800 мкм. Тиск повітря дорівнював 0,5 МПа.

Міцність зчеплення напиленого шару з основою визначали за формулою:

$$\sigma_{зч} = \frac{4P}{\pi d^2}, \qquad (2.1)$$

де Р – максимальне значення зусилля розтягу, Н;

d – діаметр торця штифта, м.

2.5 Визначення мікротвердості

Мікротвердість основних структурних складових визначали за допомогою приладу ПМТ-3, а координати уколів визначали на приладі БМІ-1Ц. На кожному зразку робилося не менше 6 уколів на одній і тій самій відстані від зони сплавлення (при навантаженні на індентор 50 г).

Особливою умовою вимірювання мікротвердості було десятикратне перевищення товщини покриття над глибиною відбитка індентора.

2.6 Металографічні дослідження

Дослідження структури покриттів є надійним способом оцінки якості покриття і дозволяє судити не тільки про мікроструктуру, пористість та наявність забруднень, але й про характер зв’язків на межі покриття-підкладка.

Структуру дифузійних прошарків виявляли шляхом роздільного травлення: спочатку основного металу спиртовим розчином азотної кислоти та пікратом натрію, а потім оплавленого покриття — лужним розчином червоної кров'яної солі та кислим розчином хлорного заліза.

Для проведення металографічного дослідження напилених зразків виготовляли шліфи, включаючи наступні операції.

- шліфування зразків на шліфувальному верстаті 3Е158 з використанням шліфувального паперу шкурках зернистістю 400 мкм, 800 мкм, 1000 мкм, 1500 мкм і 2000 мкм;

- полірування зразків на верстаті «Metasinex» на фетрі з алмазною пастою.

Мікроструктуру напилених шарів, границі розділу основа – покриття досліджували на металографічному мікроскопі «SIGETA ММ-700» при збільшеннях: до 500.

2.7 Методика визначення зносостійкості

Дослідження на зносостійкість проводились на машині тертя СМЦ-2 за схемою «диск-колодка» (рис. 2.3) в умовах змащування. У якості контртіла (колодки) використовували загартовану сталь 45 (частота обертання 500 об/хв, навантаження 150 Н). Зносостійкість визначали за формулою:

$$J = \frac{h}{L}, \tag{2.2}$$

де h – лінійне зношення зразка мм;

L – довжина шляху тертя, мм.

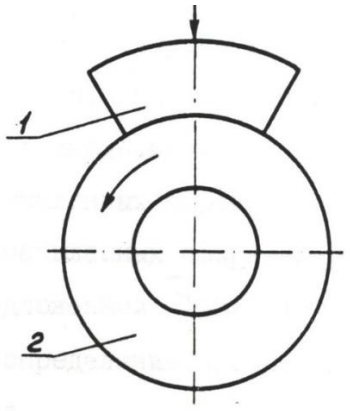


Рисунок 2.3 – Схема випробувань зразків з покриттям в умовах тертя ковзання за схемою «диск – колодка»

3 ТЕХНОЛОГІЯ ВІДНОВЛЕННЯ І ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ГІДРОАПАРАТУРИ

3.1 Аналіз умов експлуатації деталей гідроапаратури

Підвищення довговічності та ремонтопридатності будівельної техніки в основному визначається можливостями відновлення ресурсу роботи рухомих з'єднань і робочих органів, що вийшли з ладу у процесі експлуатації. Як показує досвід [26], при експлауатації будівельно-дорожних машин (БДМ) кількість витратних матеріалів та запасних частин в 1,3 рази перевищують масу машини, з них на запасні частини припадає 60…65 %.

Причинами втрати робочих властивостей можуть бути поломки викликані зниженням міцності деталей або зношення. Аналіз роботи цілого ряду ремонтних підприємств показав, що при дефектуванні лише 1 % деталей БДМ вибраковується внаслідок поломок, а 99 % - з причини зносу.

Основними вузлами гідросистем будівельної техніки є гідроциліндри, гідророзподільники, гідронасоси і гідродвигуни. Ремонт гідрообладнання є дорогоцінною операцією і тягне за собою значні втрати робочого часу у вигляді простоїв.

Найбільш широке використання в будівельній техніці знаходять аксіально-поршневі гідронасоси (рис. 3.1) для гідропередач, які обслуговують рухомі комплекси (дорожні, будівельні, транспортні машини), а також для слідкуючих гідроприводів підвищеної точності. Гідромашини даного типу мають номінальні швидкості обертання у межах від 900 об/хв до 1900 об/хв, продуктивність від 30 $см^3$/об до 100 $см^3$/об, робочий тиск від 10 МПа до 30 МПа [27].

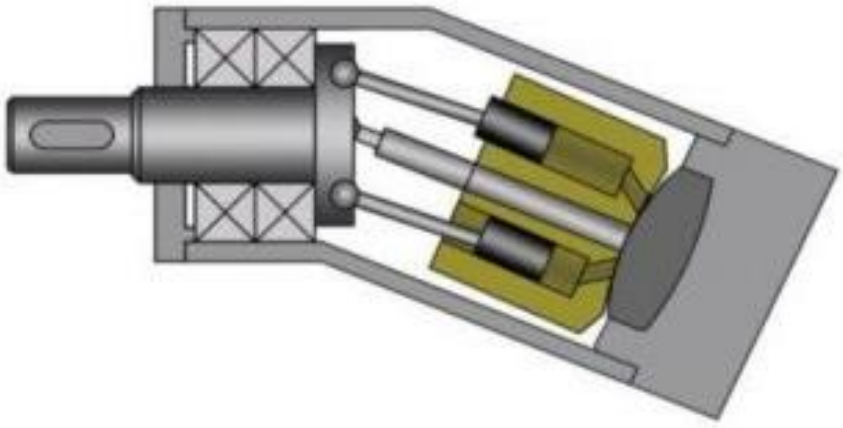


Рисунок 3.1 – Схема аксіально-поршневого гідронасоса

Деталлю, що найбільш часто виходить з ладу та визначає працездатність всієї гідромашини, є поршень (рис. 3.2).

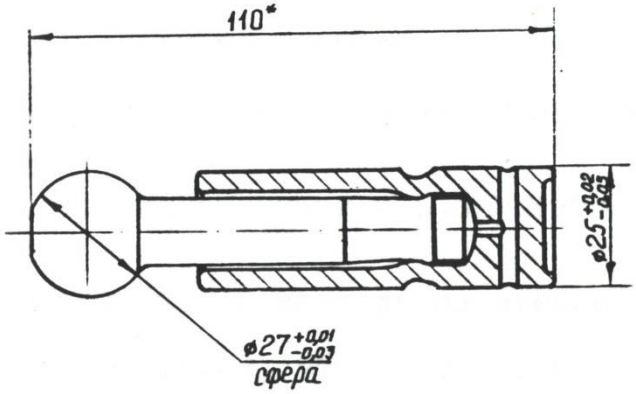


Рисунок 3.2 – Поршень з шатуном аксіально-поршневого гідронасоса

Зношуванню піддається циліндрична поверхня поршня на глибину до 0,15…0,25 мм. Зазвичай для підвищення зносостійкості використовують методи азотування або гальванічне хромування.

Основними видами зношення робочої поверхні поршнів гідронасосів є окислювальний та абразивний, причому доля останнього збільшується в процесі експлуатації пропорційно кількості домішок в робочих рідинах. На рисунку 3.3 показана робоча поверхня поршня гідронасоса, що піддалася змішаному окислювально-абразивному зношуванню.



Рисунок 3.3 – Зношена робоча поверхня поршня після експлуатації

Окислювальне зношення виникає при терті ковзання і є основним в умовах граничного змащування. Також у процесі роботи на робочій поверхні залишається деяка кількість продуктів тертя – частинок зношування. Ці частинки у поєднанні з іншими частинками, що потрапляють в зону тертя зовні, сприяють абразивному зношенню.

3.2 Технологічний процес відновлення

Деталлю для якої проводили розроблення технологічного процесу відновлення був поршень аксіального гідронасоса (див. рис. 3.2). Деталі цього типу, у першу чергу, визначають працездатність гідросистеми і мають найменший ресурс роботи серед інших деталей гідроапаратури.

Технологічний процес нанесення покриттів на деталі методом плазмово-дугового напилення включає наступні операції:

- підготовка поверхні деталі до напилення;
- нанесення покриття;
- обробка відновленої поверхні.

У процесі підготовки поршня до нанесення покриттів деталь очищували від бруду, мастила і продуктів зносу і знежирювали розчинником.

Для отримання максимальної міцності зчеплення покриття з деталлю необхідна наявність розвиненої поверхні контакту та її активація (видалення оксидних та інших плівок). Для цього найбільш оптимальною і технологічною операцією є нанесення на поверхню деталі «рваної різі». Режими нарізання різі наведені в таблиці 3.1. Нарізання виконували на токарно-гвинторізному верстаті 1К62.

Таблиця 3.1 – Режими нарізання «рваної різі»

Крок різі, мм	Глибина нарізання, мм	Оберти шпинделя, об/хв	Величина зміщення різця, мм	Кут заточування різця, град.
0,5	0,5	140	2,5	60

Нарізання велося за один прохід з забезпеченням непопадання на підготовлену поверхню вологи, мастила і іншого бруду. Щоб недопустити подальшого зволоження і утворення небажаних оксидних плівок, нанесення покриття виконувалося не пізніше 1 години після закінчення підготовки поверхні.

У якості шихти для порошкового дроту було обрано матеріал 120Х14Р2С1, розрахований автором [22], який відповідав найбільш високим властивостям (міцність зчеплення, мікротвердість, зносостійкість). Перед напиленням порошковий дріт просушували в сушильній шафі для видалення

вологи при температурі 150…200 °С протягом двох годин. Напилення проводили на установці Київ-7 (див. рис. 2.1). Деталь розташовували в спеціальному центрувальному пристрої, який захищає виріб від налипання часток і закріпляли в патроні шпинделя маніпулятора.

У процесі нанесення покриття здійснювали контроль за рівномірністю утворення напиленого шару. Поверхня покриття візуально контролювалася на відсутність затемнень і слідів оксидів, що свідчили б про перегрів і порушення міцностних властивостей.

Механічна обробка нанесеного шару покриття проводилась через 24 години після закінчення процесу напилення. Ця витримка дає можливість забезпечити максимальну релаксацію внутрішніх напружень та завершення дифузійних процесів.

Напилені поверхні поршнів оброблювалися шліфуванням алмазними кругами до утворення на поверхні матового блиску. Кінцевою операцією обробки поршня було притирання на місці з застосуванням спеціальної притиральної дрібнозернистої пасти Visbella VG0100RD0P.

3.3 Вибір режимів нанесення покриттів

Надійність та довговічність роботи деталей з напиленим плазмово-дуговим способом покриттям визначається його структурою, яка залежить від цілого ряду параметрів технологічного режиму.

Оцінка впливу параметрів режиму проводилася при визначенні комплексу структурних і фізико-механічних властивостей покриття і деталі в цілому. У процесі нанесення покриттів на деталі, проводилося напилення на зразки для визначення властивостей покриттів і для обрання оптимальних режимів.

При дослідженні характеристик покриттів було помічено, що при збільшенні сили струму дуги плазмотрона до 240 А збільшувалася міцність покриття. Це можна пояснити збільшенням температури часток напилюваного матеріалу, що призводить до міцнішого зчеплення і деформації при ударі. Крім того збільшення сили струму сприяло зменшенню розмірів часток. Подальше збільшення сили струму виявилося недоцільним, оскільки призводило до інтенсивного розбризкування дроту, зменшення КВМ та формування покриття з часток більш крупної фракції з підвищеним вмістом оксидів.

Оптимальне співвідношення швидкості і температури напилюваних часток, що відповідало формуванню покриття з найкращими структурно-механічними характеристиками, спостерігалося при дистанції напилення 90…100 мм. Зменшення цієї дистанції призводило до інтенсивного окислення підготовленої поверхні внаслідок нагріву і зменшення міцності зчеплення. Крім того, внаслідок підвищеної теплової дії плазмової дуги в покритті виникали температурні напруження, що вели до деформації і руйнування покриття. При збільшенні дистанції більше 100 мм спостерігалося утворення покриття з частинок більшого розміру. Частинки меншого розміру втрачали швидкість і температуру, що призводило до їхнього передчасного застигання. Це призводило до отримання покриття із збільшеною пористістю.

Вплив витрат плазмоутворювального газу (аргону) пов’язаний з швидкістю виходу плазмового струменю. Із збільшенням витрати аргону до 0,5 л/с зростав об’єм плазми та підвищувались її енергетичні характеристики. Це сприяло більш ефективному нагріву і розпиленню часток дроту. При подальшому підвищенні витрати плазмоутворювального газу (вище 0,5 л/с) відбувалося зниження КВМ (не більше 60 %), внаслідок підвищення розбризкування часток дроту. Також, при значному підвищенні швидкості плазмового струменю, деякі частинки не встигали розплавлятися і попадали в

покриття в початковому стані, що приводило до зниження властивостей покриттів.

Таким чином було обрано оптимальні режими для нанесення покриттів плазмово-дуговим способом порошковим дротом 120Х14Р2С1 і зведено у таблицю. 3.2

Таблиця 3.2 – Параметри оптимального режиму нанесення покриттів

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення параметра
Струм дуги плазмотрона	А	220…240
Напруга на дузі	В	90
Дистанція напилення	мм	90…100
Витрата аргону	л/с	0,3…0,5
Швидкість подачі дроту	м/с	0,05…0,06
Діаметр порошкового дроту	мм	2,0
Виліт дроту	мм	10…12

Швидкість обертання деталі при напиленні складала 2,0…2,5 об/с. При збільшенні обертів спостерігалося нерівномірне нанесення покриття, зменшення обертів менше 2,0 об/с призводило до збільшення товщини покриття, що в свою чергу впливало на міцність. При зменшенні або збільшенні швидкості подачі дроту (див. табл. 3.1) відбувалося порушення процесу напилення, наприклад нестабільне горіння дуги. В цілому швидкість подачі дроту разом з швидкістю обертання деталі на експериментально вибраних режимах забезпечували стабільне та рівномірне формування покриття і сприяло оптимальному розподілу теплового навантаження на деталь.

3.4 Дослідження властивостей напиленого покриття

Дослідження структури покриттів є надійним способом оцінки якості покриття і дозволяє судити не тільки про мікроструктуру, пористість та наявність забруднень, але й про характер зв’язків на межі «покриття-підкладка».

Металографічними дослідженнями встановлено, що напилений метал, який напилявся на оптимальних режимах (див. табл. 3.1) проплавлений на всю глибину, а лінія сплавлення на мікрошліфах виявляється чітко у вигляді суцільної прямої (рис 3.4).

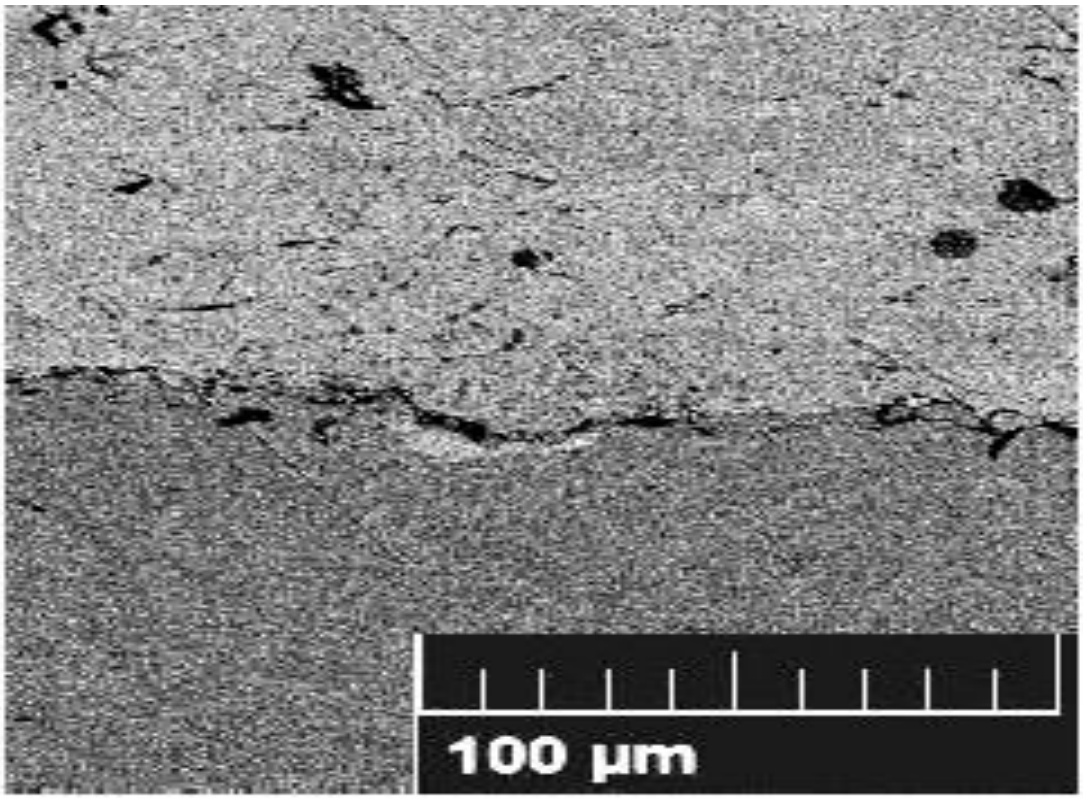


Рисунок 3.4 – Мікроструктура напиленого покриття з основою проведених на оптимальних режимах

При зміні режимів (збільшення струму до 280 А, збільшення дистанції більше 110 мм, підвищення витрати плазмоутворювального газу до 0,7 л/с),

відбувалося формування покриття з збільшеним розміром часток, що призводило до підвищення пористості і невеликому зниженню міцності зчеплення покриття з основою при зберіганні суцільної лінії сплавлення (рис. 3.5).

При параметрах режиму, що відповідали нижчим показникам від оптимальних (зменшення струму до 200 А, дистанція напилення менше 90 мм, витрата плазмоутворювального газу становила 0,25 л/с), спостерігалося порушення суцільності лінії сплавлення, зростала пористість і кількість оксидних та неметалевих включень (рис. 3.6)

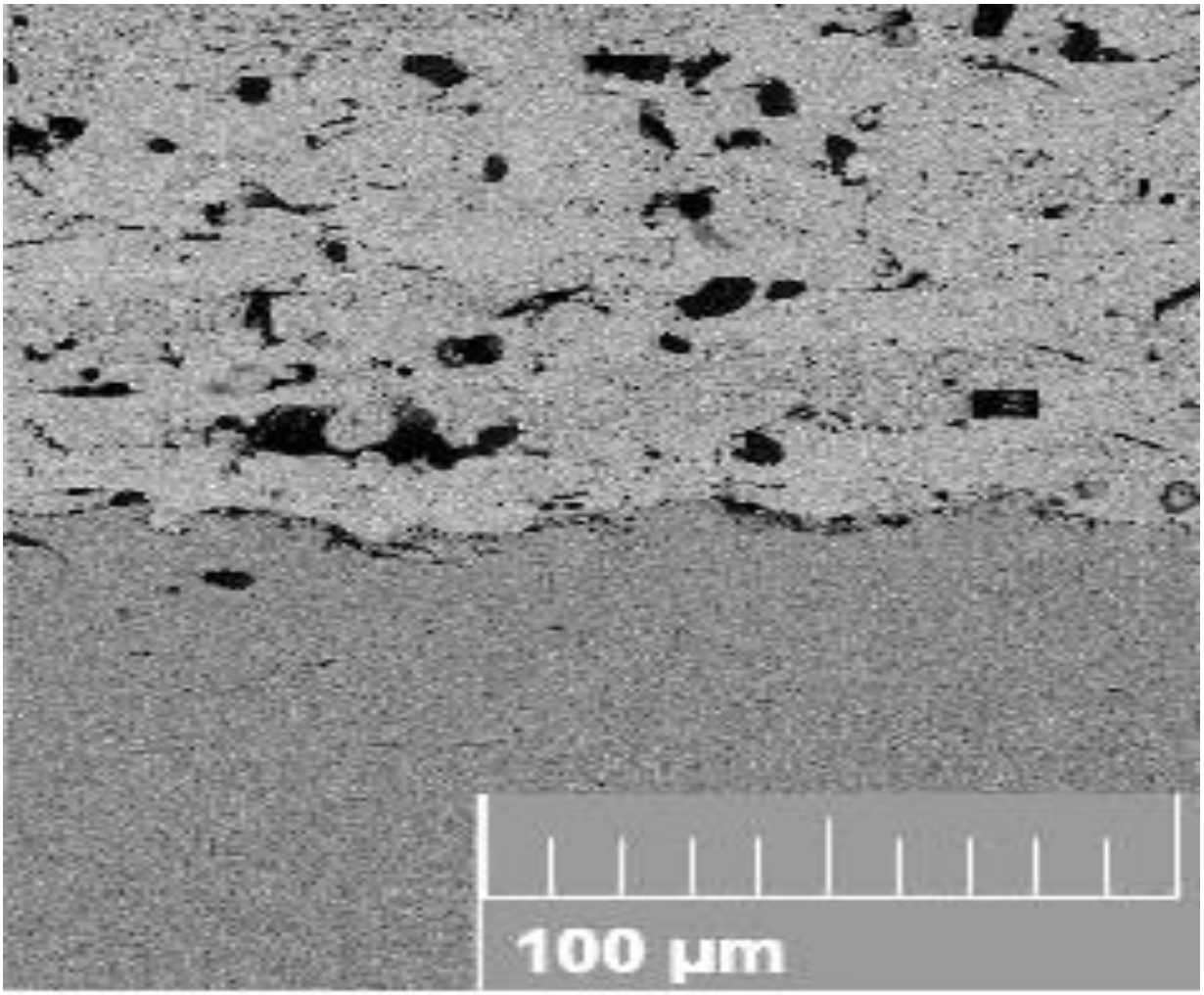


Рисунок 3.5 – Мікроструктура напиленого покриття з основою проведених на збільшених режимах

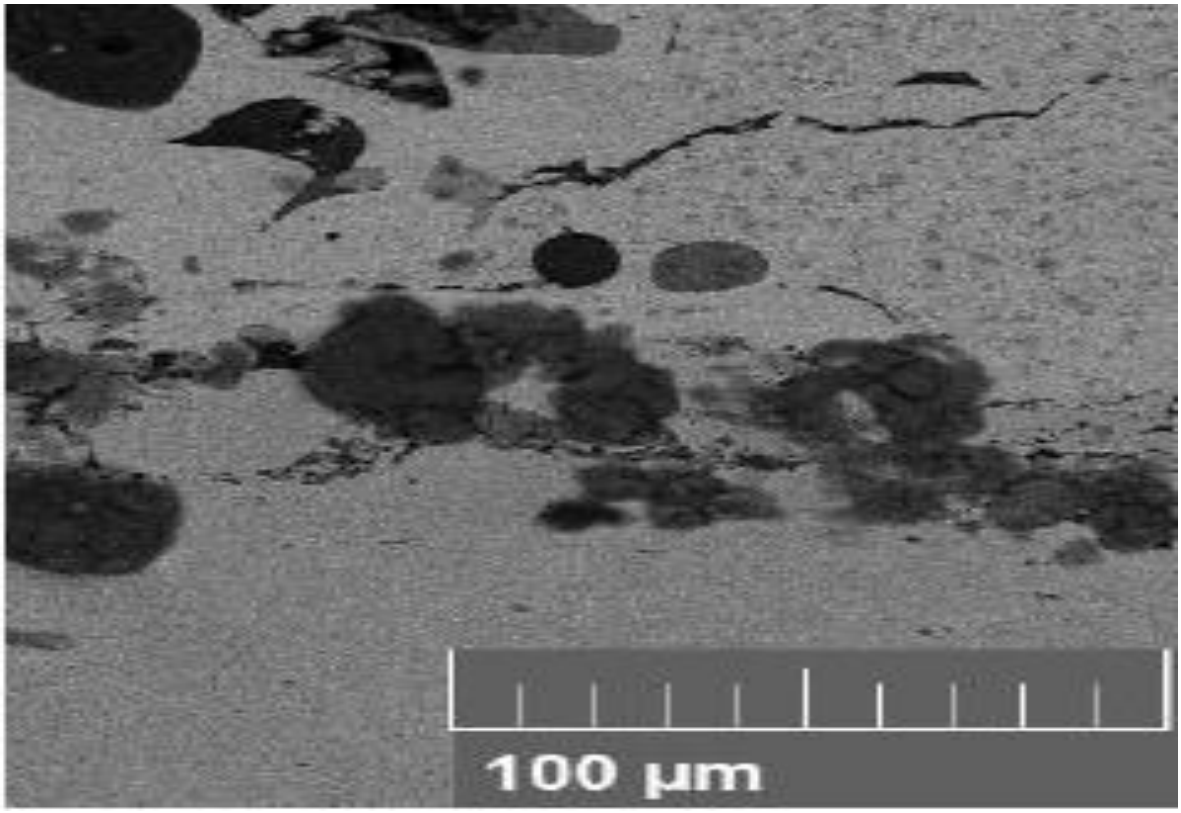


Рисунок 3.6 – Мікроструктура напиленого покриття з основою проведених на занижених режимах

Також було проведено дослідження залежностей основних властивостей покриттів від процесу проведення напилення на різних режимах. При використанні оптимальних параметрів режиму напилення було проведено випробування на міцність зчеплення, мікротвердість і зносостійкість за методиками описаними в розділі 2. Визначено, що КВМ складав 75…80 %, а пористість формуємого покриття на перевищувала 8…10 %. Міцність зчеплення покриття з основою складала 55…60 МПа, мікротвердість від 1000 МПа до 1200 МПа, а інтенсивність зношування $0{,}2…0{,}3 \cdot 10^{-7}$м.

На рисунку 3.7 представлені залежності міцності зчеплення і мікротвердості від сили струму дуги плазмотрона.

На рисунку 3.8 представлені залежності міцності зчеплення і мікротвердості від дистанції напилення.

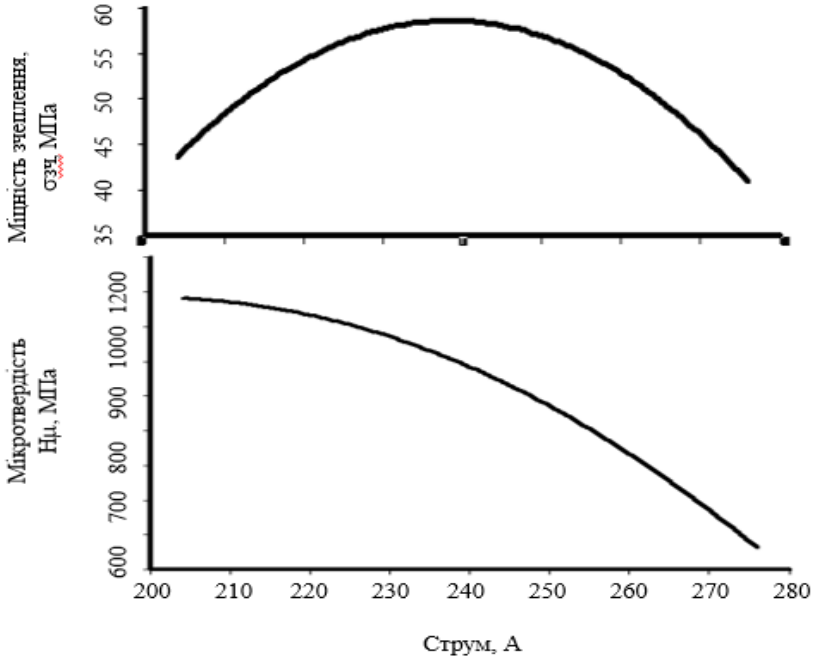


Рисунок 3.7 – Залежність міцності зчеплення мікротвердості від сили струму дуги плазмотрона

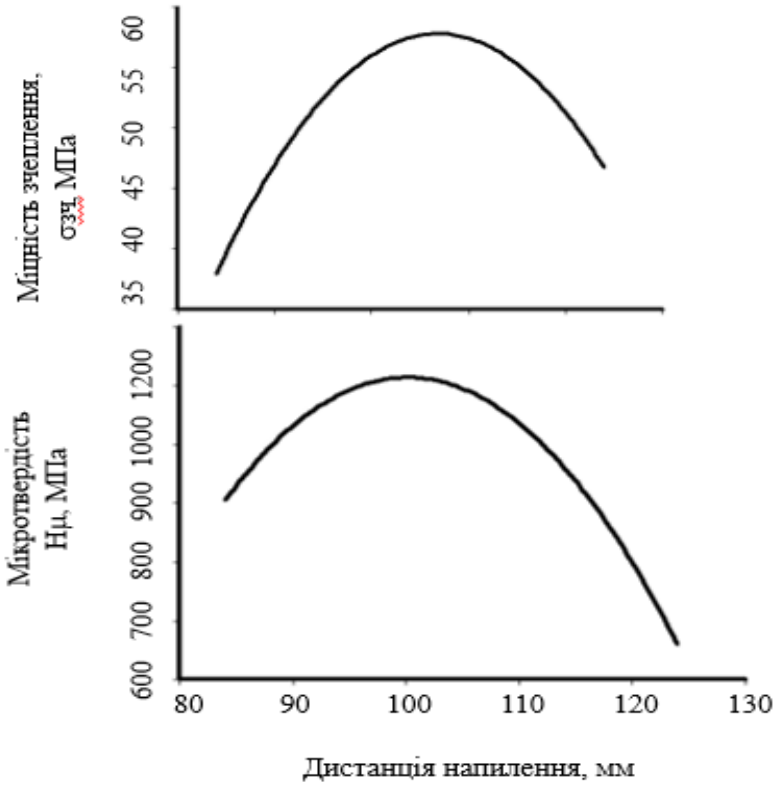


Рисунок 3.8 - Залежність міцності зчеплення мікротвердості від дистанції напилення

ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз методів підвищення зносостійкості деталей гідроапаратури та показано, що нанесення захисних покриттів методом плазмового напилення дозволяє підвищити зносостійкість деталей в 2-3 рази у порівнянні з виготовленими з конструкційних сталей.

2. Розроблена технологія нанесення зносостійких покриттів на деталі гідроапаратури порошковим дротом, що включає в себе:

- підготовку та активацію поверхні деталі під напилення шляхом нарізання «рваної різі»;

- нанесення покриття плазмовим методом з використанням установки Київ-7 з підбором оптимальних режимів процесу;

- механічну обробку покриття.

3. Проведено дослідження дослідних напилених зразків на міцність зчеплення, мікротвердість та зносостійкість при різних режимах напилення.

4. Встановлено, що основні оптимальні режими (струм дуги плазмотрона 230…240 А, дистанція напилення 90…100 мм, витрата плазмоутворювального газу аргону 0,30…0,50 л/с, швидкість подачі дроту 0,05…0,06 м/с) позитивно впливають на властивості покриття.

5. Побудовані графіки залежності міцності зчеплення і мікротвердості від таких параметрів, як струм і дистанція напилення.

6. Отримані результати свідчать про необхідність проведення подальших робіт по відпрацюванню технології нанесення плазмових покриттів і розширити номенклатуру оброблюваних деталей.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Корж В. М. Нанесення покриття: Навч. посібник / В. М. Корж. К. : Арістей, 2005. – 204 с.

2. О. Олійник, Р. Рязанцев, Н. Пенкіна. Гідропривод: Навч. посібник. К. : Науково-методичний центр ВФПО, 2024. – 212 с.

3. Пащенко В.М. Обладнання для газотермічного нанесення покриттів: Навч. Посіб. – К. : Політехніка, 2001.

4.Стоєв П. І., Литовченко С. В., Гірка І. О., Грицина В. Т. Хімічна корозія та захист металів: Навч. посібник. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. – 216 с.

5. Рожков О.Д. Технологія нанесення покриттів. Частина І: Навч. посібник. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2008. - 51 с.

6. Лузан С.О., Крахмальов О.В., Швець М.С., Черкашин М.О. Розробка технології напилення зносостійкого шорсткого покриття на деталі машин. Збірник наукових матеріалів міжнародної науково-практичної інтернет-конференції "Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту" (14-15 листопада 2018 року). Кропивницький. С. 48 – 53.

7. Gang Ji, T.Grosdidier, J-P.Morniroli. Microstructure of a High-Velocity OxyFuel Thermal-Sprayed Nanostructured Coating Obtained from Milled Powder. Metallurgical and Materials Transactions A. -V. 38A. -2007. -P. 2455-2463.

8. Hao R.L. Thermal Spray Technology and its Applications in the iron & Steel Industry in China //ASM International, 2007, P. 291 - 296.

9. Smirnov, A. Lopata, T. Smirnova, L. Lopata Improvement of functional properties of gas-thermal coatings by electrocontact treatment Problems of Tribology. 2020. Vol. 25. No.1/95. 41-48I. ISSN: 2079-1372. DOI: https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-95-1-41- 48.

10. Михайловська, О. В. Підвищення якісних характеристик плазмових покриттів: дипломна робота бакалавра: 132. Харків : ХНАДУ, 2023. – 109 с.

11. Зносостійкість сплавів, відновлення та зміцнення деталей машин: Навч. посібник за загал. ред. В. С. Попова. Запоріжжя : Вид-во ВАТ «Мотор Січ», 2006. – 420 с.

12. Корас В.М. Технологія та обладнання для напилення : Навч. посібник. К. : НМЦ ВО, 2000. – 152 с.

13. Погребова І. С., Янцевич К.В. Корозійна стійкість хромсиліцидних покриттів на сталі 45 у різних агресивних середовищах. Харків : Вісник ХНТУ. № 2 (85), 2023. С. 71-75.

14. Кирилович В. А, Мельничук П.П., Яновський В.А. Основи технологій обробки поверхонь деталей машин : підручник за ред. В.А. Кириловича. Житомир: Видавець Євенок О. О., 2017. – 266с.

15. Білик І. І. Технологія та обладнання напилених покриттів: Навч. посібник для студентів вищ. начв. зак. Київ: Політехніка, 2002. – 101 с.

16. Лузан С. О. Зміцнення болтів штовхачів плунжерів паливних насосів дизельних двигунів. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Автомобіле- та тракторобудування. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Automobile and Tractor Construction: зб. наук. пр. Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2025. № 1. С. 55-60.

17. Mrdak M. R. Microstructure and mechanical properties of nickel-chrome-bor-silicon layers produced by the atmospheric plasma spray process. Vojnotehnicki glasnik – Military Technical Courier. 2012. Vol. LX. Iss. 1. P. 183–200. https://doi.org/10.5937/vojtehg1201183M.

18. Лузан С. О., Ситников П. А. Структура та властивості плазмових покриттів, напилених композиційним матеріалом, одержаним з використанням СВС-процесу. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2023. № 2 (85). С. 49–57. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.6.

19. Шиліна О. П., Осадчук А. Ю. Газотермічні методи напилювання покриттів : Навч. посібник. Вінниця: ВНТУ, 2007. – 103 с.

20. Thiem P. G., Chornyi A., Smirnov I. V., Krüger M. Comparison of microstructure and adhesion strength of plasma, flame and high velocity oxy-fuel sprayed coatings from an iron aluminide powder. Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 324, No 5. P. 498 – 508. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.06.016.

21. Кучеренко Ю.С., Матвійчук В.А. Основні технології та способи нанесення покриттів газотермічним напиленням. Вісник Хмельницького національного університету. 2021. № 6, (303). С. 240-242.

22. Шевченко В. Г. Дослідження та розробка матеріалу для відновлення деталей гідроапаратури будівельно-дорожньої техніки : дис. … канд. техн. наук : 05.02.01. Запоріжжя, 1991. 185 с.

23. https://weldmaster.ub.ua/analitic/17361-naplavka-tverdymi-splavami--odiniz-sposobov-vosstanovleniya-detaley.html.

24. Шиліна, О. П., Осадчук А. Ю. Газотермічна обробка матеріалів : Лабораторний практикум. Вінниця : ВНТУ, 2004. 73 с.

25. Диха О. В., Рудик О. Ю. Контроль якості покриттів : навч. посіб. Хмельницький : ХНУ, 2021. 166 с.

26. Закалов О.В. Основи тертя і зношування в машинах : Навч. посіб. Тернопіль : Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 322 с.

27. Пелевін Л. Є., Міщук Д. О., Рашківський В. П., Горбатюк Є. В., Аржаєв Г. О., Красніков В. Ф. Гідравліка, гідромашини та гідропневмоавтоматика : Підручник для студентів вищих технічних навчальних закладів, які навчаються за напрямами підготовки «Інженерна механіка», «Педагогічна освіта», «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології», «Прикладна механіка» та «Електромеханіка». Київ : КНУБА, МОНУ, 2015. 340 с.