

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

**МР. АТм-82.00.00.000 ПЗ**

**Група АТм-24-2**

**Михайло Мельник**

**2025**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інженерної механіки і робототехніки

Кафедра Автомобільного транспорту

Мельник Михайло Іванович

УДК 621.793.72

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

**Тема** Аналіз впливу технологічних параметрів на експлуатаційні властивості електродугових покриттів при реставрації автомобільних деталей в умовах підприємства «Модерн-Авто», м. Івано-Франківськ.  
(назва згідно з наказом ректора)

Автомобільний транспорт  
(назва освітньої програми)

274 – Автомобільний транспорт  
(шифр і назва спеціальності)

Студент \_\_\_\_\_ М.І. Мельник  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник \_\_\_\_\_ Прунько Ігор Богданович, к.т.н., доц.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

**Допущено до захисту**

завідувач кафедри автомобільного транспорту

д.т.н, професор. \_\_\_\_\_ С.І. Криштопа  
(посада) (підпис) (дата) ініціали та прізвище)

Рецензент

\_\_\_\_\_  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

**Івано-Франківськ - 2025**

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**  
( повне найменування вищого навчального закладу )

Інститут: інженерної механіки і робототехніки

Кафедра: автомобільного транспорту

Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр

Спеціальність: 274 “Автомобільний транспорт”

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завкафедрою АТ

\_\_\_\_\_ С.І. Криштопа

„\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ**

Студенту \_\_\_\_\_ Мельнику Михайлу Івановичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

**1 Тема роботи** Аналіз впливу технологічних параметрів на експлуатаційні властивості електродугових покриттів при реставрації автомобільних деталей в умовах підприємства «Модерн-Авто», м. Івано-Франківськ.

керівник проєкту (роботи) \_\_\_\_\_ Прунько Ігор Богданович, к.т.н., доц.

Затверджена наказом ректора університету від \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_ 2025 р.

**2 Термін здачі студентом закінченої роботи** \_\_\_\_\_

**3 Вихідні дані до роботи** Дані по підприємству «Модерн-Авто», інформація швидкозношуваних деталях автомобілів, які найчастіше підлягають заміні (за данми підприємства бази практики).

**4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки** 1. Аналіз роботи підприємства «Модерн-Авто», м. Івано-Франківськ. 2. Аналіз застосування процесу нанесення електродугових покриттів для підвищення зносостійкості деталей автомобілів. 3. Дослідження покриттів, нанесеного методом електродугового покриття. 4. Безпека праці при нанесенні покриттів електродуговим способом.

**5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)**

1 Графічні презентаційні матеріали

**6. Консультанти з проєкту (роботи), із зазначенням розділів проєкту**

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	доц. Прунько І.Б.		

**7. Дата видачі завдання “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.****КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

Пор №	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Термін виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	РОЗДІЛ 1. Аналіз роботи підприємства «Модерн-Авто», м. Івано-Франківськ.	10.09.2025	
2	РОЗДІЛ 2. Аналіз застосування процесу нанесення електродугових покриттів для підвищення зносостійкості деталей автомобілів	2.10.2025	
3	РОЗДІЛ 3. Дослідження покриттів, нанесеного методом електродугового покриття	29.10.2025	
4	РОЗДІЛ 4. Безпека праці при нанесенні покриттів електродуговим способом	20.12.2025	
5	Оформлення графічної частини	21.12.2025	

**Студент****Михайло МЕЛЬНИК**  
(підпис) (розшифрування підпису)**Керівник роботи****Ігор ПРУНЬКО**  
(підпис) (розшифрування підпису)

## АНОТАЦІЯ

Мельник М.І.

Тема роботи: Аналіз впливу технологічних параметрів на експлуатаційні властивості електродугових покриттів при реставрації автомобільних деталей в умовах підприємства «Модерн-Авто», м. Івано-Франківськ.

Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт».

Заклад освіти Івано-Франківський національний технічний університету нафти і газу.

Івано-Франківськ, 2025 рік.

Робота містить 81 сторінок, 14 таблиць, 25 рисунків, список літератури з 53 найменувань.

У роботі проаналізовано існуючі методи та фізичні принципи отримання електродугових покриттів. Вказано на основні їх переваги та недоліки.

Проаналізовано результати дослідів з нанесення покриттів, на основі чого зроблено рекомендації з впровадження у виробництво.

Ключові слова: Електродугове напилення, реставрація.

## ABSTRACT

Melnyk M.I.

Topic of the work: Analysis of the influence of technological parameters on the operational properties of electric arc coatings during the restoration of automotive parts in the conditions of the enterprise "Modern-Avto", Ivano-Frankivsk.

Specialty 274 "Automobile Transport".

Educational institution Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Ivano-Frankivsk, 2025.

The work contains 81 pages, 14 tables, 25 figures, a list of references of 53 names.

The work analyzes existing methods and physical principles of obtaining electric arc coatings. Their main advantages and disadvantages are indicated.

The results of experiments on coating application are analyzed, on the basis of which recommendations for implementation in production are made.

Keywords: Electric arc spraying, restoration.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РОБОТИ ПІДПРИЄМСТВА «МОДЕРН-АВТО», М. ІВАНО-ФРАНКІВСЬК. ....	12
1.1 Структура та сфера надання послуг підприємства «Модерн-Авто», м. Івано-Франківськ. ....	12
1.2 Технічні характеристики автомобіля Пежо Боксер.....	14
Висновки до розділу 1 .....	16
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛІВ.....	17
2.1 Огляд застосування процесу електродугових покриттів .....	17
Висновки до розділу 2 .....	24
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКРИТТІВ, НАНЕСЕНОГО МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ПОКРИТТЯ .....	25
3.1 Матеріали та методи .....	25
3.2 Результати дослідження та їх обговорення .....	31
Висновки до розділу 3 .....	38
РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ПРАЦІ ПРИ НАНЕСЕННІ ПОКРИТТІВ ЕЛЕКТРОДУГОВИМ СПОСОБОМ .....	40
4.1 Значення охорони праці в забезпеченні безпечних та здорових умов праці .....	40
4.2 Аналіз потенційних небезпек та шкідливих факторів виробничого середовища.....	40
Характеристика потенційно небезпечних виробничих факторів та їх допустимі значення.....	42
4.3 Забезпечення нормальних умов праці.....	44
4.4 Забезпечення безпеки технологічних процесів та експлуатації обладнання .....	47
4.5 Розрахунок захисного заземлення установки УД 209М.УХЛ4.....	49

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Мельник М.І.			Аналіз впливу технологічних параметрів на експлуатаційні властивості електродугових покриттів при реставрації автомобільних деталей в умовах підприємства «Модерн-Авто», м. Івано-Франківськ. Пояснювальна зписка	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив		Прунько І.Б.						
Рецензент						ІФНТУНГ гр. АТм-24-2		
Н. Контр.		Прунько І.Б.						
Затвердив		Криштопа С.І.						

Висновки до розділу 4 .....	53
ВИСНОВКИ.....	55
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА .....	57
ДОДАТКИ.....	64

					MP. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Як відомо, значна частина машинобудівних конструкцій працює в важких умовах одночасної дії багатьох факторів – високих і неоднорідно розподілених напруг, циклічних навантажень, що викликають втому матеріалу виробів; важливі також і такі фактори як підвищені та високі температури, вплив агресивного середовища і тому подібне.

У зв'язку з цим при їх виготовленні необхідний пошук таких технологій, які дозволили б задовольнити, якщо не всі, то по крайній мірі найважливіші вимоги до характеристик матеріалу. Зокрема, ДСТУро стоїть питання підвищення ресурсу транспортної техніки, який у першу чергу, спрямований на збільшення довговічності двигунів та інших визначальних елементів їх конструкції.

Ця проблема має велике значення взагалі для народного господарства, в тому числі для транспортних засобів.

Продовження можливості їх експлуатації досягається використанням нових технологій, які дозволяють підвищити триботехнічні і механічних характеристики деталей, вузлів і агрегатів, а також максимально залишкового ресурсу важконавантажених деталей двигунів.

Таким чином, проблема підвищення зносостійкості деталей транспортних засобів і трибосистем в цілому є актуальною і вимагає всестороннього підходу і вивчення. При цьому технологічний процес виготовлення, ремонту і відновлення деталей (агрегату) передбачає не тільки досягнення необхідних геометричних параметрів, але і, головним чином, усунення або сповільнення руйнівних процесів, які природно протікають на поверхні деталі. Тому при досить великій кількості способів актуальною проблема пошуку нових ефективних технологій, що забезпечують підвищення ресурсу робочих поверхонь.

**Метою магістерської роботи** є проведення дослідження у напрямку застосування методу електродугової покриттів деталей автомобілів. Отримані результати та дозволять надати рекомендації виконання яких допоможе підвищити зносостійкість швидкозношуваних деталей.

					MP. ATm – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

**Об'єкт дослідження** керування процесом формування потоку розпилювального повітря та перенесення частинок рідкого металу з електродів під час дугового напилення. Однією з проблемних зон процесу дугового напилення є окислення частинок розпиленого металу киснем повітряного потоку під час їх транспортування до напилюваної поверхні. Це призводить до утворення достатньо великої кількості оксидів хімічних елементів, які значно погіршують адгезійну міцність та вигорають легуючі елементи, необхідні для отримання зносостійкого та корозійностійкого покриття. Придатність та довговічність покриттів під час використання залежить від міцності адгезії до основи.

**Предмет дослідження** процес нанесення зміцнюючого покриття методом електродугової металізації.

**Методи дослідження** 1. Обґрунтувати необхідність використання спеціального недорогого обладнання для створення пульсуючого потоку повітря під час дугового напилення.

2. Виконати систематичний аналіз даних, отриманих у процесі нанесення покриттів за допомогою імпульсного потоку розпилення.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

**Наукова новизна результатів роботи** полягає в тому, що це детальне дослідження впливу технологічних параметрів електродугової металізації на властивості покриття, що дозволяє запропонувати нові підходи до розробки високоефективних захисних покриттів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практичне значення результатів полягає в можливості їх використання для оптимізації технологій нанесення покриттів, що використовуються в машинобудуванні, енергетиці та інших галузях промисловості, що вимагають високої зносостійкості та міцності матеріалів.

					MP. ATm – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

**Структура та обсяг роботи.** Магістерська роботи викладена у 4 розділах пояснювальної записки, всі розділи супроводжуються висновками, а також розроблена графічна частина презентації.

					MP. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РОБОТИ ПІДПРИЄМСТВА «МОДЕРН-АВТО», М. ІВАНО-ФРАНКІВСЬК.

## 1.1 Структура та сфера надання послуг підприємства «Модерн-Авто», м. Івано-Франківськ.

Реєстраційні дані

Час витягу з ЄДР

6 грудня 2025 р. о 20:20

Повна назва

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «МОДЕРН-АВТО»

Назва англійською мовою

LIMITED LIABILITY COMPANY "MODERN-AUTO"

Адреса: 76007, Україна, Івано-Франківська обл., місто Івано-Франківськ, вулиця Максимовича, будинок 15

Дата заснування

10.01.2012

Директор

Труханівський Андрій Михайлович

Код ЄДРПОУ

37952380

Статутний капітал

650 000 ₪

Основний вид діяльності:

45.11 Торгівля автомобілями та легковими автотранспортними засобами

Інші види діяльності

Торгівля іншими автотранспортними засобами, Технічне обслуговування та ремонт автотранспортних засобів, Оптова торгівля деталями та приладдям для автотранспортних засобів, Роздрібна торгівля деталями та приладдям для автотранспортних засобів

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Керівники: Труханівський Андрій Михайлович

Власники: Угреньок Людмила Василівна

Україна

Засновник

325 000 €50%

Човганюк Володимир Васильович

Україна

Засновник

325 000 €50%

Човганюк Володимир Васильович

Україна

Кінцевий бенефіціарний власник

Угреньок Людмила Василівна

Україна

71.20 Технічні випробування та дослідження



Рисунок 1.1 – Підприємство «Модерн-Авто» Івано-Франківськ

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

## 1.2 Технічні характеристики автомобіля Пежо Боксер



Рисунок 1.2 – Фургон Пежо Боксер

					MP. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14



	435					440		
	L1H1	L2H2	L3H2	L3H3	L4H2	L4H3	L4H2	L4H3
<b>ДВИГУН</b>								
Тип	Турбований Дизельний Двигун							
Кількість циліндрів / клапанів	4 / 16							
Робочий об'єм (см³)	2179							
Максимальна потужність, КВт (к/с)	121 (165)							
при об/хв	3750							
Максимальний крутний момент EEC (Nm)	370							
при об/хв	1 750							
<b>НОРМИ ТОКСИЧНОСТІ</b>								
Екологічний клас	EURO 6							
<b>ТРАНСМІСІЯ</b>								
Тип	6-ступінчата механічна							
<b>ПІДВІСКА</b>								
Передня підвіска	Незалежна, покращений «МакФерсон» з типом стійки з пружинами об та інтегральними амортизаторами							
Задня підвіска	Поздовжні ресори з телескопічними амортизаторами							
<b>ГАЛЬМІВНА СИСТЕМА</b>								
Передні гальма	Дискові вентильовані							
Задні гальма	дискові							
<b>КОЛЕСА</b>								
Радіус колісних дисків	R16							
Шини	вантажні шини 215/75 R16C				225/75 R16C			
<b>МІСТКІСТЬ</b>								
Кількість місць	2/3							
Завантажувальний об'єм VDNA (m³)	8	11,5	13	15	15	17	15	17
<b>МАСА (кг)</b>								
Споряджена маса	1935	2000	2050	2075	2095	2125	2140	2170
Вантажопідйомність	1565	1500	1450	1425	1405	1375	1865	1835
Повна маса	3500	3500	3500	3500	3500	3500	4005	4005
Максимальна маса причепа на буксирі	3000	3000	3000	3000	3000	3000	2495	2495
Максимальна допустима маса автомобіля з причепом	6500	6500	6500	6500	6500	6500	6500	6500
Навантаження на передню / задню вісь	2100 / 2400							
<b>ЗОВНІШНІ РОЗМІРИ (мм)</b>								
Ширина без дзеркал	2050							
Довжина	4963	5413	5998	5998	6363	6363	6363	6363
Висота	2254	2522	2522	2760	2522	2760	2522	2760
Колісна база	3000	3450	4035	4035	4035	4035	4035	4035
Передній звіс	948	948	948	948	948	948	948	948
Задній звіс	1015	1015	1015	1015	1380	1380	1380	1380
<b>ВНУТРІШНІ РОЗМІРИ (мм)</b>								
Довжина підлоги вантажної зони	2670	3120	3705	3705	4070	4070	4070	4070
Висота навантаження вантажної зони (максимум)	1662	1932	1932	2172	1932	2172	1932	2172
Ширина: Відстань між колісними арками	1422							
Ширина: Відстань по бортах	1870							
Ширина бічних дверей	1075	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250
Висота бічних дверей	1485	1755	1755	1755	1755	1755	1755	1755
Ширина задніх дверей	1562	1562	1562	1562	1562	1562	1562	1562
Висота задніх дверей	1520	1790	1790	2030	1790	2030	1790	2030
Висота завантаження	509	494	504	506	601	561	601	561
<b>ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ</b>								
Максимальна швидкість, км/год	160	156	156	150	156	150	90	90
Витрата пального <sup>1</sup> (міський цикл), л/100 км:	6,7	6,7	6,9	6,9	6,9	6,9	6,7	6,7
Витрата пального <sup>1</sup> (заміський цикл), л/100 км:	5,9	5,9	6,1	6,1	6,1	6,1	6,2	6,2
Витрата пального <sup>1</sup> (змішаний цикл), л/100 км:	6,2	6,2	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
Вихід CO <sub>2</sub> (г/км)	163	163	168	168	168	168	169	169
Ємність бака для пального, л	90							

<sup>1</sup> Ці дані отримані в результаті випробувань згідно до технічних вимог та специфікацій Європейської Директиви 80/1268/EEC з поправками CEE 1999/100. Це узаконена стандартна процедура для порівняння витрат палива різних автомобілів різних виробників. Витрата пального під час реального експлуатації автомобіля може відрізнятися за рахунок манери водіння, дорожніх, погодних умов, комплектації автомобіля, умов використання, стилю автомобіля та інших умов, які впливають на витрату пального.

Рисунок 1.3 – Технічні характеристики автомобіля Пежо Боксер

В роботі розглядаємо швидкозношувану деталь – фрикційний диски. Він виготовляється зі сталі 65Mn (Китай, Європа). Українським аналогом даної сталі є сталь 65Г.

					MP. ATm – 82.00.00.000 ПЗ	Арк. 15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.4 – Комплект зчеплення

### Висновки до розділу 1

Проведено огляд діяльності підприємстві «Модерн-Авто». Наведено характеристики автомобіля Пежо Боксер. В якості швидкозношуваної деталі розглядаємо фрикційний диск.

					MP. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

## РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛІВ

### 2.1 Огляд застосування процесу електродугових покриттів

В останні десятиліття спостерігається значне зростання інтересу до розробки матеріалів з покращеними експлуатаційними характеристиками, такими як висока зносостійкість, корозійна стійкість та термостабільність [1–4]. Ці властивості особливо важливі для компонентів, що працюють в екстремальних умовах, що актуально для таких галузей промисловості, як машинобудування, енергетика, транспорт та сільськогосподарська техніка. Основні експлуатаційні проблеми, з якими стикаються матеріали в таких середовищах, включають передчасний знос, корозійну деградацію та зниження механічної міцності, що призводить до скорочення терміну служби виробу та збільшення витрат на обслуговування та заміну [5–8]. Одним із рішень цієї проблеми є використання об'ємно легованих сталей [9,10]. Однак в умовах, пов'язаних зі зростанням вартості легуючих елементів, доцільно використовувати низьколеговані сталі із захисним покриттям або модифікованими поверхневими шарами [11–16]. Захисні покриття можуть значно підвищити зносостійкість та довговічність деталей, одночасно знижуючи виробничі витрати.

Сталь 65Mn (65Г), завдяки своїм високим механічним властивостям, широко використовується для виробництва пружинних деталей, таких як пружини, листові ресори та інші елементи, що працюють під високими навантаженнями. Однак, через обмежену корозійну стійкість, він потребує додаткових захисних заходів для підвищення своєї довговічності в агресивних середовищах. У зв'язку з цим, нанесення захисного покриття на основі сталі 30ХГСА, відомої своєю високою корозійною та зносостійкістю, видається перспективним підходом. Комбіноване використання сталі 65Г як основи а сталь 30ХГСА як покриття відкриває нові можливості для покращення довговічності та експлуатаційних характеристик деталей у важких умовах експлуатації.

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Сьогодні існує багато технологій, які можна використовувати для нанесення захисних металевих покриттів, серед яких широко використовуються індукційне напилення [17–19], плазмове напилення [20–25], дугове напилення [26–29], газополуменеве напилення [30–33] та інші [34–37]. Серед них технологія електродугової металізації виявилася одним з найефективніших та економічно доцільних методів нанесення металевих покриттів [38–40]. Цей метод характеризується відносно низькими експлуатаційними витратами, простим обслуговуванням технології та можливістю досягнення вищих швидкостей напилення. Крім того, електродугове напилення забезпечує значні економічні переваги для обробки великих поверхонь, що сприяє його широкому застосуванню в промисловості [41–44]. Метод базується на плавленні дротяних електродів за допомогою електричної дуги та подальшому розпиленні розплавленого металу струменем стисненого повітря. Це дозволяє отримувати високі швидкості осадження та формувати покриття з щільною структурою та гарною адгезією до підкладки, що значно покращує механічні та експлуатаційні характеристики поверхонь. Однією з переваг електродугової металізації є можливість гнучкого регулювання параметрів процесу, таких як напруга, струм та швидкість подачі дроту, що дозволяє адаптувати покриття до конкретних умов експлуатації.

Процес формування газотермічних покриттів (рис. 2.1) полягає в тонкому розпиленні вихідного матеріалу (у разі його компактного стану) на дрібні частинки, нагріванні частинок до розплавленого або пластичного стану та переміщенні їх струменем газу до зіткнення з поверхнею виробу [1, 2].

					MP. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

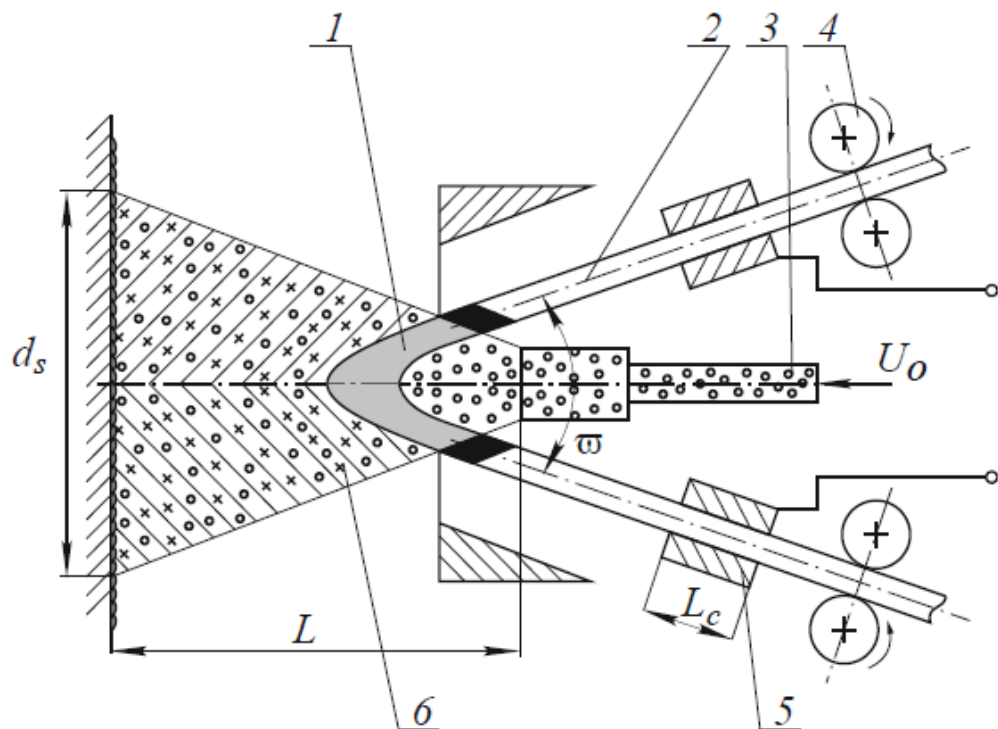


Рис. 1. Принципова схема металізації електродугою:

- 1 – зона горіння дуги; 2 – напилені металеві електроди; 3 – сопло;  
 4 – подавальні ролики; 5 – струмопідвід; 6 – двофазний потік;  $d_s$  – діаметр  
 плями напилення, 120–180 мм;  $L$  – відстань напилення, 100–150 мм;  
 $L_c$  – довжина ковзного контакту, 10–15 мм;  $\omega$  – кут подачі електрода, 10–45°;  
 $U_o$  – потік транспортування повітря

У практиці електродугового напилення прийнято низку напрямків для зменшення негативного впливу кисню напильного потоку на якість покриттів. Концептуально він базується на гіпотезі про зменшення частки кисню шляхом використання газових сумішей повітряного потоку з вуглецевмісними та інертними газами або заміни повітряного потоку іншими (нейтральними) газами.

Метою дослідження є пропонування більш досконалої системи розпилення частинок під час електродугової металізації, використовуючи пульсуючий потік розпилювального повітря для транспортування розплавлених частинок електродних дrotів різних типів. Це дозволить впливати на якість одержуваних покриттів за рахунок зменшення вигорання елементів, що переносяться з електродів на напильовану поверхню, за рахунок зменшення кількості кисню

повітря, що бере участь у транспортуванні розплавленого металу. Для досягнення мети поставлені такі завдання:

Розпилення стисненим повітрям забезпечує стабільне розпилення металу, який плавиться, але якість покриття не завжди стабільна і часто не відповідає заданим вимогам якості через велику кількість пор та оксидів [3]. Використання інертних газів для напилення при металізації [4] ускладнює технологію та обладнання і значно збільшує вартість процесу металізації.

Серед основних напрямків вирішення проблеми покращення якості покриттів, визначених у ресурсах світової наукової періодики, можна виділити низку публікацій, які розглядають перспективне використання стисненого повітря + вуглецевмісних газових сумішей [5, 6]. Це вносить додаткове тепло під час горіння суміші, зменшує надходження кисню до крапель металу під час відновного характеру газового струменя. При такому варіанті пропонується, наприклад, використовувати метан у суміші з повітрям. На промисловому У масштабі як вуглеводні широко використовується гас, який порціями вводиться в потік транспортуючого повітря; також було запропоновано використовувати продукти згоряння пропан-кисневої суміші як транспортуючий газ [7]. Однак у цих роботах кількісні розрахунки або взагалі відсутні, або носять приблизний характер, що не дозволяє повною мірою реалізувати переваги обраної схеми. Аналіз існуючих даних з електродугового напилення показує, що одним з основних недоліків процесу є окислення напилених металевих частинок киснем повітряного потоку під час транспортування до напиленої поверхні. Це суттєво впливає на експлуатаційні характеристики покриття.

Оптимізація режимів напилення відіграє ключову роль у забезпеченні якості покриття. У літературі [45,46] зазначається, що зміна параметрів процесу, таких як напруга, струм та швидкість подачі електродного дроту, суттєво впливає на структуру та властивості отриманого покриття. Ці параметри безпосередньо визначають швидкість плавлення та осадження матеріалу, що, у свою чергу, впливає на щільність покриття та його адгезію до підкладки. У дослідженні, представленому в посиланням [38], детально розглядається вплив різних режимів

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

електродугової металізації на механічні та фізичні властивості покриттів, нанесених на металеві підкладки. Було показано, що правильне налаштування технологічних параметрів дозволяє отримати високу зносостійкість та корозійну стійкість покриттів.

Зокрема, збільшення напруження призводить до утворення щільнішого покриття, що покращує його адгезію та підвищує його механічні властивості, такі як мікротвердість та зносостійкість. Однак надмірне збільшення напруження може спричинити небажані ефекти, такі як перегрів матеріалу та утворення мікротріщин у покритті. Ці зміни мікроструктури потребують подальшого аналізу, щоб забезпечити максимальну надійність покриттів.

Попередні дослідження [47,48] вже досліджували вплив таких параметрів процесу, як напруження, на структуру та властивості покриттів. Наприклад, у [47] показали, що збільшення напруження зменшує пористість покриття та збільшує його мікротвердість. Однак вплив напруження на корозійну стійкість досліджено недостатньо, що обмежує застосовність результатів у агресивних середовищах. В іншому дослідженні [48] вони досліджували властивості покриттів зі сталі 30ХГСА, отриманих методом надзвукової дугової металізації. Було виявлено, що оптимальне напруження сприяє формуванню щільної структури покриття з низькою пористістю, але дані про коефіцієнт тертя відсутні, а також немає детального аналізу механічних характеристик покриттів.

Метою цього дослідження є дослідження впливу режимів металізації електродугою на структуру та властивості покриттів зі сталі 30ХГСА, нанесених на сталь 65Г. Для досягнення цієї мети було проведено експериментальні роботи шляхом зміни параметра напруги при постійних значеннях струму, швидкості подачі дроту та тиску стисненого повітря. Такий підхід дозволяє детально дослідити вплив напруги на структуру покриття та його експлуатаційні властивості. Також, незважаючи на значний прогрес у дослідженні захисних покриттів, нанесення покриттів зі сталі 30ХГСА на сталь 65Г для покращення його Експлуатаційні характеристики залишаються недостатньо дослідженими, що

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

робить цю роботу актуальною для подальших досліджень та промислового впровадження.

Розпилення стисненим повітрям забезпечує стабільне розпилення металу, який плавиться, але якість покриття не завжди стабільна і часто не відповідає заданим вимогам якості через велику кількість пор та оксидів [3]. Використання інертних газів для напилення при металізації [4] ускладнює технологію та обладнання і значно збільшує вартість процесу металізації.

Серед основних напрямків вирішення проблеми покращення якості покриттів, визначених у ресурсах світової наукової періодики, можна виділити низку публікацій, які розглядають перспективне використання стисненого повітря + вуглецевмісних газових сумішей [5, 6]. Це вносить додаткове тепло під час горіння суміші, зменшує надходження кисню до крапель металу під час відновного характеру газового струменя. При такому варіанті пропонується, наприклад, використовувати метан у суміші з повітрям. На промисловому У масштабі як вуглеводні широко використовується гас, який порціями вводиться в потік транспортуючого повітря; також було запропоновано використовувати продукти згоряння пропан-кисневої суміші як транспортуючий газ [7]. Однак у цих роботах кількісні розрахунки або взагалі відсутні, або носять приблизний характер, що не дозволяє повною мірою реалізувати переваги обраної схеми.

Компанія Air Products and Chemical Inc. (США) запропонувала використовувати аргон, азот, вуглекислий газ, гексафторид сірки або їх суміш для розпилення хімічно активних металів під час металізації [8, 9]. Водночас запропоновано технологічно складний варіант, у якому масові витрати металу та газу співвідносяться у співвідношенні приблизно 1:10. У нормальних режимах витрата газу на метал на порядок нижча.

Таким чином, результати аналізу дозволяють зробити висновок, що всі запропоновані варіанти вдосконалення технології електродугової металізації суттєво не перешкоджають доступу кисню до зони горіння дуги. Таким чином, при подачі аргону, азоту або їх суміші до центрального транспортуючого струменя неминуче відбувається змішування кисню через турбулентність потоку та

					MP. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

незрівнянно малого співвідношення об'єму інертних газів до загального об'єму повітряного потоку [10, 11]. У варіанті повітря + вуглеводні суміш вже містить кисень. У цьому випадку, як і з інертними газами, вартість покриттів значно зростає через наявність додаткових витрат [12, 13]. Важливість підвищення ефективності покриттів підтверджується постійним пошуком рішень, спрямованих на спрощення технології та зниження витрат [14].

В рамках цього підходу автори роботи запропонували використання пульсацій розпилювального потоку повітря під час електродугового напилення. Пульсації розпилювального потоку досягаються за допомогою пульсатора, який підключений до системи подачі повітря електродугового металізатора згідно з кінематичною схемою, рис. 2.2.

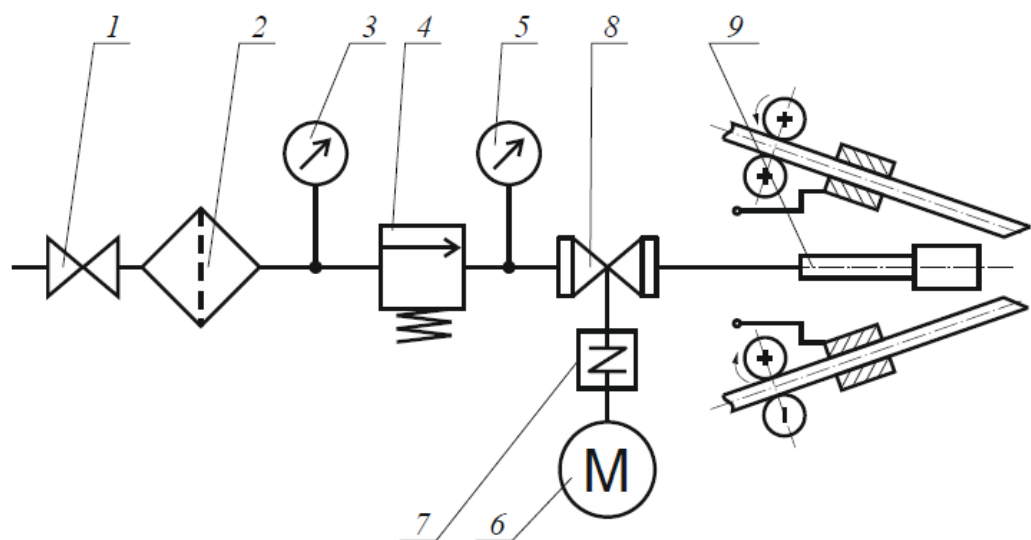


Рисунок 2.2 – Кінематична схема установки електродугового напилення з пульсуючим розпилювальним потоком: 1 – вхідний клапан з магістралі; fl – вологовіддільник; 3, 5 – манометр; 4 – редукційний клапан; 6 – двигун; 7 – муфта; 8 – пульсатор; 9 – розпилювальна форсунка металізатора.

Пульсація розпилювального потоку забезпечується за допомогою пульсатора простої конструкції. Як прототип використовується поворотний клапан [15].

На рис. 2.3 показано принцип роботи пульсатора, в якому шток, що обертається із заданою швидкістю, з наскрізним отвором періодично закриває

вхідний отвір і зупиняє потік повітря. Після повного оберту штока потік повітря відновлюється, при цьому з'являється можливість, змінюючи швидкість обертання штока, змінювати частоту пульсацій потоку повітря.

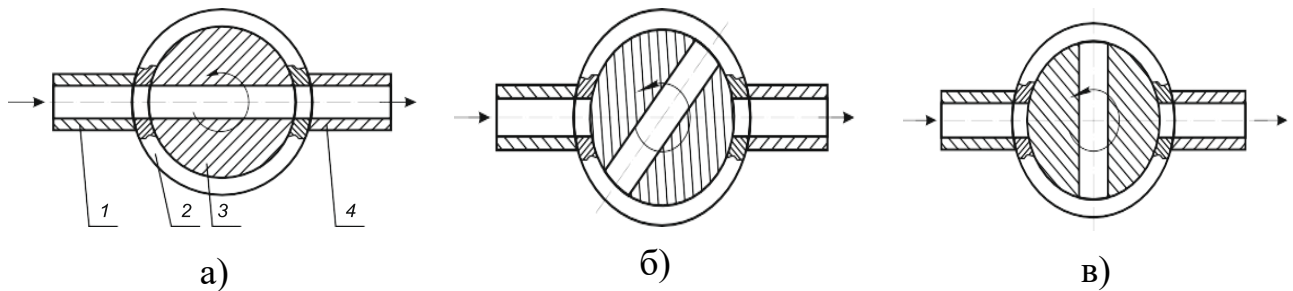


Рисунок 2.3 – Схема роботи поворотного клапана:

а – клапан відкритий; б – клапан закритий, шток повернутий на  $45^\circ$ ;  
 с – клапан закритий, шток повернутий на  $49^\circ$ ; 1 – вхідний повітряний патрубок; 2 – корпус; 3 – шток; 4 – вихідний патрубок

У [16, 17] розглянуто вплив пульсуючого потоку напилення на якість покриттів, отриманих напиленням безшовних дротів Св-08А, 12Х18Н10Т, 10Г2ФБ, та отримано такі результати:

- зменшується вигорання таких легуючих компонентів, як вуглець, марганець, кремній, збільшується їх кількість у складі покриття. Вміст вуглецю збільшується на 0,07 %, що в абсолютному вираженні відповідає збільшенню на 35 %, марганцю на 0,045 % (36 %), кремнію на 0,03 % (38 %);

- споживання повітря зменшується на 35–40 % при нанесенні 1 кг напиленого металу, і, як наслідок, споживання електроенергії на його виробництво, що є важливим показником економічної ефективності.

## Висновки до розділу 2

В розділі проаналізовано існуючі методи та фізичні принципи отримання електродугових покриттів. Вказано на основні їх переваги та недоліки.

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

## РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКРИТТІВ, НАНЕСЕНОГО МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ПОКРИТТЯ

### 3.1 Матеріали та методи

Як матеріал підкладки було обрано сталь 65Mn (65Г), яка є високовуглецевою низьколегованою сталлю з вмістом вуглецю близько 0,65%. Зразки підкладки були виготовлені у вигляді прямокутних пластин розмірами 25 × 25 × 10 мм. Перед нанесенням покриття поверхню зразків ретельно підготували. Для цього їх шліфували наждачним папером з послідовною зміною зернистості від 100 до 360 для досягнення необхідної гладкості та видалення оксидних плівок і забруднень. Потім було проведено піскоструминну обробку на верстаті Nordberg NS3 з використанням електрокорунду для створення шорсткості поверхні та збільшення адгезії покриття до основи. Хімічний склад сталі 65Mn (65Г) представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сталі 65Г (за масою, %).

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.62–0.7	0.17–0.37	0.9–1.2	0.25	<0.035	<0.035	<0.25	<0.2

Для проведення експериментів з електродами використовували сталевий дріт марки 30ХГСА (аналог AISI 1330) діаметром 1,4 мм, виготовлений відповідно до вимог ДСТУ 10543-98. Хімічний склад сталі 30ХГСА наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Хімічний склад сталі 30ХГСА (за масою, %).

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.28–0.34	0.9–1.2	0.8–1.1	<0.3	<0.025	<0.025	0.8–1.1	<0.3

Нанесення покриття проводилося за допомогою надзвукового дугового металізатора моделі SX-600 (Україна), яке представляє собою складне обладнання, що включає джерело живлення, дуговий розпилювач, систему керування та систему подачі стисненого повітря (Рис. 3.1).

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

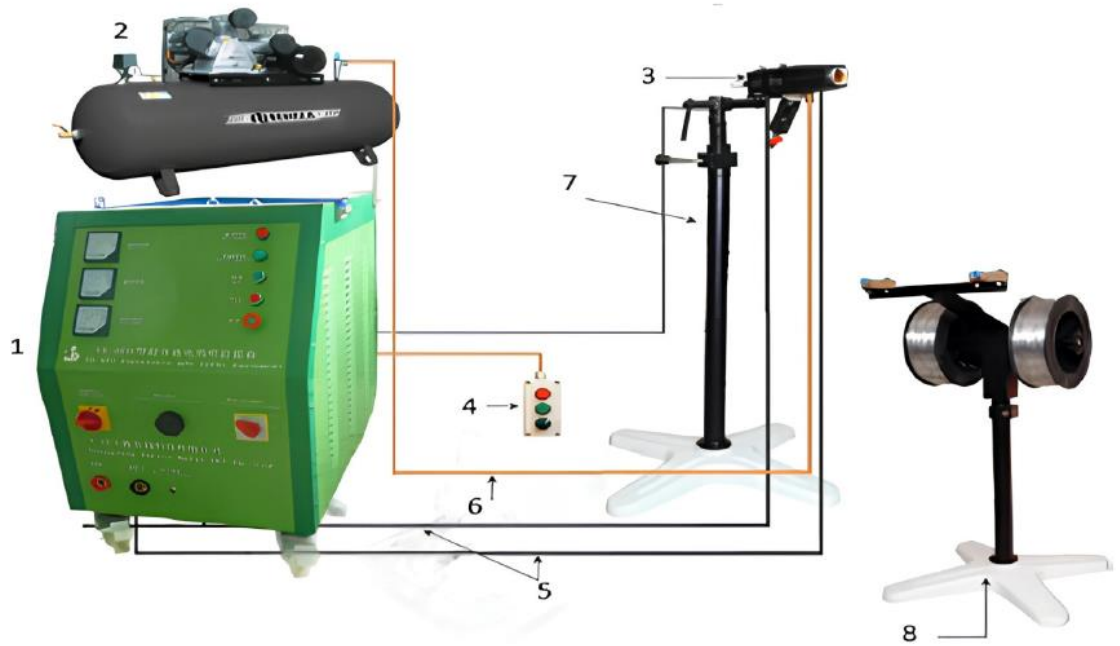


Рисунок 3.1 – Вигляд комплексу для високошвидкісної електродугової металізації SX-600: 1 — зварювальний випрямляч, 2 — поршневий компресор, 3 — фарбопульт, 4 — пульт дистанційного керування, 5 — кабелі живлення, 6 — повітряний шланг, 7 — маніпулятор, 8 — котушки з дротом (електроди).

Принцип роботи металізатора базується на плавленні дротяних електродів електричною дугою з подальшим розпиленням розплавленого металу струменем стисненого повітря [47]. Частини розплавленого металу, осідаючи на поверхні, погано суцільне покриття, а товщина покриття контролюється недостатньо проходів металізатора та швидкістю його руху повністю оброблюваної поверхні. Конструкція дугового металізатора забезпечує наявність прямих, через які вичерпується постійна подача двох металевих дротів. Між їх кінцями генерується електрична дуга, а через сопло металізатора подається стиснене повітря. Стишне повітря зі швидкістю понад 100 м/с відриває частинки розплавленого металу від кінців дротів та переносить їх на поверхню заготовки, утворюючи з високою адгезією та низькою пористістю.

					MP. ATm – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Таблиця 3.2 – Параметри напилення для високошвидкісної дугової металізації на установці SX600.

Зразок Назва	Напруга, В	Сила струму, А	Швидкість подачі дроту, см/с	Стиснене повітря Тиск, атм	Розпилення Відстань, мм	Кількість зразків
V1	30	300	4,3	8	400	3
V2	40					3
V3	45					3

Структуру аналізували на скануючому електронному приладі EVO-40XVP, ZEISS, з використанням системи мікроаналізу INCA Energy 350, Oxford (рис. 3.2). Було проведено елементний аналіз нанесеного шару [12].



Рисунок 3.2 – Скануючий електронний мікроскоп EVO-40XVP, ZEISS, з системою мікроаналізу INCA Energy 350, Оксфорд. Загальний вигляд.

Основні характеристики:

1. Компанія: Carl Zeiss AG.
2. Категорії – Мікроскопія: Електронна: SEM.

					MP. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

3. Характеристики:

– Роздільна здатність:

– 3,0 нм при 30 кВ (SE та W);

– 2,0 нм при 30 кВ (SE та LaB6)/

4. Напруга прискорення: від 0,2 до 30 кВ.

5. Збільшення: від 7 до 1 000 000х.

6. Поле зору: 6 мм на аналітичній робочій відстані (AWD).

7. Рентгенівський аналіз: 8,5 мм AWD та кут розгортки 35°.

8. Режими OptiBeam®: Роздільна здатність, Глибина, Аналіз, Широке поле.

9. Доступні детектори:

– SE у режимі високої напруги – Everhart –Thornley;

– BSD у всіх режимах – квадрантний напівпровідниковий діод;

10. Камера: 310 мм (Ø) × 220 мм (в)

11. 5-осьовий моторизований столик для зразка:

– X = 80 мм;

– Y = 80 мм;

– Z = 35 мм;

– T = 0° – 90°;

– R = 360° безперервно).

12. Керування сценою за допомогою миші або джойстика та панелі керування.

13. Обробка зображень:

– роздільна здатність: до 3072 × 2304 пікселів;

– отримання сигналу шляхом інтегрування та усереднення;

– відображення зображення: один монітор XVGA без мерехтіння, що відображає

зображення SEM з роздільною здатністю 1024 × 768 пікселів.

14. Системне керування SmartSEM™\*\*.

15. Графічний інтерфейс користувача з керуванням мишею та клавіатурою.

					MP. ATm – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

16. Багатомовний лаконічний графічний інтерфейс користувача

17. Операційна система: Windows® XP.

18. Вимоги до допоміжного пристрою: 100–240 В, 50 або 60 Гц, однофазне живлення, водяне охолодження не потрібне.

Мікротвердість за Віккерсом визначалася за допомогою приладу ПМТ-3 під навантаженням 200 г як середнє значення з 10–15 вимірювань [12].

Основні характеристики:

1. Збільшення мікроскопа: 130 та 487х.

2. Алмазна піраміда:

– кут при вершині: 136°;

– відстань від вершини до кінчика: не більше 1 мкм;

– межі навантаження: 2–200 г.

3. Межі вимірювання діагоналей: відбитки (з об'єктивом F = 6,2): 0,05–0,25 мм.

4. Столик:

– межі кута повороту: ~0–180°;

– межі поздовжнього переміщення: 0–10 мм;

– межі поперечного переміщення: 0–10 мм;

– ціна поділки шкали мікрометричної подачі: 0,01 мм.

5. Відносна ефективна апертура: колектор освітлювача:

1:0,7.

6. Живлення: через трансформатор від мережі змінного струму

127/220 В.

7. Габаритні розміри:

– мікротвердомір у робочому положенні:

410 × 290 × 200 мм;

– трансформатор 145 × 110 × 70 мм.

8. Вага:

– мікротвердомір: 21,6 кг;

– трансформатор: 1,72 кг.

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Метод базується на процесі плавного вдавлювання тетраедричної алмазної піраміди з кутом вершини  $136^\circ$ . Основним параметром для вимірювання є діагональ відбитка, що утворюється на поверхні зразка. Значення твердості визначається відношенням прикладеного навантаження  $P$  до площі поверхні відбитка.

Трибологічні випробування проводилися на універсальній машині тертя методом «куля-диск». Як контртіло використовувалася сталева куля з матеріалу ШХ15 діаметром 3 мм. Експерименти проводилися при нормальному навантаженні 10 Н, з лінійною швидкістю ковзання 3 см/с та радіусом кривизни зносу 1,50 мм. Загальний шлях тертя становив 70 м.



Рисунок 3.3 – Загальний вигляд машини тертя 2168 УМТ: 1 – силовий агрегат; 2 – машина тертя; 3 – панель керування

Для аналізу корозійної поведінки зразків використовувалися методи потенціодинамічної поляризації. Вимірювання проводилися в триелектродній електролітичній комірці, яка забезпечувала розділення катодного та анодного просторів. Експерименти проводилися при температурі  $25 \pm 10$  °С в атмосфері з доступом повітря та в розчині NaCl з концентрацією 3,5 мас.%. Як допоміжний електрод використовувався платиновий електрод, а для порівняння - хлорсрібний електрод (Ag/AgCl в 1 М KCl). Процес потенціодинамічної поляризації починався при -0,1 В та закінчувався при 0,1 В відносно потенціалу розімкнутого кола, з розгортанням потенціалу 0,5 мВ/с. Для поляризації та пов'язаних з нею вимірювань

					MP. ATm – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

було використано потенціостат/гальваностат CS300M (Wuhan Corrtest Instruments Co., Ltd., розташований у м. Ухань, Китай).

### 3.2 Результати дослідження та їх обговорення

Покриття, отримані методом електродугової металізації, характеризуються процесом формування, що полягає у швидкому осадженні крапель розплавленого металу на підкладці. Ці краплі, вдаряючись об поверхню, сплющуються та тверднуть, утворюючи послідовні шари, що можна побачити на мікрофотографіях, отриманих за допомогою скануючого електронного мікроскопа (Рисунок 2). Незалежно від обраного режиму, покриття демонструють шарувату структуру, що сприяє покращенню зносостійкості та корозійної стійкості завдяки рівномірному розподілу мікроструктурних елементів. Шарувата структура покращує бар'єрні властивості захисного шару, створюючи звивистий шлях для агресивних середовищ. Така конфігурація значно зменшує проникність шкідливих речовин, таких як волога, кисень та хімічні сполуки, проштовхуючи їх через кілька інтерфейсів. Кожен шар діє як частковий бар'єр, уповільнюючи процес дифузії та ефективно обмежуючи глибину проникнення. В результаті захисний шар демонструє підвищену міцність, оскільки він краще протистоїть тривалому впливу агресивних середовищ.

Однак, поряд із позитивними характеристиками, покриття містять дефекти, включаючи пори та включення оксидів. Як зазначали Лі та ін. [49], пори утворюються внаслідок захоплення повітря розплавленими частинками під час їхнього затвердіння. Пористість суттєво впливає на корозійну стійкість, оскільки пори можуть служити каналами для проникнення агресивних середовищ у підкладку, що призводить до пошкодження як покриття, так і підкладки. Згідно із зображеннями SEM (Рисунок 2), пористість покриття змінюється залежно від напруги.

При низькій напрузі (30 В) покриття (зразок V1) демонструє пористість на рівні 3,58% та менш однорідний розподіл шарів порівняно з покриттями, отриманими при вищих напругах. Зображення SEM показують структуру шарів зі

					MP. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

змінною товщиною та щільністю. Це явище, ймовірно, пов'язане з низькою кінетичною енергією мікрокрапель, що призводить до зменшення сили зчеплення між ними та утворення пор. У літературі [47] спостерігається, що при низьких значеннях напруги мікрокрапельки осідають менш інтенсивно та з меншою енергією, що збільшує ймовірність утворення пор та зменшує однорідність. Це також обмежує адгезію між шарами, що призводить до збільшення пористості та послаблення когезії шарів [50].

У другому режимі, при 40 В (зразок V2), спостерігається зменшення пористості покриття до 2,72% та більш однорідна структура порівняно зі зразком V1. Зображення SEM демонструють, що в цьому режимі осадження мікрокрапель металу відбувається більш рівномірно, що забезпечує щільне прилягання шарів один до одного. У статті [45] зазначається, що збільшення напруги покращує щільність та однорідність структури покриття за рахунок зменшення пористості, оскільки мікрокраплі осідають з вищою енергією, заповнюючи мікропорожнини та створюючи щільніше покриття. Це також позитивно впливає на корозійну стійкість покриття, оскільки менша кількість пор обмежує проникнення агресивних середовищ всередину матеріалу.

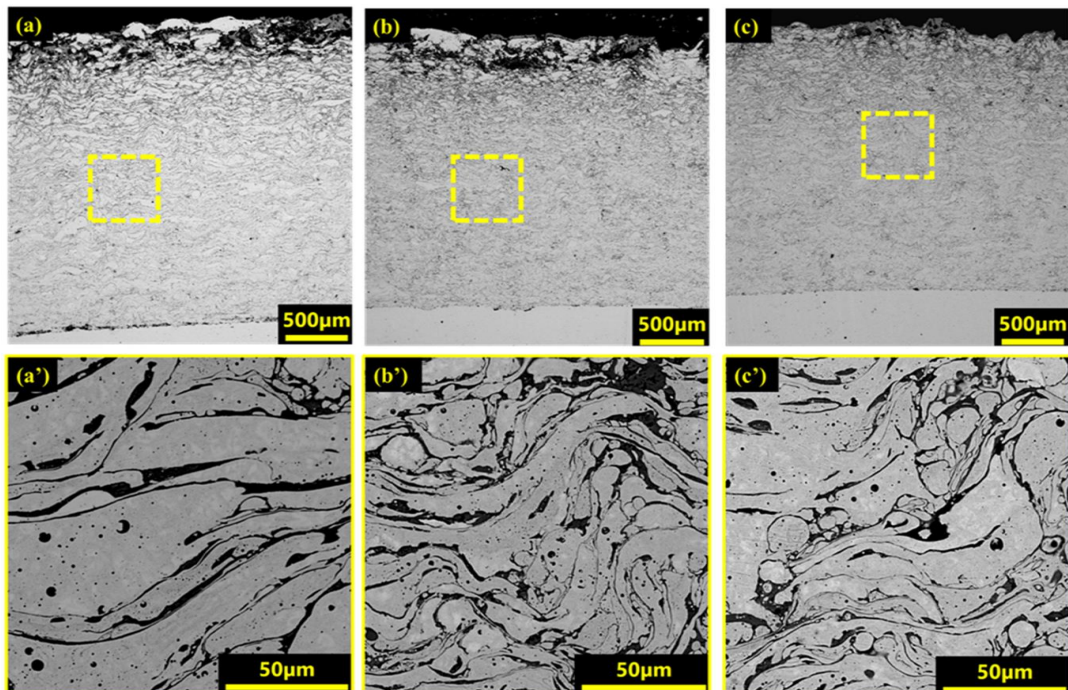


Рисунок 3.4 – Мікроструктура покриттів, отриманих за допомогою скануючого електронного мікроскопа: (a,a') V1; (b,b') V2; (c,c') V3.

У третьому режимі, при максимальній напрузі 45 В, зразок V3 показав найнижчу пористість серед усіх досліджених зразків, 1,36%, з найбільш однорідним розподілом шарів. Висока напруга в цьому режимі максимально збільшує кінетичну енергію мікрокрапель, що дозволяє їм міцно з'єднуватися з поверхнею підкладки та одна з одною, утворюючи щільне покриття. Згідно з літературними даними [45], це щільне покриття ефективно запобігає корозійним процесам та покращує зносостійкість. Зображення SEM показують, що шари утворюють майже суцільне покриття без виражених міжшарових меж, що також підтверджує високий ступінь адгезії між шарами.

Оксидні включення є поширеним дефектом, що утворюється під час металізації електродугою. Вони можуть утворюватися в повітрі під час польоту частинок, під час контакту з підкладкою або під час охолодження. Під час експериментів було виявлено, що включення оксидів у покриттях переважно зосереджені в областях з високою пористістю та на міжшарових межах, що вказує на залежність ступеня окислення від кінетичних параметрів процесу напилення. Літературні джерела [51] вказують на те, що надлишок оксидів може знижувати якість покриття, але їх невеликий вміст може позитивно впливати на зносостійкість. Наприклад, дослідження [52,53] показало, що присутність оксидів у структурі FeAl/Cr3C2 покращує стійкість до стирання та збільшує міцність зчеплення шарів.

За результатами рентгенофазового аналізу, на досліджуваних зразках були виявлені фази та оксиди, представлені на рисунку 2.7. Найбільша кількість оксидів (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) була виявлена у зразку V1 при низькому рівні напруги. Частка оксидів була значно вищою у зразках V2 та V1 порівняно зі зразком V3, де напруга була найвищою. Найнижча інтенсивність оксидів спостерігалася у зразку V3, що пояснюється мінімальним розвитком окислювальних процесів зі збільшенням напруги.

					MP. ATm – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

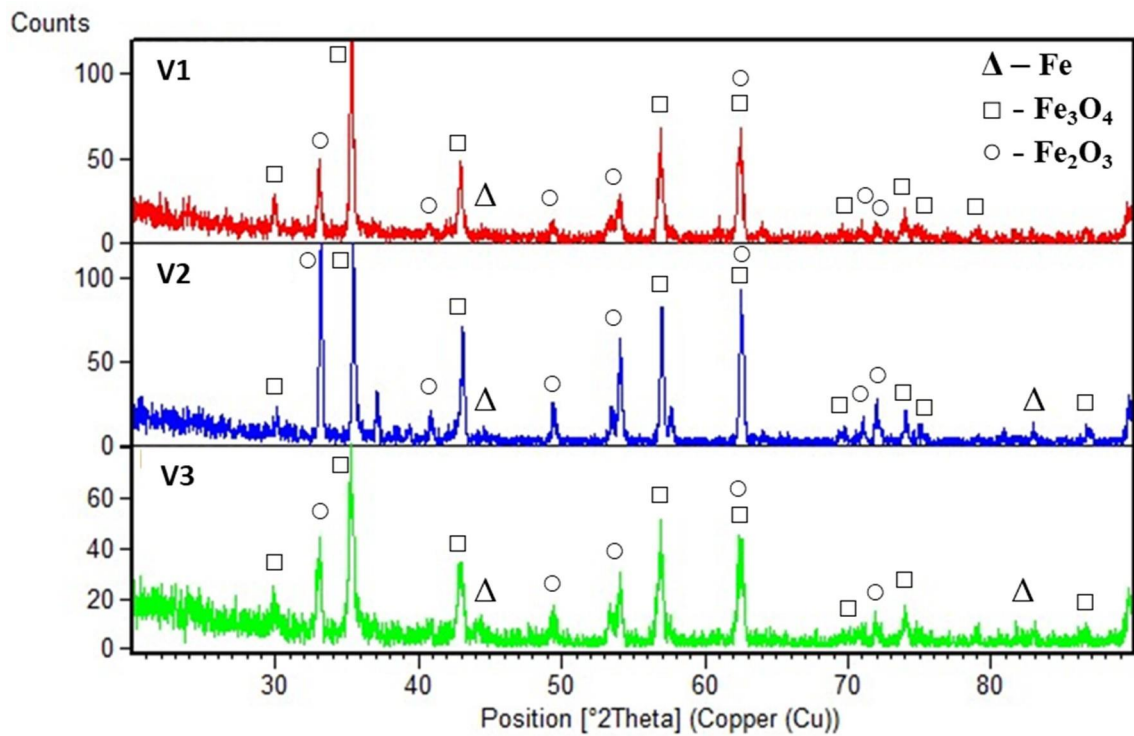


Рисунок 3.5 – Результати рентгенофазового аналізу.

Наявність фаз, показаних на рисунку 3.5, підтверджує протікання окислювальних процесів на поверхні покриттів. Це пояснюється тим, що процес дугового напилення здійснюється в атмосферному середовищі, що неминуче призводить до часткового окислення всіх покриттів. Інтенсивність окислення змінюється залежно від рівня прикладеної напруги: збільшення напруги сприяє зменшенню вмісту оксиду, що може бути пов'язано зі змінами кінетики формування шарів під час напилення.

На рисунку 2.9 показано значення мікротвердості (HV0.1/10) для кожного зразка. Графік показує, що мікротвердість покриття зростає зі збільшенням напруги, при якій воно було отримано. Зразок V1, нанесений при низькій напрузі 30 В, демонструє мінімальну мікротвердість 258 HV. Це значення вказує на відносно менш щільну структуру покриття, що пояснюється недостатньою кінетичною енергією нанесених мікрокрапель, що призводить до утворення пор та меншої адгезії між шарами. При збільшенні напруги до 45 В (зразок V3) мікротвердість покриття збільшується до 305 HV, що пояснюється покращеною щільністю структури завдяки збільшеній енергії осадження, що забезпечує щільніше прилягання мікрокрапель одна до одної.

На рисунку 5 показано залежність коефіцієнта тертя від пройденої відстані для трьох досліджуваних зразків покриття (V1, V2 та V3), отриманих при різних напругах (30 В, 40 В та 45 В відповідно). На рисунку 5 показано, що зміна коефіцієнта тертя для кожного зразка проходить дві окремі стадії: початкову стадію з різким збільшенням коефіцієнта тертя та наступну стадію стабілізації, де коефіцієнт тертя залишається майже постійним. На перших 20 м пройденої відстані всі три зразки демонструють різке збільшення коефіцієнта тертя, що свідчить про активні процеси адаптації поверхні покриття до умов тертя. Для зразка V1 (напруга 30 В) коефіцієнт тертя збільшується від початкового значення близько 0,1 до стабілізованого рівня близько 0,4. Подібна поведінка спостерігається для зразка V2 (напруга 40 В), де коефіцієнт тертя зростає до 0,4. Зразок V3, сформований при максимальній напрузі 45 В, показує найвищий кінцевий коефіцієнт тертя близько 0,5 після етапу адаптації.

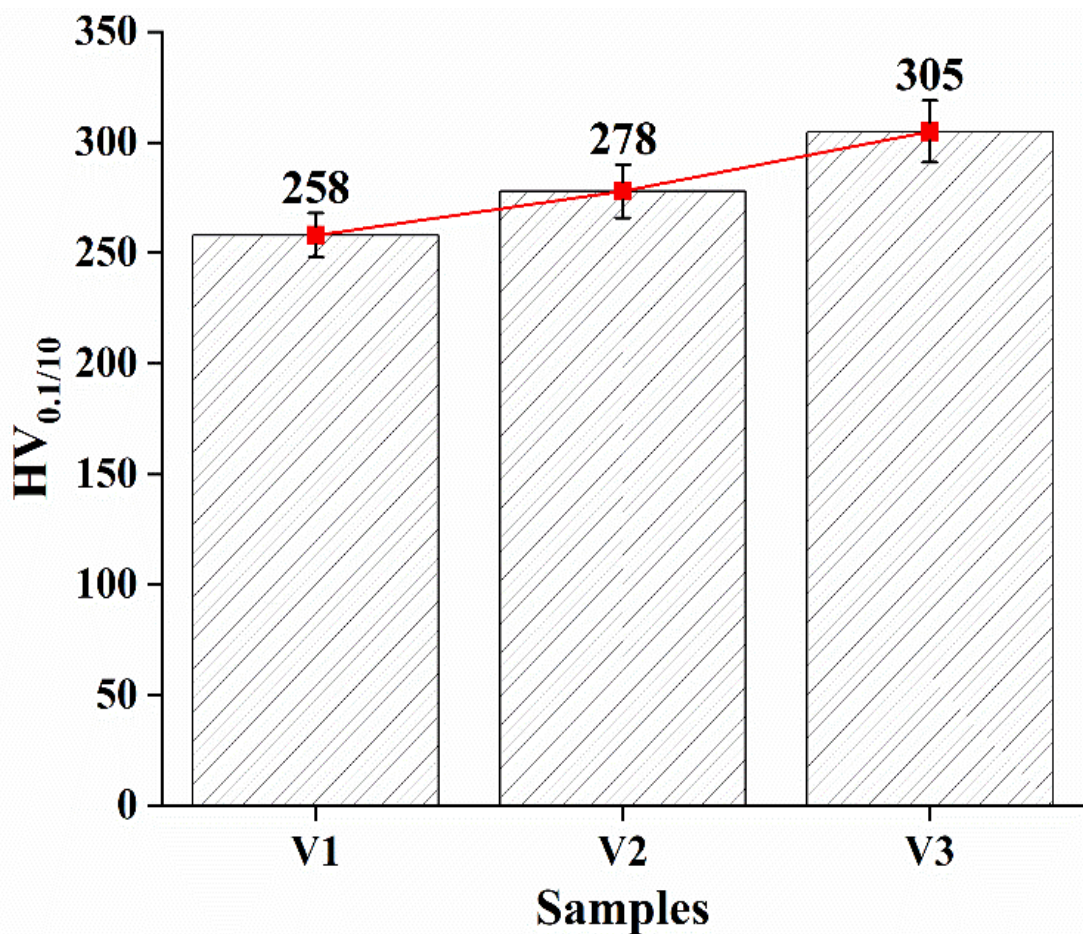


Рисунок 3.6 – Мікротвердість покриття.

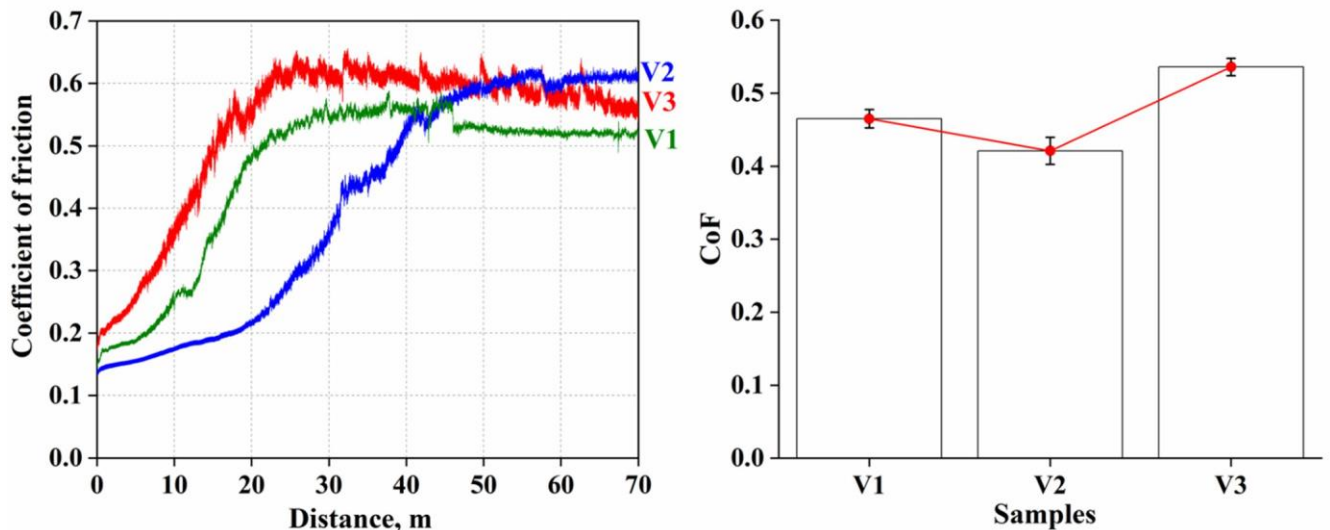


Рисунок 3.7 – Результати трибологічних випробувань покриттів: коефіцієнт тертя.

На цьому етапі тертя поверхні покриття ще не повністю адаптовані до механічної дії та мають мікронерівності та дефекти, що утворилися в процесі напилення. Під час початкового контакту між поверхнями тіла зносу та покриттям ці нерівності мікроскопічно порушуються, що викликає тертя та призводить до швидкого збільшення коефіцієнта тертя. Ці мікроскопічні нерівності поступово руйнуються та ущільнюються, створюючи щільніший та плоскіший контактний шар на поверхні покриття. Крім того, під час процесу тертя частинки матеріалу можуть рухатися та навіть утворювати локалізовані адгезійні зв'язки між контактуючими поверхнями, що також збільшує опір тертю. Утворення такого стабільного шару на поверхні покриття пояснює, чому коефіцієнт тертя стабілізується після початкового різкого збільшення. Важливо зазначити, що зразок V3 з щільнішою та твердішою структурою покриття має вищий коефіцієнт тертя, оскільки щільні шари краще протистоять зносу, але також створюють більший опір контакту.

Після різкого збільшення коефіцієнт тертя для всіх зразків досягає своїх стабілізованих значень і залишається майже незмінним протягом решти експерименту. На цьому етапі коефіцієнт тертя для зразка V1 стабілізується на рівні приблизно 0,46, для V2 – приблизно 0,42, а для V3 – приблизно 0,53. Цей перехід до стаціонарного стану вказує на те, що контактуючі поверхні покриття та тіла

зношування досягли стану рівноваги, в якому механічне Властивості покриття та сила тертя залишаються стабільними. Стадія стабілізації зумовлена завершенням процесів адаптації та ущільнення поверхні покриття. Після початкового періоду руйнування та вирівнювання нерівностей на поверхні утворюється стабільний контактний шар. Цей шар відіграє роль бар'єру, що запобігає подальшому значному зносу покриття та забезпечує постійний опір тертю. Утворений контактний шар має високу щільність та когезію між частинками, що робить його стійким до подальшого руйнування під дією тіла зношування. В результаті покриття зберігає свої трибологічні властивості протягом усього решти випробування. Зразок V3, отриманий при найвищій напрузі (45 В), має найвищий стабільний коефіцієнт тертя (0,536), що свідчить про його вищу щільність та зносостійкість. Вища щільність покриття збільшує силу опору тертю, оскільки поверхня твердіша та менш схильна до деформації, що призводить до більшого опору при взаємодії з тілом зношування. Результати випробувань на корозію наведено в таблиці 4. Аналіз даних показує, що зі збільшенням напруги спостерігається зниження потенціалу корозії ( $E_{corr}$ ) та одночасне збільшення густини струму ( $I_{corr}$ ). Особливу увагу слід звернути на зразок V3, який, згідно з таблицею 4, має найнижчу швидкість корозії серед досліджуваних зразків. Це можна пояснити наявністю щільної та однорідної структури покриття зразка V3, що призводить до зменшення проникнення вологи та агресивних хімічних середовищ. Як наслідок, ця обставина суттєво сприяє його корозійній стійкості, тоді як зразок V1, через низьку щільність структури та наявність дефектів, має нижчу корозійну стійкість. Такі пори та тріщини можуть стати точками проникнення вологи та агресивних агентів, погіршуючи корозійні властивості покриття.

					MP. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Таблиця 3.3 – Порівняльна характеристика покриттів, отриманих за різних напружених умов (V1, V2, V3).

Зразки	Твердість, HV	Пористість, %	Коефіцієнт тертя	Корозійний струм I <sub>corr</sub> (A/cm <sup>2</sup> )	Вільна корозія Потенціал E <sub>corr</sub> (V)	Швидкість корозії, мм/рік
V1	258 ± 12.9	3.58 ± 0.25	0.46 ± 0.06	1.0 × 10 <sup>-4</sup>	-0.55	0.4087 ± 0.023
V2	278 ± 13.9	2.72 ± 0.27	0.42 ± 0.05	1.0 × 10 <sup>-6</sup>	-0.60	0.25178 ± 0.021
V3	305 ± 9.15	1.36 ± 0.06	0.53 ± 0.02	1.0 × 10 <sup>-7</sup>	-0.45	0.12859 ± 0.022

### Висновки до розділу 3

Зі збільшенням напруги від 30 В до 45 В спостерігається наступна тенденція:

1. Покриття, отримані при 45 В, мають найнижчу пористість (1,36%) та найбільш однорідну структуру, що зумовлено збільшенням кінетичної енергії розплавлених частинок. При 30 В пористість становила 3,58%, що пояснюється недостатньою енергією частинок для щільного осадження на підкладці.

2. Мікротвердість покриття зростає зі збільшенням напруги. Зразок V3 (45 В) демонструє максимальну мікротвердість 305 HV, що зумовлено покращеною щільністю структури покриття. При 30 В (зразок V1) мікротвердість становила 258 HV, що відповідає менш щільній структурі покриття.

3. Зразок V3 (45 В) показав найнижчу швидкість корозії (0,12859 мм/рік) та найсприятливіший потенціал корозії (-0,45 В). Це пов'язано з мінімальною пористістю та щільною структурою покриття. Зразки V1 та V2 показали вищі значення швидкості корозії (0,4087 мм/рік та 0,25178 мм/рік відповідно) через наявність дефектів та оксидних включень.

4. Коефіцієнт тертя стабілізується на вищому рівні для зразка V3 (0,53) порівняно зі зразками V1 та V2 (0,46 та 0,42 відповідно). Це пов'язано з вищою щільністю покриття та кращою зносостійкістю, хоча вища щільність також призводить до вищої сили контактного тертя.

					MP. ATm – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Оптимальна напруга для металізації електродуговим напиленням, яка забезпечує мінімальну пористість, високу мікротвердість, низьку швидкість корозії та стабільні трибологічні характеристики, становить 45 В. Цей режим підходить для застосувань, що вимагають високої зносостійкості та корозійної стійкості. Слід зазначити, що застосування дугового напилення в поєднанні з іншими методами, такими як гідрофобізація та/або лазерне текстурування, значно розширить потенціал обробки матеріалів дуговим напиленням.

					MP. ATm – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

## **РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ПРАЦІ ПРИ НАНЕСЕННІ ПОКРИТТІВ ЕЛЕКТРОДУГОВИМ СПОСОБОМ**

### **4.1 Значення охорони праці в забезпеченні безпечних та здорових умов праці**

Охорона праці – це система законодавчих актів, соціально-економічних, організаційно-технічних, гігієнічних, лікувально-профілактичних заходів і засобів, що забезпечують безпеку і працездатність людини в процесі її праці [47].

В машинобудуванні та інших галузях промисловості широко застосовується наплавлення та напилення. Охорона праці у зварювальному виробництві являється одною з найактуальних комплексних проблем.

У нашій країні вже понад шість десятиліть науково–дослідницькі інститути охорони і гігієни праці у тісній співпраці з технологічними організаціями і заводами розробляють ефективні методи і засоби оздоровлення умов праці.

Результатом багатогранних наукових досліджень стала розробка не тільки конкретних конструкцій захисних пристроїв і взірців спецодягу, але і нормативних документів, які містять вимоги до проектування, виготовлення, монтажу і експлуатації зварювального обладнання, виробничих приміщень, вентиляційних установок, захисних пристроїв, спецодягу і ін. Введення в дію цих розробок сприяє подальшому оздоровленню умов праці і підвищенню її безпеки, а отже – до підвищення продуктивності і культури виробництва а також покращення здоров'я працівників.

### **4.2 Аналіз потенційних небезпек та шкідливих факторів виробничого середовища**

Виконання зварювальних і наплавлювальних робіт при неправильній організації виробництва і праці призводить до появи небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які при несприятливому збігу обставин можуть викликати нещасні випадки, отруєння і професійні захворювання.

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Під час роботи в лабораторії зварювання є небезпека дії наступних шкідливих факторів на організм людини:

- електричний струм;
- електромагнітні коливання;
- механічна дія.

Робота обладнання може супроводжуватися шумом і вібраціями, шкідливими для здоров'я. В ряді виробництв на працюючого можуть діяти інтенсивні ультразвуки [49]. Неправильна експлуатація електричного обладнання може скласти загрозу ураження електричним струмом. Деякі види обладнання утворюють в лабораторії зварювання потужні високочастотні електромагнітні поля. Негативно впливають на здоров'я працюючих теплові випромінювання нагрівальних пристроїв, крупногабаритних виробів і переохолодження організму в холодний період року.

Потужне ультрофіолетове або світлове випромінювання зварювальної дуги і плазми при дії на очі працюючого може викликати електроофтальмію, а при тривалій дії інфрачервоного випромінювання може розвинути помутніння кришталика – катаракта.

Небезпеку утворює використання в зварювальному виробництві горючих газів і кисню, а також експлуатація посудин, які працюють під тиском. [48].

Аналіз потенційних небезпек виробничих факторів зварювальної лабораторії наведений в таблиці 4.1.

Проте цими небезпеками не вичерпується шкідливий вплив на організм людини. При зварюванні і наплавленні металів повітряне середовище виробничих приміщень може забруднюватися зварювальними аерозолями, які містять пил, шкідливі гази і пари, наприклад газоподібні фтористі з'єднання, оксид вуглецю, оксиди азоту, озон і іншими шкідливими речовинами, наявність яких залежить від матеріалів, які використовуються при зварювальних процесах [50].

Наявність шкідливих речовин в робочій зоні може призвести до виникнення у зварювальників професійних інтоксикацій і пневмоконіоза.

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Таблиця 4.1- Аналіз потенційних небезпек виробничих факторів.

Джерело небезпек	Характеристика потенційно небезпечних виробничих факторів та їх допустимі значення
Електричний струм – установка УД-209М і ін. електрообладнання.	<p>Ураження частин тіла і організму вцілому.</p> <p>Викликає скорочення та параліч м'язів, серця, легень, опіки.</p> <p>Напруга холостого ходу трансформаторів до 350 А і більше не перевищує 70 В, а у зварювальних генераторів постійного струму – 80 В [51].</p>
Шум – зварювальне і ін. обладнання.	<p>Погіршення слуху, дратівливість, порушення нервової системи.</p> <p>Допустимий рівень шуму для зварювальної лабораторії 80 dBA [50].</p>
Рухомі частини – зварювальне і ін. Обладнання.	Пошкодження і травми частин тіла, органів і організму в цілому.
Вібрація – зварювальне і ін. обладнання.	<p>Погіршення кровопостачання, порушення діяльності внутрішніх органів, в т.ч. серця і центральної нервової системи.</p> <p>Допустимий рівень вібрації 92 dBf [51].</p>
Світлове випромінювання – електрична дуга, розплавлений метал.	Пошкодження органів зору.
Тепловий фактор -електрична дуга, розплавлений метал	Можливість отримання опіків різного ступеню.

Ультразвук – обладнання для дефектоскопії.	Розлади і захворювання нервової системи, органів слуху, зміна кров'яного тиску і властивостей крові.  Допустимий рівень ультразвуку 110 dBA [49].
--	---

Характеристика шкідливих речовин, що можуть використовуватися і виділятися у виробниче приміщення при зварювальних процесах наведена в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2- Характеристика шкідливих речовин, що використовуються у виробничому приміщенні.

Назва шкідливої речовини або матеріалу	Технологічний процес у якому є шкідливі речовини.	ГДК шкідливої речовини.	Дія на організм людини, надання першої допомоги.
Оксид заліза із домішками до 3% Mn	Наплавлення	0,1	Оксиди марганцю діють токсично на організм людини, викликаючи порушення ЦНС, дистонічні явища у м'язах.  Свіже повітря, спокій, тепло
Хромовий ангідрид		0,01	Викликає подразнення слизових оболонок.  Свіже повітря, промивання водою.

Оксид вуглецю		20	При великих концентраціях викликає обморок і навіть смерть.  Штучне дихання, киснева маска, свіже повітря.
---------------	--	----	--

Провівши аналіз шкідливих речовин та матеріалів, що використовуються при наплавленні, що можуть виділятися у робоче середовище в процесі зварювання підтвердилася необхідність застосування відповідних заходів і засобів для захищення працюючих від дії отруйних і шкідливих речовин а також введення додаткових профілактичних заходів.

#### 4.3 Забезпечення нормальних умов праці

Роботи по зварюванню та наплавленню виконують, як правило, в середині виробничих приміщень. Згідно нормативного документу [52] у виробничих приміщеннях забезпечуються нормальні умови праці робітників. Для цього регламентуються значення основних параметрів мікроклімату робочої зони.

Оптимальні параметри метеорологічних умов в робочій зоні виробничого приміщення [53] наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3– Оптимальні значення метеорологічних умов в робочих зонах виробничих приміщень .

Характеристика приміщення	Категорія важкості фізичних робіт	Період року	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Лабораторія зварювання	Робота середньої важкості	Холодний	+15 – +20	40 – 60	Не більше 0,5
		Теплий	До +28	40 – 60	0.3 – 0.7

Для створення на робочих місцях необхідного мікроклімату, а також видалення шкідливих речовин, що виділяються у процесі наплавлення використовується штучна вентиляція [47].

Характеристика штучної вентиляції виробничого приміщення наведена в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Характеристика штучної вентиляції.

Приміщення	Тип вентиляції	Вентиляційне обладнання	Кратність повітреобміну
Лабораторія зварювання	Загальна припливна	Вентилятор Ц70 № 6,3	5
	Місцева витяжна	Відсмоктувач конструкції ІЕЗ ім. Патона. Вентилятор Ц70 № 2,5	15

Важливою санітарною характеристикою є освітленість робочої зони. Проектування, устрій і експлуатація освітлення виконується у відповідності з вимогами санітарних правил, діючих СНиП [52], а також правил будови електроустановок.

Характеристика штучного освітлення робочих місць наведена в таблиці 4.4

Таблиця 4.5– Характеристика штучного освітлення робочих місць.

Приміщення	Розряд зорової роботи	Освітленість, лк				Тип світильників
		Загальне	Комбінов.	Аварійне	Евакуаційне	
Лабораторія зварювання	IV	200	400	≥ 2,5	≥ 0,5	“Універсаль”

Крім вище вказаних методів для захисту працюючих від негативної дії шкідливих виробничих факторів, які мають місце в робочому середовищі, використовують не тільки спеціальні але і індивідуальні засоби захисту [53]. Їх назва, і характеристики подані у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6– Засоби індивідуального захисту працюючих.

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Шкідливий виробничий фактор	Призначення ЗІЗ	Назва ЗІЗ (марка, характеристика)	Професія працюючих
Тепловий і механічний	Захист тіла працівника	Костюм комбінований для зварювання ТУ 17303, щиток зварювальника універсальний ЩЭУ-1 ДСТУ 1361	Зварювальник, підсобник
Електронебезпека	Захист працівника від ураження струмом	Гумові діелектричні рукавиці ТУ 38-10550, чоботи діелектричні гумові ТУ 38-10519	Зварювальник підсобник
Світлове випромінювання	Захист органів зору	Світлофільтри захисні ДСТУ 9411	
Шум	Захист органів слуху	Вкладки, навушники ВЦНИИОТ-2, шоломи	
Шкідливі речовини	Запобігання попадання в організм людини	Універсальний респіратор РУ-60, протигаз ПШ-1 або ПШ-2	

Вказані в таблицях 4.3–4.6 заходи і засоби з охорони праці максимально забезпечують безпечні умови праці робітників, а також направлені на захист життя і здоров'я працюючих.

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

#### 4.4 Забезпечення безпеки технологічних процесів та експлуатації обладнання

Для проведення наукових досліджень по запровадженню процесу електроіскрового легування феромагнітними порошками в магнітному полі використовується орендоване приміщення лабораторії зварювання. Тому проведення монтажних робіт не передбачається. Буде проводитися лише модернізація існуючого в лабораторії обладнання.

Проектування, виготовлення, монтаж та експлуатація зварювальної та наплавлювальної техніки відбувається відповідно до “Єдиних вимог безпеки до конструкцій зварювального обладнання“. Цим документом також керуються і при модернізації обладнання.

В приміщеннях передбачаються достатні по ширині (не менше 1,5 м) проходи, які забезпечують зручність і безпечність при зварювальних роботах і доставці виробів на місце зварювання і назад. Елементи зварювального обладнання, що розміщені на висоті більше 2 м і що потребують оперативного обслуговування, повинні мати освітлені робочі майданчики з настилами із діелектричного матеріалу і сходи з поручнями, які встановлюються на надійному кріпленні і виготовлені із незаймистих матеріалів.

Розміщення вузлів зварювального обладнання та їх конструкція повинні забезпечувати зручний і безпечний доступ до них. Обертіві частини обладнання обгороджують захисними щитами. Конструкції загороджувальних пристроїв повинні бути досить міцними, надійно закріпленими і не заважати при наладці обладнання і в його роботі. На машинах автоматичного зварювання передбачаються захисні щитки із світлофільтрами з боку оператора, а також місцеві відсмоктувачі повітря із зони зварювання.

На машинах по наплавленню навпроти зварювальної головки з боку оператора повинен бути щиток, що відкидається розмірами не менше 200×200 мм із захисним світлофільтром.

Перед підключенням наплавлювальної установки необхідно проводити її зовнішній огляд і переконатися в справності установки. Особливу увагу при цьому

					MP. ATm – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

приділяють стану контактів і заземлюючих провідників, справності ізоляції робочих проводів, наявності і справності захисних заходів [51].

Технічні засоби захисту від виявлених потенційно небезпечних факторів виробничого середовища наведені в таблиці 4.7.

Проведення нище вказаних заходів при невеликих матеріальних витратах значно підвищують культуру виробництва на робочих місцях.

Таблиця 4.7– Технічні засоби захисту від виявлених потенційно небезпечних виробничих факторів.

Небезпечний фактор виробничого середовища	Запроектований або вибраний пристрій	Технічна характеристика пристрою або засобу	Місце встановлення на плані або агрегаті
Електробезпека	Заземлення, ізолюючий інструмент	Опір заземлення $\leq 4 \text{ Ом}$	До зварювального та іншого електрообладнання
Світлове випромінювання	Спеціальний захисний щиток, світлофільтр	ДСТУ 9411	Установка для зварювання
Шкідливі речовини	Спеціальний місцевий відсмоктувач	Об'єм повітря що відсмоктується $80 \text{ м}^3/\text{год}$	Установка для зварювання
Рухомі частини обладнання	Захисні щити, огорожі. Попереджувальні написи.	ДСТУ 12.4059	Обладнання і установки

#### 4.5 Розрахунок захисного заземлення установки УД 209М.УХЛ4

Вихідні дані: потужність установки  $N=8$  кВт. Живиться від випрямляча потужністю 200 кВт, що підключений до мережі  $U=380$ В;  $f=50$ Гц.

Ґрунт – глина. Кліматичний район – I

Розглянемо конструкцію комбінованого виносного заземлення призначеного для електроустановки напругою 380 В із ізолюваною нейтраллю, яка живиться від

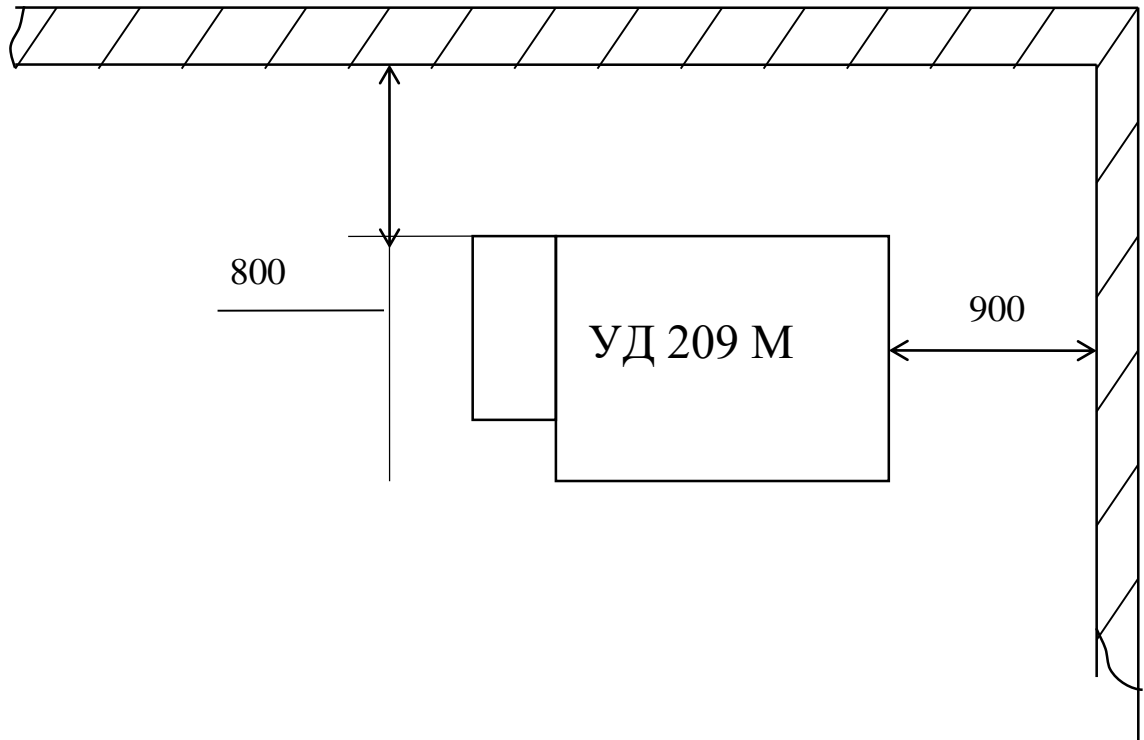


Рисунок 4.1- розміщення установки газоплазменного напильника

випрямляча потужністю 200кВтА. Ґрунт – глина . кліматичний район розміщення об'єкту – I.

Згідно нормативного документу ПУЭ допустимий опір заземлення електроустановок напругою до 1000 В, що живляться від випрямляча повинен бути  $R_{доп}=4$  Ом; [ 3 ].

Приймаємо комбінований заземлюючий пристрій із розміщенням заземлювачів у ряд.

Вибираємо для заземлення вертикальний електрод виготовлений із сталевих труб діаметром 63 мм при товщині стінки 3,5мм. Довжина не менше 2,5м.

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Тоді віддаль між електродами буде рівною:

$$A = 2 \cdot I_{ел} = 2 \cdot 2,5 = 5 \text{ м}$$

Для з'єднання електродів використаємо смугу із сталі шириною 30 мм і товщиною 4 мм з глибиною закладання 0,8 м. [ 7 ].

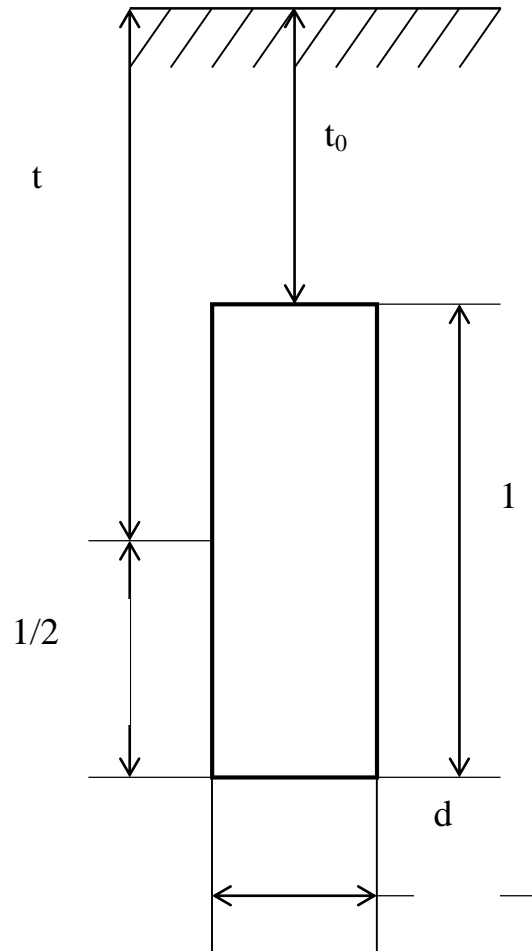


Рисунок 4 .2 - Схема заземлюючого електрода.

визначаємо опір вертикального трубчастого електрода.

$$R_{BE} = \frac{\rho \cdot K}{2\pi \cdot I_{ел}} \left( \ln \frac{2I_{ел}}{d} + 0,5 \ln \frac{4t + I_{ел}}{4t - I_{ел}} \right) \quad (4.1)$$

$$R_{BE} = \frac{40 \cdot 1,9}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \left( \ln \frac{2 \cdot 2,5}{0,063} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot 2,05 + 2,5}{4 \cdot 2,05 - 2,5} \right) = 22,65 \text{ Ом}$$

де  $\rho$  – питомий опір ґрунту; для глини при нормальній володстуві  $\rho = 40 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  [53].

$K$  – кліматичний коефіцієнт опору. Для зони –I  $K = 1,9$ . [53]

$$T_z = l/2 + t_0 = 2,05 \text{ м};$$

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

$d=0.063\text{ м}$  – діаметр труби;

$l_{\text{ел}}=2,5\text{ м}$  – довжина труби.

Визначаємо приблизну кількість необхідних вертикальних електродів.

$$n = \frac{R_{BE}}{R_0} , \quad (4.2)$$

де  $R_0$  – опір групи заземлювачів без врахування полоси зв'язку, що за величиною рівний допустимому опору збільшеному в 1,5-3 рази. Тоді :

$$R_0=(1,5\div 3,0)R_{\text{доп}}=(1,5\div 3,0)4=5,2\div 12 \text{ Ом}$$

Приймаємо  $R_0=6 \text{ Ом}$

$$n = \frac{R_{BE}}{R_0} = \frac{22.65}{6} = 3.775 \approx 4 \text{ електроди.}$$

-визначимо опір розтікання струму для прийнятої кількості вертикальних електродів із врахуванням коефіцієнта використання  $\eta_{\text{вс}}=0,83$  – коефіцієнт використання [ 53].

-Визначаємо довжину смуги зв'язку:

$$l_{\text{п}}=a(n-1)=5(4-1)=15 \text{ м}$$

Визначаємо опір смуги зв'язку розтіканню електричного струму у ґрунт:

$$R_{\text{п}} = \frac{0,366 \cdot \rho \cdot K}{l_{\text{п}}} \cdot \ln \frac{2 \cdot l_{\text{п}}^2}{b \cdot t}; \quad (4.3)$$

$$R_{\text{п}} = \frac{0,366 \cdot 40 \cdot 1.9}{15} \cdot \ln \frac{2 \cdot 15^2}{0.03 \cdot 0.8} = 18.2 \text{ Ом}$$

де  $b=0,03\text{ м}$  – ширина з'єднувальної смуги.

$t=0.8 \text{ м}$  – глибина закладання.

Визначимо опір розтікання заземлюючого пристрою.

$$R_3 = \frac{R_{22} \cdot R_{\text{п}}}{R_{22} + R_{\text{п}}}; \quad (4.4)$$

$$R_3 = \frac{6.82 \cdot 18.2}{6.82 + 18.2} = 4,96 \text{ Ом}$$

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Опір заземлення розтіканню струму в 1,25 разів перевищує допустиму величину (4 Ом), для того, щоб проєктований заземлюючий пристрій задовольняв вимоги ПУЕ збільшимо кількість електродів.

Для розрахунку приймемо кількість електродів  $n=6$ . Для  $n=6$ ,  $\eta=0.77$  [53].

Тоді

$$R_{\text{вГр}}^1 = \frac{R_{\text{вв}}}{n \eta_{\text{вв}}} = \frac{22,65}{6 \cdot 0,77} = 4,9 \text{ Ом}$$

$$L_{\text{п}}^1 = a(n-1) = 5(6-1) = 25 \text{ м}$$

$$R_{\text{п}}^1 = \frac{0.366 \cdot \rho \cdot K}{ln} \ln \frac{2 \cdot ln^2}{\epsilon t} = \frac{0.366 \cdot 40 \cdot 1.9}{25} \ln \frac{2 \cdot 25^2}{0.03 \cdot 0.8} = 12 \text{ Ом}$$

$$R_3^1 = \frac{R_{\text{вв}} \cdot R_{\text{п}}}{R_{\text{вв}} + R_{\text{п}}} = \frac{4,9 \cdot 12}{4,9 + 12} = 3,48$$

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

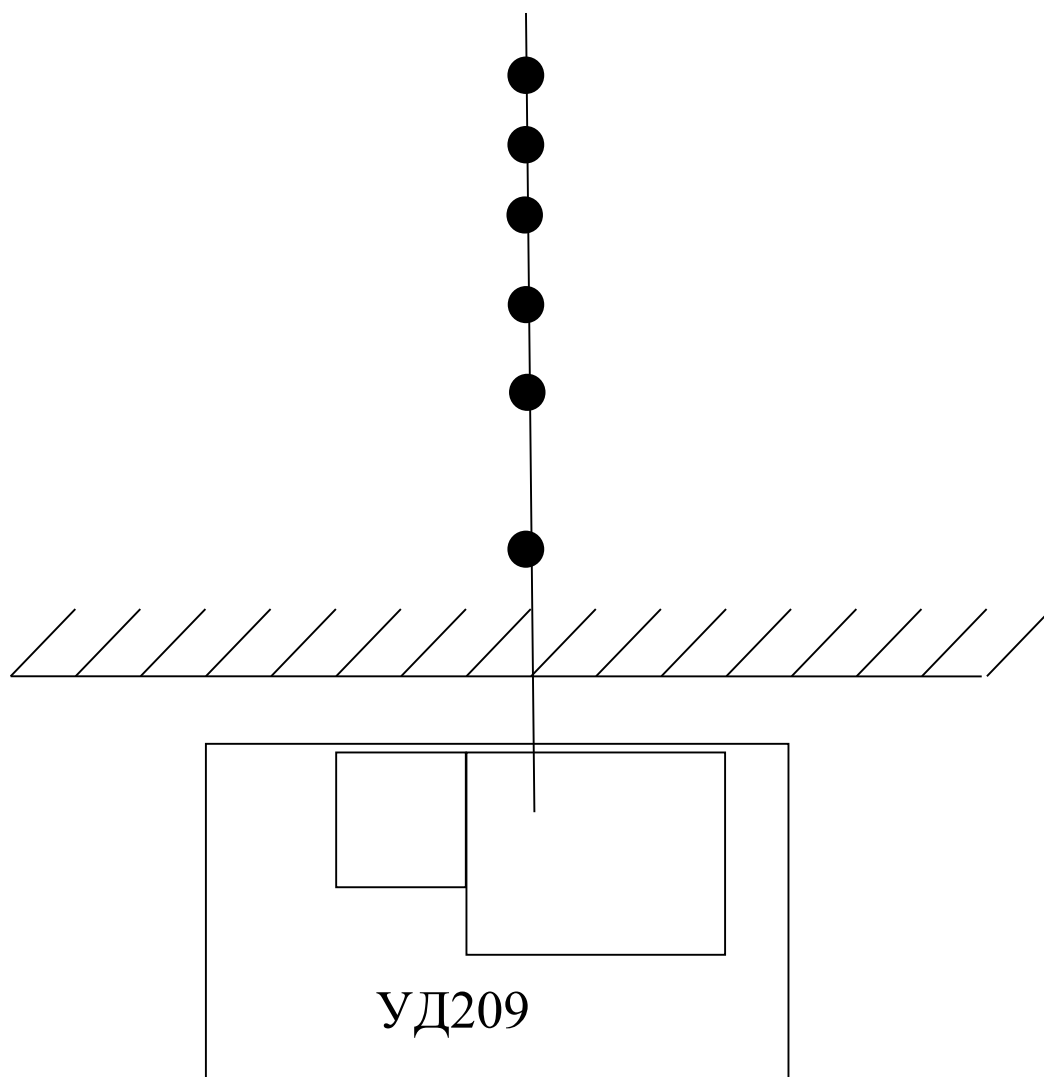


Рисунок 4.3-Схема розміщення виносного заземлення(6 заземлювачів в ряд, розміщених на відстані 5м один від одного).

Висновок: отже проектний заземлюючий пристрій, що складається із шести вертикальних електродів і з'єднувальної смуги і призначений для заземлення установки УД 209 задовільняє вимоги ПУЕ, так як його опір розтіканню струму  $R_z=3,48\text{Ом}$  менший за допустимий  $[R_{\text{доп}}]=4\text{ Ом}$ .

#### Висновки до розділу 4

В розділі описані права та заходи з охорони праці при роботі на установці для нанесення електродугових покриттів. Дотримання даних правил має велике

					МР. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

значення для збереження життя та запобігання травматичним ситуаціям.  
Проведено розрахунок заземлення.

					МП. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

## ВИСНОВКИ

В магістерській роботі: «Аналіз впливу технологічних параметрів на експлуатаційні властивості електродугових покриттів при реставрації автомобільних деталей в умовах підприємства «Модерн-Авто», м. Івано-Франківськ.», Проведено огляд діяльності підприємстві «Модерн-Авто». Наведено характеристики автомобіля Пежо Боксер. В якості швидкозношуваної деталі розглядаємо фрикційний диск.

В розділі 2 проаналізовано існуючі методи та фізичні принципи отримання електродугових покриттів. Вказано на основні їх переваги та недоліки.

В розділі 3 проаналізовано результати дослідів, на основі чого зроблено наступні висновки:

Зі збільшенням напруги від 30 В до 45 В спостерігається наступна тенденція:

1. Покриття, отримані при 45 В, мають найнижчу пористість (1,36%) та найбільш однорідну структуру, що зумовлено збільшенням кінетичної енергії розплавлених частинок. При 30 В пористість становила 3,58%, що пояснюється недостатньою енергією частинок для щільного осадження на підкладці.

2. Мікротвердість покриття зростає зі збільшенням напруги. Зразок V3 (45 В) демонструє максимальну мікротвердість 305 HV, що зумовлено покращеною щільністю структури покриття. При 30 В (зразок V1) мікротвердість становила 258 HV, що відповідає менш щільній структурі покриття.

3. Зразок V3 (45 В) показав найнижчу швидкість корозії (0,12859 мм/рік) та найсприятливіший потенціал корозії (-0,45 В). Це пов'язано з мінімальною пористістю та щільною структурою покриття. Зразки V1 та V2 показали вищі значення швидкості корозії (0,4087 мм/рік та 0,25178 мм/рік відповідно) через наявність дефектів та оксидних включень.

4. Коефіцієнт тертя стабілізується на вищому рівні для зразка V3 (0,53) порівняно зі зразками V1 та V2 (0,46 та 0,42 відповідно). Це пов'язано з вищою щільністю покриття та кращою зносостійкістю, хоча вища щільність також призводить до вищої сили контактного тертя.

					MP. ATm – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Оптимальна напруга для металізації електродуговим напиленням, яка забезпечує мінімальну пористість, високу мікротвердість, низьку швидкість корозії та стабільні трибологічні характеристики, становить 45 В. Цей режим підходить для застосувань, що вимагають високої зносостійкості та корозійної стійкості. Слід зазначити, що застосування дугового напилення в поєднанні з іншими методами, такими як гідрофобізація та/або лазерне текстурування, значно розширить потенціал обробки матеріалів дуговим напиленням.

У розділі 4 описані правил охорони праці. Проведено розрахунок заземлення установки для електродугової металізації. Дотримання даних правил має велике значення для збереження життя та запобігання травматичним ситуаціям.

Результати роботи запропоновані керівництву підприємства для впровадження у виробничий процес.

					MP. АТм – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Rakhadilov, B.; Zhurerova, L.; Sagdoldina, Z.; Kenesbekov, A.; Bayatanova, L. Morphological Changes in the Dislocation Structure of Structural Steel 20GL after Electrolytic-Plasma Hardening of the Surface. *J. Surf. Investig. X-Ray Synchrotron Neutron Tech.* **2021**, 15, 408–413. [[CrossRef](#)]
2. Wielage, B.; Wank, A.; Rupprecht, C. Tailoring of Wire Feedstock and Processing Conditions in High Velocity Combustion Wire Spraying. In Proceedings of the ITSC2006—ASM International, Seattle, WA, USA, 15–18 May 2006; pp. 1009–1014.
3. Gornik, M.; Jonda, E.; Latka, L.; Nowakowska, M.; Godzierz, M. Influence of spray distance on mechanical and tribological properties of HVOF sprayed WC-Co-Cr coatings. *Mater. Sci.-Pol.* **2021**, 39, 545–554. [[CrossRef](#)]
4. Boinovich, L.B.; Domantovsky, A.G.; Emelyanenko, A.M.; Emelyanenko, K.A. Synergism of Arc Spraying, Laser Processing, and Hydrophobization for Long-Lasting Corrosion Protection of MA8 Magnesium Alloy. *Adv. Eng. Mater.* 2024; Early View. [[CrossRef](#)]
5. Qiang, W.; Kang, M.; Liu, J.; Ndumia, J.N. Microstructure and Wear Performance of High-Velocity Arc Sprayed FeMnCrNiBNbAl Coating. *Coatings* **2024**, 14, 428. [[CrossRef](#)]
6. Szymański, K.; Hernas, A.; Moskal, G.; Myalska, H. Thermally Sprayed Coatings Resistant to Erosion and Corrosion for Power Plant Boilers—A Review. *Surf. Coat. Technol.* **2015**, 268, 153–164. [[CrossRef](#)]
7. Wielage, B.; Pokhmurska, H.; Student, M.; Gvozdeckii, V.; Stupnyckyj, T.; Pokhmurskii, V. Iron-Based Coatings Arc-Sprayed with Cored Wires for Applications at Elevated Temperatures. *Surf. Coat. Technol.* **2013**, 220, 27–35. [[CrossRef](#)]

					MP. АТМ – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

8. Romankov, S.E.; Sagdoldina, Z.B.; Kaloshkin, S.D.; Kaevitser, E.V. Fabrication of Ti-Al composite coatings by the mechanical alloying method. *Phys. Met. Metallogr.* **2008**, 106, 67–75. [[CrossRef](#)]
9. Tabieva, E.E.; Zhurerova, L.G.; Baizhan, D. Influence of electrolyte-plasma hardening technological parameters on the structure and properties of banding steel 2. *Key Eng. Mater.* **2020**, 839, 57–62. [[CrossRef](#)]
10. Popova, N.A.; Zhurerova, L.G.; Nikonenko, E.L.; Skakov, M.K. Effect of plasma electrolytic nitrocarburizing on phase composition of 0.3 C-1Mn-1Si-fe steel. *Inorg. Mater. Appl. Res.* **2017**, 8, 130–135. [[CrossRef](#)]
11. Kakimzhanov, D.N.; Rakhadilov, B.K.; Tyurin, Y.N.; Kolisnichenko, O.V.; Zhurerova, L.G.; Dautbekov, M.K. Influence of pulsed plasma treatment on phase composition and hardness of Cr 3 C 2-NiCr coatings. *Eurasian J. Phys. Funct. Mater.* **2021**, 5, 45–51. [[CrossRef](#)]
12. Ramezani, M.; Mohd Ripin, Z.; Pasang, T.; Jiang, C.P. Surface engineering of metals: Techniques, characterizations and applications. *Metals* **2023**, 13, 1299. [[CrossRef](#)]
13. Kengesbekov, A.; Rakhadilov, B.; Sagdoldina, Z.; Buitkenov, D.; Dosymov, Y.; Kylyshkanov, M. Improving the efficiency of air
14. Plasma spraying of titanium nitride powder. *Coatings* **2022**, 12, 1644. [[CrossRef](#)].
15. Bauyrzhan, R.; Alexander, P.; Zhuldyz, S.; Dastan, B.; Vyacheslav, B.; Mukhamedova, A. Effect of Bilayer Thickness and Bias Potential on the Structure and Properties of (TiZr/Nb) N Multilayer Coatings as a Result of Arc-PVD Deposition. *Materials* **2022**, 15, 7696. [[CrossRef](#)]
16. Rakhadilov, B.K.; Baizhan, D.R.; Sagdoldina, Z.B.; Buitkenov, D.B.; Maulet, M. Phase composition and structure of composite Ti/HA coatings synthesized by detonation spraying. *AIP Conf. Proc.* **2020**, 2297, 010001.

					MP. АТМ – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

17. Rakhadilov, B.K.; Kenesbekov, A.B.; Kowalevski, P.; Ocheredko, Y.A.; Sagdoldina, Z.B. Development of air-plasma technology for hardening cutting tools by applying wear-resistant coatings. *News Natl. Acad. Sci. Repub. Kazakhstan* **2020**, 3, 54–62. [[CrossRef](#)]
17. Yu, H.L.; Zhang, W.; Wang, H.M.; Ji, X.C.; Song, Z.Y.; Li, X.Y.; Xu, B.S. In-situ synthesis of TiC/Ti composite coating by high frequency induction cladding. *J. Alloys Compd.* **2017**, 701, 244–255. [[CrossRef](#)]
18. Sidorov, S.A.; Mironov, D.A.; Khoroshenkov, V.K.; Khlusova, E.I. Surfacing methods for increasing the service life of rapidly wearing working tools of agricultural machines. *Weld. Int.* **2016**, 30, 808–812. [[CrossRef](#)]
19. Sun, R.; Shi, Y.; Pei, Z.; Li, Q.; Wang, R. Heat transfer and temperature distribution during high-frequency induction cladding of 45 steel plate. *Appl. Therm. Eng.* **2018**, 139, 1–10. [[CrossRef](#)]
20. Hui, R.; Wang, Z.; Kesler, O.; Rose, L.; Jankovic, J.; Yick, S.; Ghosh, D. Thermal plasma spraying for SOFCs: Applications, potential advantages, and challenges. *J. Power Sources* **2007**, 170, 308–323. [[CrossRef](#)]
21. Chahal, H.K.; Matthews, S.; Jones, M.I. Fabrication of calcium phosphate coatings by the inflight reaction of precursor feedstocks using plasma spraying. *J. Therm. Spray Technol.* **2023**, 32, 1465–1481. [[CrossRef](#)]
22. Qadir, D.; Sharif, R.; Nasir, R.; Awad, A.; Mannan, H.A. A review on coatings through thermal spraying. *Chem. Pap.* **2024**, 78, 71–91. [[CrossRef](#)]
23. Liao, X.J.; Zhang, L.; Sun, Y.Q.; Luo, X.T.; Li, C.X.; Yang, G.J.; Li, C.J. Effect of Inter-Splat Bonding Quality on the Dependence of Wear Behavior of Plasma-Sprayed Stainless Steel Coating on Applied Load. *J. Therm. Spray Technol.* **2024**, 33, 1–11. [[CrossRef](#)]
24. Abdivakhidov, K.; Sharipov, K. Corrosion-resistant protective coatings for metals: A review of metallic and non-metallic coatings. *AIP Conf. Proc.* **2024**, 3045, 060011.

					MP. АТМ – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

25. Liu, M.; Peng, Q.; Huang, Y.; Li, P.; Tan, G.; Luo, X.; Qiao, Q.; Wang, H.; Lang, W. Influencing Factors and Process Optimization of Al/SiC Powder-Cored Wires by Plasma Transferred Wire Arc Spraying. *J. Therm. Spray Technol.* **2024**, *33*, 2167–2183. [[CrossRef](#)]
26. Yao, H.H.; Zhou, Z.; Wang, Y.M.; He, D.Y.; Bobzin, K.; Zhao, L.; Ote, M.; Konigstein, T. Microstructure and Properties of FeCrB Alloy Coatings Prepared by Wire-Arc Spraying. *J. Therm. Spray Tech.* **2017**, *26*, 483–491. [[CrossRef](#)]
27. Arizmendi-Morquecho, A.; Campa-Castilla, A.; Leyva-Porras, C.; Aguilar Martinez, J.A.; Vargas Gutiérrez, G.; Moreno Bello, K.J.; López López, L. Microstructural Characterization and Wear Properties of Fe-Based Amorphous-Crystalline Coating Deposited by Twin Wire Arc Spraying. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2014**, *2014*, 836739. [[CrossRef](#)]
28. Kumar, D.; Murtaza, Q.; Singh, R.C. Sliding Wear Behavior of Aluminum Alloy Coating Prepared by Two-Wire Electric Arc Spray Process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2016**, *85*, 237–252. [[CrossRef](#)]
29. Johnston, A.L.; Hall, A.C.; McCloskey, J.F. Effect of Process Inputs on Coating Properties in the Twin-Wire Arc Zinc Process. *J. Therm. Spray Tech.* **2013**, *22*, 856–863. [[CrossRef](#)]
30. Czupryński, A. Flame spraying of aluminum coatings reinforced with particles of carbonaceous materials as an alternative for laser cladding technologies. *Materials* **2019**, *12*, 3467. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
31. Liang, S.; Neisius, N.M.; Gaan, S. Recent developments in flame retardant polymeric coatings. *Prog. Org. Coat.* **2013**, *76*, 1642–1665. [[CrossRef](#)]
32. Xie, X.; Guo, H.; Gong, S.; Xu, H. Thermal cycling behavior and failure mechanism of LaTi<sub>2</sub>Al<sub>9</sub>O<sub>19</sub>/YSZ thermal barrier coatings exposed to gas flame. *Surf. Coat. Technol.* **2011**, *205*, 4291–4298. [[CrossRef](#)]
33. Nakamura, M.; Akamatsu, F.; Kurose, R.; Katsuki, M. Combustion mechanism of liquid fuel spray in a gaseous flame. *Phys. Fluids*

					MP. АТМ – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

2005, 17, 123301. [[CrossRef](#)]

34. Pokhmursky, V.I.; Student, M.M.; Ryabtsev, I.A.; Sidorak, I.I.; Dzioba, Y.V.; Dovgunyk, V.M.; Formanek, B. Influence of electric arc metallizing modes and compositions of applied flux-cored wires on structure and abrasive wear resistance of coatings. Paton Weld. J. **2006**, 7, 26.

35. Degnan, C.C.; Shipway, P.H. A comparison of the reciprocating sliding wear behaviour of steel-based metal matrix composites processed from self-propagating high-temperature synthesised Fe–TiC and Fe–TiB<sub>2</sub> masteralloys. Wear **2002**, 252, 832–841.

[[CrossRef](#)]

36. Kumar, D.; Pandey, K.N. Optimization of the process parameters in generic thermal barrier coatings using the Taguchi method and grey relational analysis. Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl. **2017**, 231, 600–610. [[CrossRef](#)]

37. Zhao, W.; Lu, Y.; Fu, H.; He, D.; Tan, Z.; Yao, H.; Yang, Y.; Zhou, Z. Developing Rotary Swaging Process for Improving the Performance of Wire-Arc Sprayed Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coating. Surf. Coat. Technol. **2024**, 484, 130840. [[CrossRef](#)]

38. Lopata, A.; Lopata, V.; Kachynska, I.; Zaboykina, N. Influence of Factors of the Electric Arc Spraying Process on the Properties of Coatings. Probl. Tribol. **2024**, 29, 79–86. [[CrossRef](#)]

39. Steffens, H.-D.; Babiak, Z.; Wewel, M. Recent Developments in Arc Spraying. IEEE Trans. Plasma Sci. **1990**, 18, 974–979. [[CrossRef](#)]

40. Abedini, A.; Pourmousa, A.; Chandra, S.; Mostaghimi, J. Effect of Substrate Temperature on the Properties of Coatings and Splats Deposited by Wire Arc Spraying. Surf. Coat. Technol. **2006**, 201, 3350–3358. [[CrossRef](#)]

41. Ndumia, J.N.; Kang, M.; Gbenontin, B.V.; Lin, J.; Nyambura, S.M. A Review on the Wear, Corrosion and High-Temperature

					MP. АТМ – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Resistant Properties of Wire Arc-Sprayed Fe-Based Coatings. *Nanomaterials* **2021**, 11, 2527. [[CrossRef](#)]

42. Planche, M.P.; Liao, H.; Coddet, C. Relationships between In-Flight Particle Characteristics and Coating Microstructure with a TwinWire Arc Spray Process and Different Working Conditions. *Surf. Coat. Technol.* **2004**, 182, 215–226. [[CrossRef](#)]

43. Nguyen, T.V.; Le, T.D.; Le, Q.T.; Pham, H.T.; Nguyen, A.T.; Pham, L.T.; Dao, T.B.; Ly, C.Q. Characterization and Corrosion Resistance of the Twin-Wire Arc Spray Al-5Mg Alloy Coating Applied on a Carbon Steel Substrate. *J. Therm. Spray Technol.* **2024**, 33, 381–397. [[CrossRef](#)]

44. Wagner, N. Effect of Process Parameters on TwinWire Arc Sprayed Steel Coatings. *J. Mater. Eng. Perform.* **2021**, 30, 6650–6655. [[CrossRef](#)]

45. Ndumia, J.N.; Kang, M.; Gbenontin, B.V.; Lin, J.; Liu, J.; Li, H.; Nyambura, S.M. Optimizing Parameters of Arc-Sprayed Fe-Based Coatings Using the Response Surface Methodology. *J. Therm. Spray Technol.* **2023**, 32, 2202–2220. [[CrossRef](#)]

46. Mykhailo, S.; Volodymyr, G.; Oleksandra, S.; Olegas, P.; Pavlo, M.; Olena, O.; Liudmyla, T. The Effect of Increasing the Air Flow Pressure on the Properties of Coatings During the Arc Spraying of CoredWires. *Stroj. C̃ asopis—J. Mech. Eng.* **2019**, 69, 133–146. [[CrossRef](#)]

47. Rakhadilov, B.; Magazov, N.; Kakimzhanov, D.; Apsezhanova, A.; Molbossynov, Y.; Kengesbekov, A. Influence of Spraying Process Parameters on the Characteristics of Steel Coatings Produced by Arc Spraying Method. *Coatings* **2024**, 14, 1145. [[CrossRef](#)]

48. Rakhadilov, B.; Shynarbek, A.; Kakimzhanov, D.; Kusainov, R.; Zhassulan, A.; Ormanbekov, K. Effect of Voltage on Properties

					MP. АТМ – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

of 30HGSA Steel Coatings by Supersonic Supersonic Arc Metallization Method. Adv. Sci. Technol. Res. J. **2024**, 18, 113–124.

[CrossRef] [PubMed]

49. Li, Z.R.; Li, D.Y.; Zhang, N.N.; Huang, H.; Wang, X. Wear mechanism of iron-based alloy coating by arc spraying. J. Iron Steel Res.

Int. **2016**, 23, 834–841. [CrossRef]

50. Yao, H.; Zhou, Z.; Wang, G.; He, D.; Bobzin, K.; Zhao, L.; Ote, M.; Konigstein, T. Influence of Feedstock Materials and Spray

Parameters on Thermal Conductivity of Wire-Arc-sprayed Coatings. J. Mater. Eng. Perform. **2017**, 26, 1108–1113. [CrossRef]

51. Salavati, S.; Coyle, T.; Mostaghimi, J. Twin Wire Arc Spray Process Modification for Production of Porous Metallic Coatings. Surf.

Coat. Technol. **2016**, 286, 16–24. [CrossRef]

52. Xu, W.-P.; Xu, B.-S.; Zhang, W.; Wu, Y.-X. High temperature behaviors of high velocity arc sprayed Fe-Al/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> composite

coatings. Int. J. Miner. Metall. Mater. **2005**, 12, 340–346.

53. Li, R.; Zhou, Z.; He, D.; Wang, Y.; Wu, X.; Song, X. Microstructure and high temperature corrosion behavior of wire-arc sprayed FeCrSiB coating. J. Therm. Spray Technol. **2015**, 24, 857–864. [CrossRef]

					MP. АТМ – 82.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

ДОДАТКИ

**ТЕМА РОБОТИ:** Аналіз впливу технологічних параметрів на експлуатаційні властивості електродугових покриттів при реставрації автомобільних деталей в умовах підприємства «Модерн-Авто», м. Івано-Франківськ.

**ВИКОНАВ:** ст.гр. АТм-24-1 М.І. Мельник

**НАУКОВИЙ КЕРІВНИК:** к.т.н. доц. Прунько І.Б.

**Метою магістерської роботи** є проведення дослідження у напрямку застосування методу електродугової покриттів деталей автомобілів. Отримані результати та дозволять надати рекомендації виконання яких допоможе підвищити зносостійкість швидкозношуваних деталей.

**Об'єкт дослідження** керування процесом формування потоку розпилювального повітря та перенесення частинок рідкого металу з електродів під час дугового напилення. Однією з проблемних зон процесу дугового напилення є окислення частинок розпиленого металу киснем повітряного потоку під час їх транспортування до напилюваної поверхні. Це призводить до утворення достатньо великої кількості оксидів хімічних елементів, які значно погіршують адгезійну міцність та вигорають легуючі елементи, необхідні для отримання зносостійкого та корозійностійкого покриття. Придатність та довговічність покриттів під час використання залежить від міцності адгезії до основи.

**Предмет дослідження** процес нанесення зміцнюючого покриття методом електродугової металізації.

**Методи дослідження** 1. Обґрунтувати необхідність використання спеціального недорогого обладнання для створення пульсуючого потоку повітря під час дугового напилення.

2. Виконати систематичний аналіз даних, отриманих у процесі нанесення покриттів за допомогою імпульсного потоку розпилення.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

**Наукова новизна результатів роботи** полягає в тому, що це детальне дослідження впливу технологічних параметрів електродугової металізації на властивості покриття, що дозволяє запропонувати нові підходи до розробки високоефективних захисних покриттів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практичне значення результатів полягає в можливості їх використання для оптимізації технологій нанесення покриттів, що використовуються в машинобудуванні, енергетиці та інших галузях промисловості, що вимагають високої зносостійкості та міцності матеріалів.



Рисунок 1 – Підприємство «Модерн-Авто» Івано-Франківськ

Основний вид діяльності:

Торгівля автомобілями та легковими автотранспортними засобами

Інші види діяльності

Торгівля іншими автотранспортними засобами, Технічне обслуговування та ремонт автотранспортних засобів, Оптова торгівля деталями та приладдям для автотранспортних засобів, Роздрібна торгівля деталями та приладдям для автотранспортних засобів

Керівники: Труханівський Андрій Михайлович



Рисунок 2 – Фургон Пежо Боксер

# Технічні характеристики Пежо Боксер

PEUGEOT BOXER ФУРГОН  
ХАРАКТЕРИСТИКИ

ТЕХНІЧНІ



PEUGEOT

	435						440	
	L1H1	L2H2	L3H2	L3H3	L4H2	L4H3	L4H2	L4H3
<b>ДВИГУН</b>								
Тип	Турбований Дизельний Двигун							
Кількість циліндрів / клапанів	4 / 16							
Робочий об'єм (см³)	2179							
Максимальна потужність, КВт (к/с) при об/хв	121 (165) 3750							
Максимальний крутний момент ЕЕС (Nm) при об/хв	370 1 750							
<b>НОРМИ ТОКСИЧНОСТІ</b>								
Екологічний клас	EURO 6							
<b>ТРАНСМІСІЯ</b>								
Тип	6-ступінчата механічна							
<b>ПІДВІСКА</b>								
Передня підвіска	Незалежна, покращений «МакФерсон» з типом стійки з пружинами об та інтегральними амортизаторами							
Задня підвіска	Поздовжні ресори з телескопічними амортизаторами							
<b>ГАЛЬМІВНА СИСТЕМА</b>								
Передні гальма	Дискові вентильовані							
Задні гальма	дискові							
<b>КОЛЕСА</b>								
Радіус колісних дисків	R16							
Шини	вантажні шини 215/75 R16C						225/75 R16C	
<b>МІСТКІСТЬ</b>								
Кількість місць	2/3							
Завантажувальний об'єм VDNA (m³)	8	11,5	13	15	15	17	15	17
<b>МАСА (кг)</b>								
Споряджена маса	1935	2000	2050	2075	2095	2125	2140	2170
Вантажопідйомність	1565	1500	1450	1425	1405	1375	1865	1835
Повна маса	3500	3500	3500	3500	3500	3500	4005	4005
Максимальна маса причепа на буксирі	3000	3000	3000	3000	3000	3000	2495	2495
Максимальна допустима маса автомобіля з причепом	6500	6500	6500	6500	6500	6500	6500	6500
Навантаження на передню / задню вісь	2100 / 2400							
<b>ЗОВНІШНІ РОЗМІРИ (мм)</b>								
Ширина без дзеркал	2050							
Довжина	4963	5413	5998	5998	6363	6363	6363	6363
Висота	2254	2522	2522	2760	2522	2760	2522	2760
Колісна база	3000	3450	4035	4035	4035	4035	4035	4035
Передній звіс	948	948	948	948	948	948	948	948
Задній звіс	1015	1015	1015	1015	1380	1380	1380	1380
<b>ВНУТРІШНІ РОЗМІРИ (мм)</b>								
Довжина підлоги вантажної зони	2670	3120	3705	3705	4070	4070	4070	4070
Висота навантаження вантажної зони (максимум)	1662	1932	1932	2172	1932	2172	1932	2172
Ширина: Відстань між колісними арками	1422							
Ширина: Відстань по бортах	1870							
Ширина бічних дверей	1075	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250
Висота бічних дверей	1485	1755	1755	1755	1755	1755	1755	1755
Ширина задніх дверей	1562	1562	1562	1562	1562	1562	1562	1562
Висота задніх дверей	1520	1790	1790	2030	1790	2030	1790	2030
Висота завантаження	509	494	504	506	601	561	601	561
<b>ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ</b>								
Максимальна швидкість, км/год	160	156	156	150	156	150	90	90
Витрата пального <sup>1</sup> (міський цикл), л/100 км:	6,7	6,7	6,9	6,9	6,9	6,9	6,7	6,7
Витрата пального <sup>1</sup> (заміський цикл), л/100 км:	5,9	5,9	6,1	6,1	6,1	6,1	6,2	6,2
Витрата пального <sup>1</sup> (змішаний цикл), л/100 км:	6,2	6,2	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
Вихід CO <sub>2</sub> (г/км)	163	163	168	168	168	168	169	169
Ємність бака для пального, л	90							

<sup>1</sup> Ці дані отримані в результаті випробувань згідно до технічних вимог та специфікації Європейської Директиви 80/128/ЕЕС з поправками СЕЕ 1999/100. Це узагальнені стандартні процедури для порівняння витрат палива різних автомобілів різних виробників. Витрата пального під час реальної експлуатації автомобіля може відрізнятися за рахунок манери водіння, дорожніх, погодних умов, комплектації автомобіля, умов використання, стилю автомобіля та інших умов, які впливають на витрату пального.



Рисунок 3 – Комплект сцепления



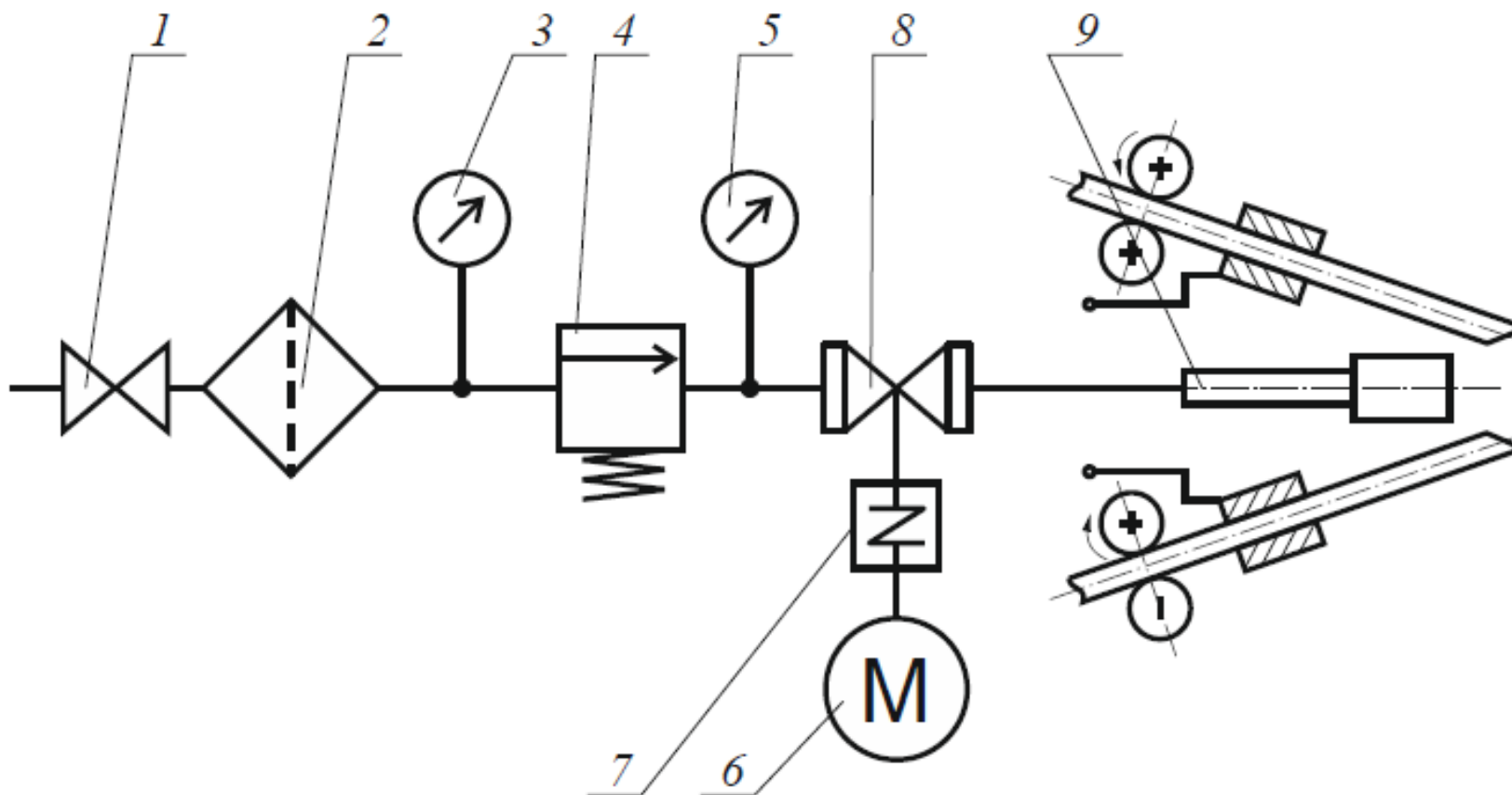


Рисунок 5 – Кінематична схема установки електродугового наплення з пульсуючим розпилювальним потоком: 1 – вхідний клапан з магістралі; 2 – вологовіддільник; 3, 5 – манометр; 4 – редукційний клапан; 6 – двигун; 7 – муфта; 8 – пульсатор; 9 – розпилювальна форсунка металізатора.

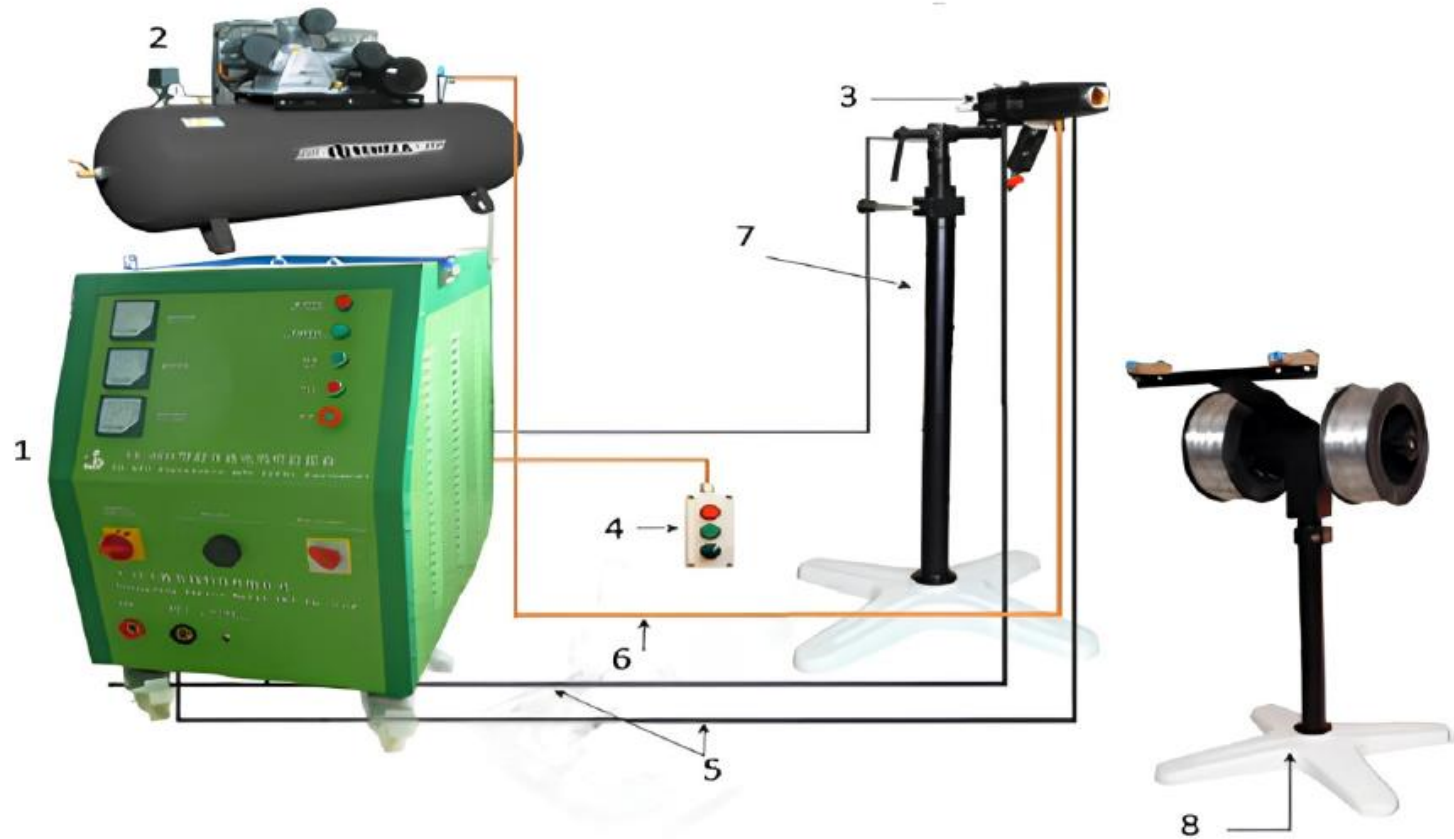


Рисунок 6 – Вигляд комплексу для високошвидкісної електродугової металізації SX-600: 1 — зварювальний випрямляч, 2 — поршневий компресор, 3 — фарбопульта, 4 — пульт дистанційного керування, 5 — кабелі живлення, 6 — повітряний шланг, 7 — маніпулятор, 8 — котушки з дротом (електроди).



Рисунок 7 – Скануючий електронний мікроскоп EVO-40XVP, ZEISS, з системою мікроаналізу INCA

Energy 350, Оксфорд. Загальний вигляд.



Рисунок 7 – Загальний вигляд машини тертя 2168 УМТ: 1 – силовий агрегат; 2 – машина тертя; 3 – панель керування

Хімічний склад сталі 65Mn (65Г) представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сталі 65Г (за масою, %).

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.62–0.7	0.17–0.37	0.9–1.2	0.25	<0.035	<0.035	<0.25	<0.2

Для проведення експериментів з електродами використовували сталевий дріт марки 30ХГСА (аналог AISI 1330) діаметром 1,4 мм, виготовлений відповідно до вимог ДСТУ 10543-98. Хімічний склад сталі 30ХГСА наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Хімічний склад сталі 30ХГСА (за масою, %).

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.28–0.34	0.9–1.2	0.8–1.1	<0.3	<0.025	<0.025	0.8–1.1	<0.3

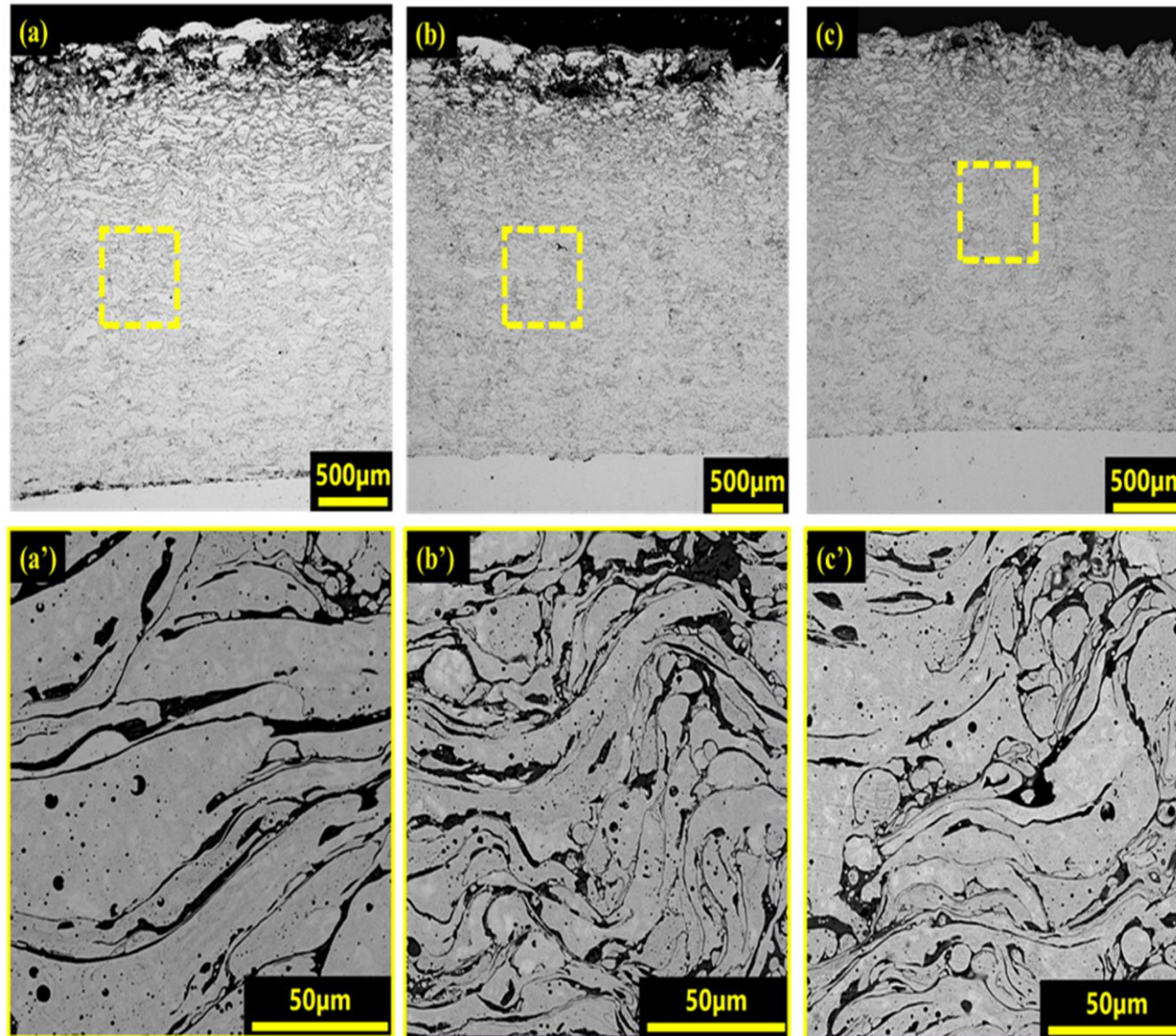


Рисунок 8 – Мікроструктура покриттів, отриманих за допомогою скануючого електронного мікроскопа: (a,a') V1; (b,b') V2; (c,c') V3.

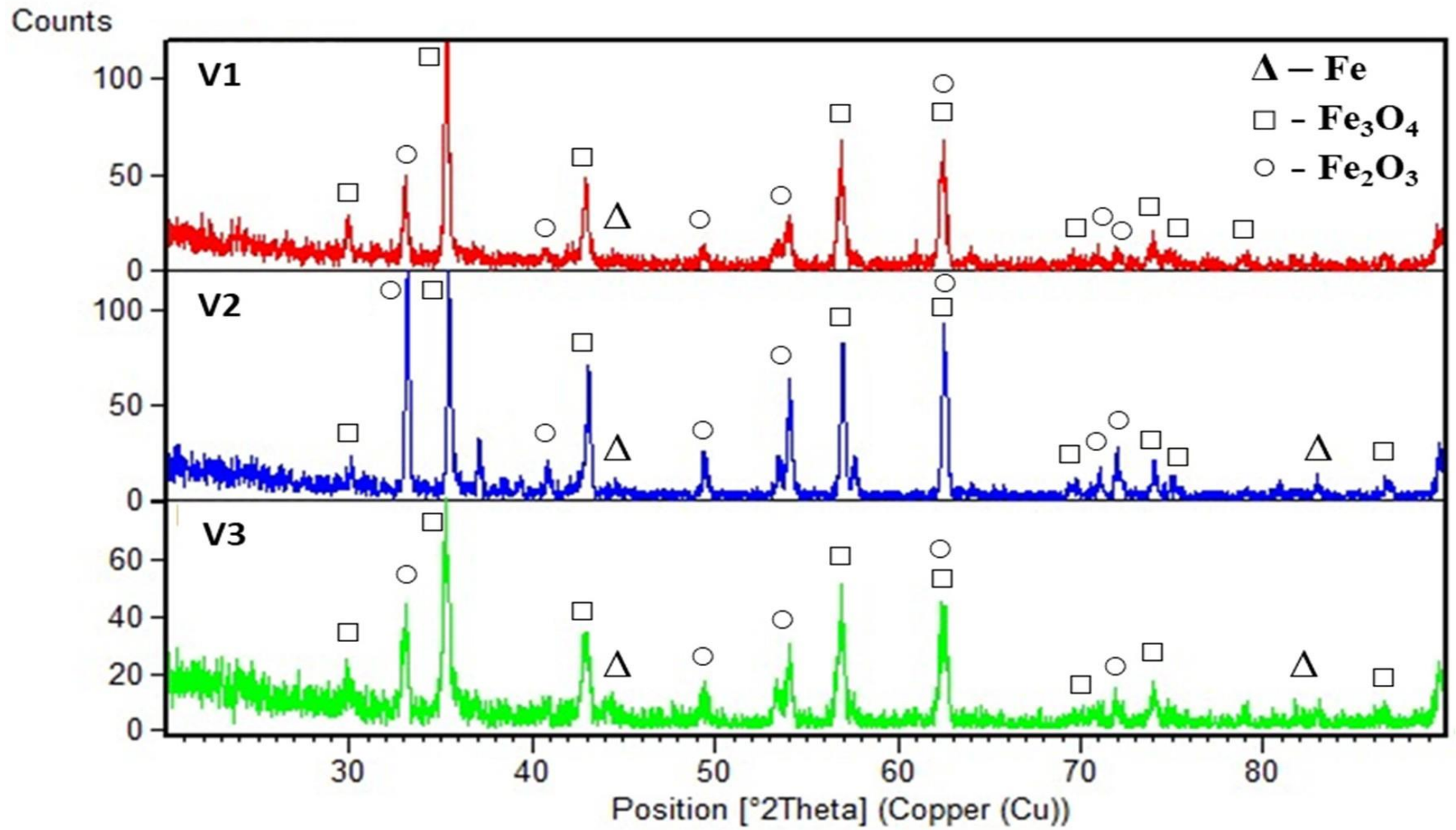


Рисунок 9 – Результати рентгенофазового аналізу.

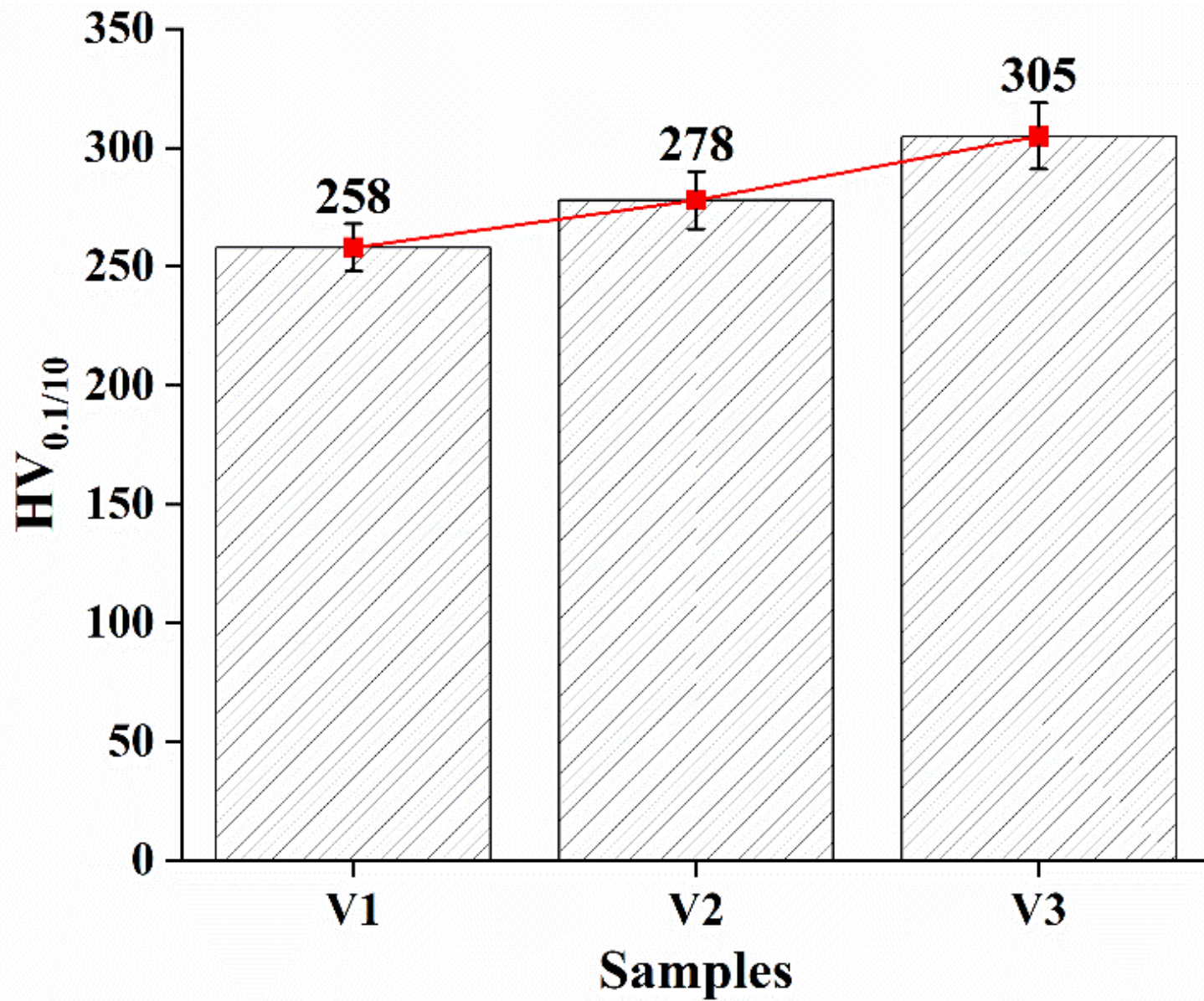


Рисунок 10 – Мікротвердість покриття.

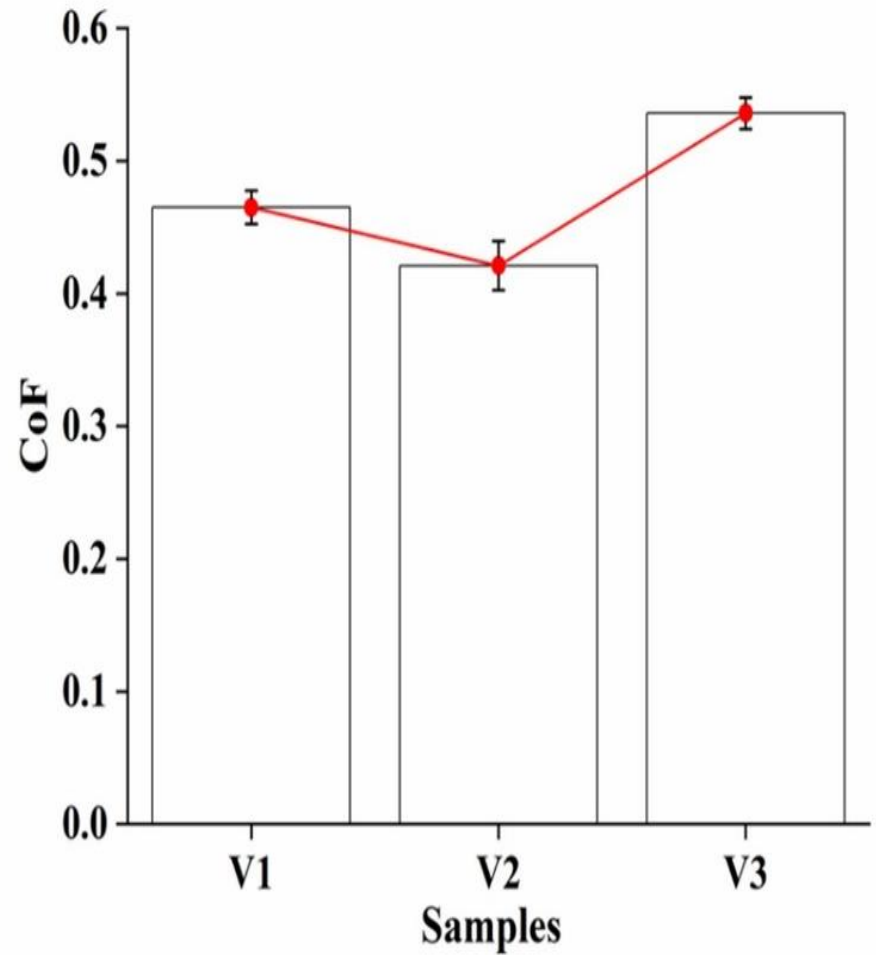
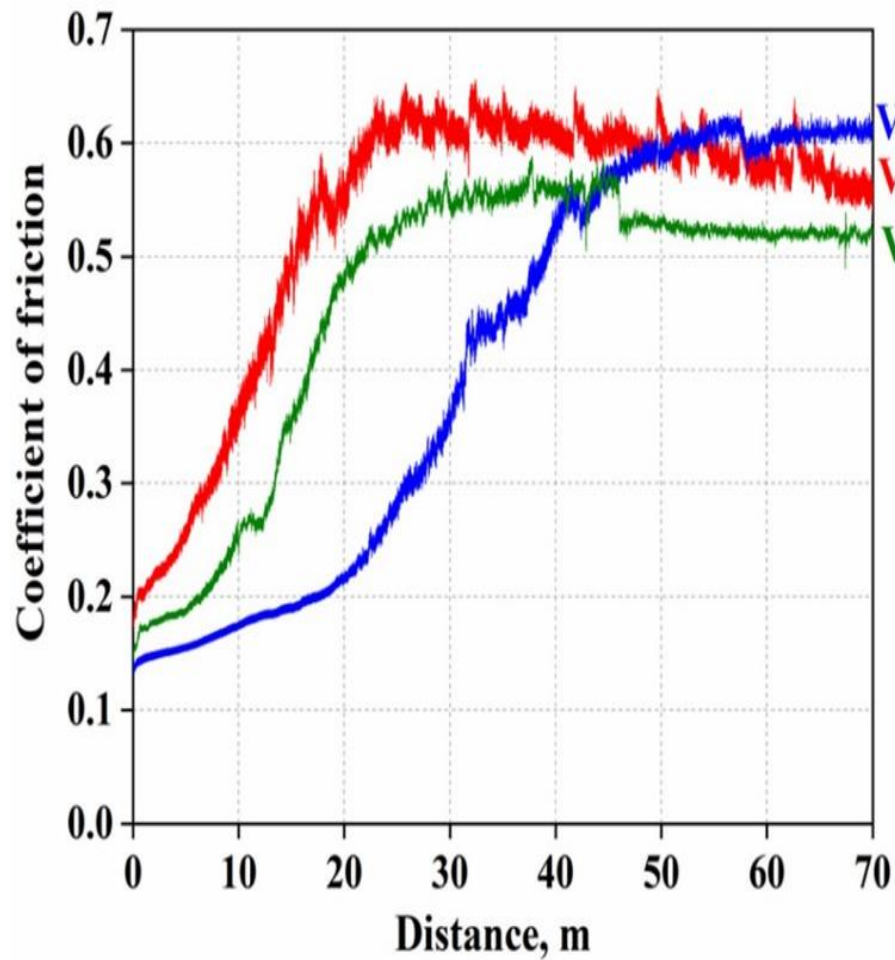


Рисунок 11 – Результати трибологічних випробувань покриттів: коефіцієнт тертя.

Таблиця – Порівняльна характеристика покриттів, отриманих за різних напружених умов (V1, V2, V3).

Зразки	Твердість, HV	Пористість, %	Коефіцієнт тертя	Корозійний струм $I_{\text{corr}}$ (A/cm <sup>2</sup> )	Вільна корозія Потенціал $E_{\text{corr}}$ (V)	Швидкість корозії, мм/рік
V1	258 ± 12.9	3.58 ± 0.25	0.46 ± 0.06	$1.0 \times 10^{-4}$	-0.55	0.4087 ± 0.023
V2	278 ± 13.9	2.72 ± 0.27	0.42 ± 0.05	$1.0 \times 10^{-6}$	-0.60	0.25178 ± 0.021
V3	305 ± 9.15	1.36 ± 0.06	0.53 ± 0.02	$1.0 \times 10^{-7}$	-0.45	0.12859 ± 0.022

Зі збільшенням напруги від 30 В до 45 В спостерігається наступна тенденція:

1. Покриття, отримані при 45 В, мають найнижчу пористість (1,36%) та найбільш однорідну структуру, що зумовлено збільшенням кінетичної енергії розплавлених частинок. При 30 В пористість становила 3,58%, що пояснюється недостатньою енергією частинок для щільного осадження на підкладці.

2. Мікротвердість покриття зростає зі збільшенням напруги. Зразок V3 (45 В) демонструє максимальну мікротвердість 305 HV, що зумовлено покращеною щільністю структури покриття. При 30 В (зразок V1) мікротвердість становила 258 HV, що відповідає менш щільній структурі покриття.

3. Зразок V3 (45 В) показав найнижчу швидкість корозії (0,12859 мм/рік) та найсприятливіший потенціал корозії (-0,45 В). Це пов'язано з мінімальною пористістю та щільною структурою покриття. Зразки V1 та V2 показали вищі значення швидкості корозії (0,4087 мм/рік та 0,25178 мм/рік відповідно) через наявність дефектів та оксидних включень.

4. Коефіцієнт тертя стабілізується на вищому рівні для зразка V3 (0,53) порівняно зі зразками V1 та V2 (0,46 та 0,42 відповідно). Це пов'язано з вищою щільністю покриття та кращою зносостійкістю, хоча вища щільність також призводить до вищої сили контактного тертя.

## ВИСНОВКИ

В магістерській роботі: «Аналіз впливу технологічних параметрів на експлуатаційні властивості електродугових покриттів при реставрації автомобільних деталей в умовах підприємства «Модерн-Авто», м. Івано-Франківськ.», Проведено огляд діяльності підприємстві «Модерн-Авто». Наведено характеристики автомобіля Пежо Боксер. В якості швидкозношуваної деталі розглядаємо фрикційний диск.

В розділі 2 проаналізовано існуючі методи та фізичні принципи отримання електродугових покриттів. Вказано на основні їх переваги та недоліки.

В розділі 3 проаналізовано результати дослідів, на основі чого зроблено наступні висновки:

У розділі 4 описані правил охорони праці. Проведено розрахунок заземлення установки для електродугової металізації. Дотримання даних правил має велике значення для збереження життя та запобігання травматичним ситуаціям.

Результати роботи запропоновані керівництву підприємства для впровадження у виробничий процес.