

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР. АТм-88.00.00.000 ПЗ

Група АТм-24-2

Юрій Семотюк

2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інженерної механіки і робототехніки

Кафедра Автомобільного транспорту

Семотюк Юрій Петрович

УДК 621.793.72

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Тема Підвищення зносостійкості автомобільних деталей методом комбінування способів зміцнення в умовах товариства з обмеженою відповідальністю “Памібро”, смт. Брошнів-Осада, Івано-Франківська обл.
(назва згідно з наказом ректора)

Автомобільний транспорт
(назва освітньої програми)

274 – Автомобільний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

Студент _____ Ю.П. Семотюк
(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 _____ **Семотюку Юрію Петровичу** _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи Підвищення зносостійкості автомобільних деталей методом комбінування способів зміцнення в умовах товариства з обмеженою відповідальністю “Памібро”, смт. Брошнів-Осада, Івано-Франківська обл.

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 «Памбіро», інформація швидкозношуваних деталях автомобілів, які найчастіше підлягають заміні (за данми підприємства бази практики).

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки

1. Аналіз роботи підприємства «ПАМБІРО», смт Брошнівосада 2. Аналіз застосування процесу комбінованого способу зміцнення деталей автомобілів 3. Дослідження експлуатаційних характеристик сталених поверхонь, оброблених електроіскровим легуванням за використанням графітових електродів 4. Безпека праці.

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 «ПАМБІРО», смт Брошнівосода	10.09.2025	
2	РОЗДІЛ 2. Аналіз застосування процесу комбінованого способу зміцнення деталей автомобілів	2.10.2025	
3	РОЗДІЛ 3. Дослідження експлуатаційних характеристик сталевих поверхонь, оброблених електроіскровим легуванням за використанням графітових електродів	29.10.2025	
4	РОЗДІЛ 4. Безпека праці	20.12.2025	
5	Оформлення графічної частини	21.12.2025	

Студент

Юрій СЕМОТЮК
(підпис) (розшифрування підпису)

Керівник роботи

Ігор ПРУНЬКО
(підпис) (розшифрування підпису)

АНОТАЦІЯ

Семотюк Ю.П.

Тема роботи: Підвищення зносостійкості автомобільних деталей методом комбінування способів зміцнення в умовах товариства з обмеженою відповідальністю “Памібро”, смт. Брошнів-Осада, Івано-Франківська обл.

Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт».

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

Івано-Франківськ, 2025 рік.

Робота містить 97 сторінок, 15 таблиць, 32 рисунків, список літератури з 53 найменувань.

У роботі проаналізовано існуючі методи та фізичні принципи отримання комбінованих 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: електроіскрове легування; гібридні технології; поверхнева пластична деформація; лазерна обробка; осадження з парової фази; металополімерний матеріал; покриття; структура; властивості; шорсткість; якість покриття; цілі сталого розвитку

ABSTRACT

Semotyuk Y.P.

Topic of the work: Increasing the wear resistance of automotive parts by combining strengthening methods in the conditions of the limited liability company “Pamibro”, the town of Broshniv-Osada, Ivano-Frankivsk region.

Specialty 274 “Automobile transport”.

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

Ivano-Frankivsk, 2025.

The work contains 97 pages, 15 tables, 32 figures, a list of references with 53 titles.

The work analyzes existing methods and physical principles of obtaining combined 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 spark alloying; hybrid technologies; surface plastic deformation; laser processing; vapor phase deposition; metal-polymer material; coating; structure; properties; roughness; coating quality; sustainable development goals

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РОБОТИ ПІДПРИЄМСТВА «ПАМБІРО», СМТ БРОШНІВОСАДА.....	10
1.1 Структура та сфера надання послуг підприємства «Електроавтотранс», м. Івано-Франківськ.....	10
Висновки до розділу 1	11
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОГО СПОСОБУ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛІВ.....	12
2.1 Огляд застосування гібридних технологій обробки поверхні на основі методу електроіскрового легування.....	12
2.2 Технологія електроіскрового легування	14
2.3 Гібридні технології електроізоляційного різання (EIP)	18
2.4 Удосконалення комбінованих методів обробки електроізоляційним обробленням (ЕІД) та полімерним обробленням під дією імпульсів (ППД)..	22
2.5 Промислове застосування гібридних технологій	47
2.6 Підсумки та перспективи	56
Висновки до розділу 2	59
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ, ОБРОБЛЕНИХ ЕЛЕКТРОІСКРОВИМ ЛЕГУВАННЯМ ЗА ВИКОРИСТАННЯМ ГРАФІТОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ	60
3.1 Матеріали та методи	60
3.2 Об'єкти і методи досліджень	62
Висновки до розділу 3	75
РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ПРАЦІ	76
4.1 Розрахунок вентиляції в шиномонтажній дільниці транспортного відділення ТОВ «Памбіро»	76
ВИСНОВКИ.....	83
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	84
ДОДАТКИ.....	88

МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Підвищення зносостійкості автомобільних деталей методом комбінування способів зміцнення в умовах товариства з обмеженою відповідальністю "Памбіро", смт. Брошнів-Осада, Івано-Франківська обл. Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркушів
		Семотюк Ю.П.						
		Прунько І.Б.						
		Прунько І.Б.						
		Криштопа С.І.						
					ІФНТУНГ гр. АТм-24-2			

ВСТУП

Актуальність теми. Технології функціональних покриттів швидко розвиваються, і електроіскрове легування (ЕІЛ) стає перспективним методом модифікації поверхні завдяки своїй ефективності та локалізованому впливу. У цьому огляді аналізуються фундаментальні принципи ЕІЛ та вплив параметрів процесу на характеристики покриття, а також висвітлюються його переваги та обмеження. Особлива увага приділяється гібридним технологіям на основі ЕІЛ, включаючи комбінації з лазерною обробкою, пластичною деформацією, осадженням з парової фази та полімерметалевими покриттями. Ці гібридні методи значно покращують якість покриття, підвищуючи твердість, адгезію та структурну цілісність, а також зменшуючи шорсткість та дефекти. Однак, багатопараметричний характер цих процесів створює проблеми оптимізації. У цьому огляді виявлено прогалини в знаннях, пов'язані з відтворюваністю процесу, контролем формування мікроструктури та довгостроковою продуктивністю в умовах експлуатації. Обговорюються нещодавні прориви в поєднанні ЕІЛ з високоенергетичною обробкою поверхні. Майбутні дослідження повинні зосередитися на систематичній оптимізації параметрів, діагностиці *in situ* та прогнозному моделюванні, щоб забезпечити розробку спеціалізованих гібридних покриттів.

Метою магістерської роботи є дослідження та систематична оптимізація параметрів, та прогнозному моделюванні, щоб забезпечити розробку спеціалізованих гібридних покриттів.

Об'єкт дослідження є гібридні методи які значно покращують якість покриття, підвищуючи твердість, адгезію та структурну цілісність, а також зменшуючи шорсткість та дефекти.

Предмет дослідження процес нанесення зносостійкого покриття методом комбінованої обробки.

Методи дослідження металографічні та трибологічні дослідження

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наукова новизна результатів роботи проаналізовано можливість отримання багат шарові (комбіновані) покриттів, які можна використовувати для формування поверхневого шару з необхідними властивостями. Такі гібридні технології значно покращують властивості поверхні, забезпечуючи індивідуальні мікроструктури, покращену адгезію, збільшення товщини та зменшення шорсткості.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблено технологію комбінованого використання електроіскрової цементації, яка може бути використана для реставрації швидкозношуваних деталей автомобілів.

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

					MP. ATm – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РОБОТИ ПІДПРИЄМСТВА «ПАМІБРО», СМТ БРОШНІВОСАДА

1.1 Структура та сфера надання послуг підприємства «Електроавтотранс», м. Івано-Франківськ.

Єдиний державний реєстр підприємств та організацій України

Дата поновлення даних 29.04.2024

Повне найменування юридичної особи

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "ПАМІБРО"

Скорочена назва

ТОВ "ПАМІБРО"

Код ЄДРПОУ

24679870

Статус юридичної особи

Зареєстровано

Уповноважені особи

Цимбалістий Роман Зіновійович – керівник

Цимбалістий Роман Зіновійович – представник

Дата реєстрації

23.12.1996

Статутний фонд

2 660 060.00 грн

Основний вид діяльності

17.21 Виробництво гофрованого паперу та картону, паперової та картонної тари

Види діяльності

46.49 Оптова торгівля іншими товарами господарського призначення

47.19 Інші види роздрібної торгівлі в неспеціалізованих магазинах

41.20 Будівництво житлових і нежитлових будівель

Місцезнаходження юридичної особи

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Україна, 77611, Івано-Франківська обл., Рожнятівський р-н, селище міського типу Брошнів-Осада, ВУЛИЦЯ СІЧОВИХ СТРІЛЬЦІВ, будинок 52А/3.

Дане підприємство має власний автопарк. Тут також є авторемонтні майстерні, які обслуговують не тільки автомобілі самого підприємства, але і автомобілів інших власників з смт. Брошнів-Осада.

Висновки до розділу 1

Проведено огляд діяльності підприємстві «Памбіро».

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОГО СПОСОБУ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛІВ

2.1 Огляд застосування гібридних технологій обробки поверхні на основі методу електроіскрового легування

Технології функціональних покриттів швидко розвиваються, і електроіскрове легування (ЕІЛ) стає перспективним методом модифікації поверхні завдяки своїй ефективності та локалізованому впливу. У цьому огляді аналізуються фундаментальні принципи ЕІЛ та вплив параметрів процесу на характеристики покриття, а також висвітлюються його переваги та обмеження. Особлива увага приділяється гібридним технологіям на основі ЕІЛ, включаючи комбінації з лазерною обробкою, пластичною деформацією, осадженням з парової фази та полімерметалевими покриттями. Ці гібридні методи значно покращують якість покриття, підвищуючи твердість, адгезію та структурну цілісність, а також зменшуючи шорсткість та дефекти. Однак, багатопараметричний характер цих процесів створює проблеми оптимізації. У цьому огляді виявлено прогалини в знаннях, пов'язані з відтворюваністю процесу, контролем формування мікроструктури та довгостроковою продуктивністю в умовах експлуатації. Обговорюються нещодавні прориви в поєднанні ЕІЛ з високоенергетичною обробкою поверхні. Майбутні дослідження повинні зосередитися на систематичній оптимізації параметрів, діагностиці *in situ* та прогнозному моделюванні, щоб забезпечити розробку спеціалізованих гібридних покриттів.

Структурна міцність металу визначається його об'ємними та поверхневими механічними характеристиками. Об'ємні характеристики зазвичай задаються металургійним легуванням. Але основні експлуатаційні характеристики деталей машин, такі як надійність, стійкість до механічного зношування та корозії, а також довговічність, визначаються механічними властивостями поверхневого шару конструкційного металу. Існує багато технологій підвищення міцності поверхонь деталей: хіміко-термічна обробка, поверхнева пластична деформація (ППД),

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

зварювання, лазерна обробка (ЛТ), високочастотне гартування (ВЧГ) тощо [1,2]. Відомо [3], що механічна поведінка металу безпосередньо залежить від його структурного та фазового станів. Ця залежність дозволяє вибірково модифікувати функціональні та експлуатаційні характеристики компонентів машин, змінюючи структурний та фазовий стан поверхневого шару.

Методи створення модифікованих шарів на поверхні металів з необхідними функціональними та експлуатаційними властивостями достатньо вивчені, випробувані та широко поширені, використовуються на практиці. Одночасно зазначається, що традиційні технології зміцнення металів та сплавів досягли своєї максимальної ефективності [4,5]. Встановлено, що максимальний ефект модифікації досягається шляхом поєднання різних методів зміни структурно-фазового стану [6–8]. Поєднання різних технологій зміцнення дозволяє створювати композитні шари з різною архітектурою на поверхні металу.

Перспективними методами поверхневого зміцнення та модифікації є методи, засновані на обробці матеріалів концентрованими потоками енергії (КПЕ) [9]. Унікальний вплив цієї дії на формування структури, мікроструктури та поверхневих властивостей, а також на процеси тертя та зношування металів, було доведено в [10,11].

Металеві матеріали можна зміцнювати КПЕ в різних комбінаціях. Це дозволяє інтенсифікувати існуючі технологічні процеси та досягти результатів, які недосяжні за традиційними технологіями.

Сучасні методи обробки поверхні металевих поверхонь, отриманих методом КСЕ, включають електроіскрове легування (ЕІЛ), яке дозволяє створювати поверхневі структури з унікальними фізичними, механічними та функціональними властивостями на нанорівні [12,13]. Цей метод базується на явищі електричної ерозії та переносі матеріалу анода (інструмента) на катод (підкладку) під час протікання імпульсних розрядів у газовому середовищі.

Завдяки великому переліку матеріалів, які можна використовувати в ЕІЛ (будь-які провідні матеріали), та участі міжелектродного середовища в процесі формування поверхневих шарів, цей метод може широко змінювати механічні,

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

теплові, електричні, термоемісійні та інші властивості робочих поверхонь деталей [14]. Незважаючи на простоту технології, ЕІЛ є складним та багатопараметричним процесом.

Для покращення властивостей ЕІЛ-покривів та усунення недоліків технології ЕІЛ використовуються комбіновані (гібридні) технології обробки поверхні. Вони можуть складатися з послідовного ЕІЛ та поверхневої пластичної деформації, ЕІЛ та лазерної обробки, а також інших комбінацій. Хоча існують окремі дослідження щодо комбінованого використання електроіскрового електроізоляційного сплаву (ЕІІ) з лазерним плавленням (ЛО), інтенсивним плавленням наночастинками (SPD) або іншими методами, наразі бракує комплексних оглядів, які б систематизували типи гібридних технологій, їхні параметри та їхній вплив на структуру та властивості покриттів. У цьому огляді вперше зібрано, узагальнено та критично проаналізовано існуючі гібридні підходи до обробки на основі ЕІІ. У ньому також зазначено обмеження кожної комбінації та окреслено сучасні наукові проблеми, зокрема проблеми масштабування, відсутність систем керування процесами та застосування технологій штучного інтелекту для оптимізації.

Метою цієї статті є огляд технології електроіскрового легування (ЕІЛ) та впливу параметрів обробки на структуру та властивості поверхневих шарів.

Додатково, систематизовано сучасні підходи до вдосконалення ЕІІ шляхом застосування гібридних методів обробки, проведено критичний аналіз цих підходів, висвітлено поточні обмеження та прогалини в дослідженнях, а також окреслено перспективні напрямки для подальших досліджень.

2.2 Технологія електроіскрового легування

Електроіскрове легування (ЕІЛ) – це метод інженерії поверхні, заснований на осадженні легуючого матеріалу з анодного електрода на поверхню катода за допомогою імпульсних електричних розрядів у середовищі повітря або захисного газу (Рисунок 1). Цей процес забезпечує локалізовану обробку поверхні з мінімальним термічним впливом та високою адгезією покриття.

					MP. ATm – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Переваги ЕІЛ включають можливість обробки вибраних ділянок без необхідності захисту решти поверхні, відсутність нагрівання всього виробу та сумісність з широким спектром матеріалів [15–17].

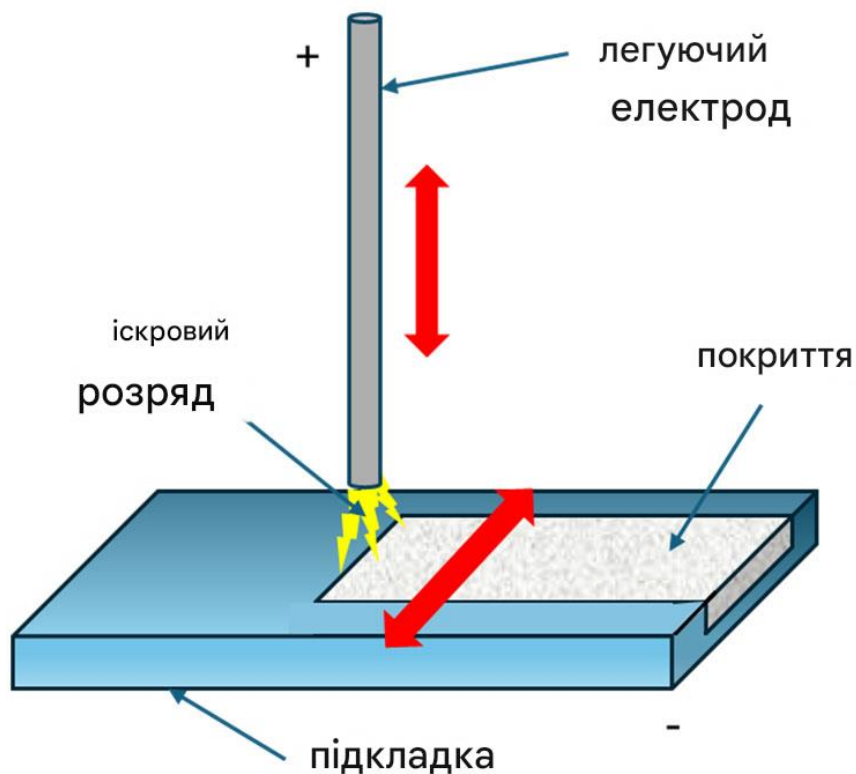


Рисунок 2.1 – Схема традиційної технології електроіскрового легування.

Метод активно використовується для підвищення твердості, зносостійкості та корозійної стійкості [10,18,19], зменшення схильності до прилипання під час тертя [16], відновлення розмірів деталей [20], зміни електричних та емісійних властивостей [21], формування покриттів з контрольованим фазовим складом [22], нанесення радіоактивних ізотопів [23] та отримання поверхонь із заданою шорсткістю [24].

Для створення покриттів із заданими властивостями використовуються електроди різного хімічного складу та технологій виробництва. У літературі наведено широку класифікацію таких матеріалів: графіт, метали, сплави, тверді сплави на основі карбідів вольфраму [25], металокерамічні композиції [26] тощо. Виготовлення багат шарових покриттів за допомогою методу електроіскрового легування, який поєднує тверді зносостійкі та м'які антифрикційні матеріали, значно підвищує надійність та довговічність деталей [27–29].

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Ключові параметри процесу та їх вплив.

Ефективність електромагнітного розряду (ЕРР) залежить від кількох ключових факторів, серед яких енергетичні параметри відіграють вирішальну роль. Збільшення енергії розряду підвищує швидкість процесу ЕРР.

Енергія розряду W_p визначається як [15] наступним чином:

$$W_p = \int_0^{t_p} V(t) \cdot I(t) dt \quad (2.1)$$

де $V(t)$ – функція напруги під час розряду; $I(t)$ – функція струму під час розряду, а t_p – тривалість імпульсу.

Вищі струм і напруга збільшують глибину та швидкість переносу матеріалу, але можуть призвести до перегріву, шорсткості поверхні та структурних дефектів [15]. Ємність, зарядова напруга, індуктивність та опір визначають енергію іскри та характеристики розряду [30,31]. Оптимізація тривалості та частоти імпульсу є важливою, оскільки надмірні значення можуть викликати термічні напруження та мікротріщини, тоді як недостатня енергія може призвести до слабких або неповних покриттів [32].

Швидке охолодження після розряду ($105\text{--}106$ °C/c) сприяє формуванню ультрадрібнозернистих, наноструктурованих або навіть аморфних поверхневих шарів з покращеними трибологічними та хімічними властивостями [33–35]. Однак контроль цих мікроструктур вимагає подальших досліджень.

Незважаючи на численні переваги, традиційний метод електроізоляційного аналізу (ЕІЛ) має значні обмеження.

Електроди, що містять фази з високою температурою плавлення, часто мають високу стійкість до ерозії, що ускладнює перенесення матеріалу [36]. Крім того, хоча цей метод забезпечує високу твердість та зносостійкість, він не завжди покращує корозійну або термостійкість. Технології виробництва електродів зазвичай дорогі та екологічно небезпечні [27–29].

Критичним фактором також є нелінійна залежність між часом легування та збільшенням маси катода. Після певного порогового часу, t_x , подальша обробка призводить до ерозії, а не до росту шару (Рисунок 2). Визначення оптимального t_x

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

залишається емпіричним і залежить від енергії розряду, матеріалу електрода та навколишнього середовища [32].

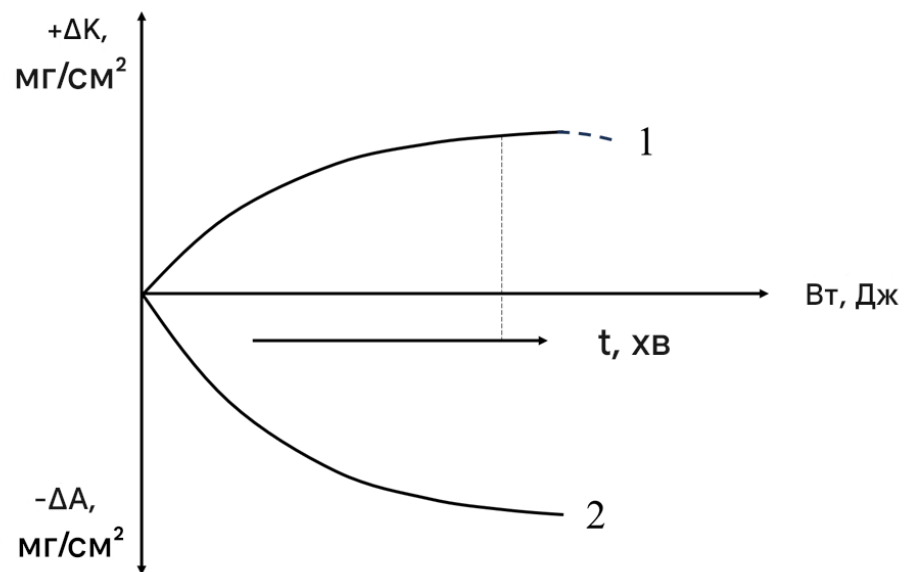


Рисунок 2.2 – Зміна ваги катода (1) та анода (2) як функція прикладеної енергії та часу обробки. ΔA – ерозія анода; ΔK – коефіцієнт посилення катода; W_p – прикладене значення енергії іскрових розрядів при осадженні підкладки площею 1 см^2 .

Сучасні підходи до підвищення ефективності іскрових розрядів включають подачу порошку в міжелектродний проміжок [17], обробку в інертному газі [37,38] або вакуумі [39] та використання нових методів виготовлення електродів: пресування та спікання [40], гаряче пресування [41] та іскрове плазмове спікання [42]. Однак багато з них є дорогими або неефективними в промисловому виробництві.

Перспективним напрямком є використання спеціального технологічного середовища (СПС). Це пасти, гелі або суспензії, що містять дисперсні легуючі компоненти [42–46]. Такий підхід дозволяє реалізувати процеси алітизації [43], цементації [44], азотування [45], сульфидування [46] та синтезу багатокомпонентних покриттів, розширюючи таким чином функціональність технології (Рисунок 2.3).

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

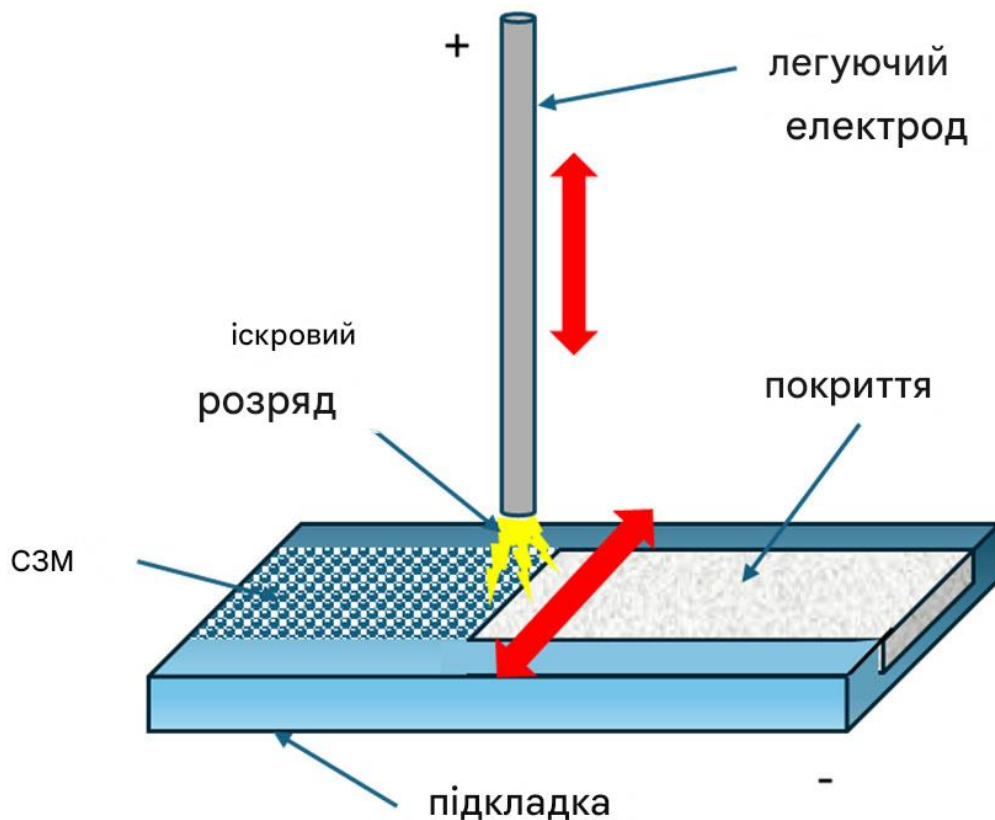


Рисунок 2.3 – Схема технології електроіскрового легування з використанням спеціального технологічного середовища.

Метод електроіскрового легування залишається перспективним інструментом для модифікації поверхні, де важливими є локалізована обробка, надійна адгезія та мінімальний термічний вплив. Водночас, процес потребує вдосконалення для відповідності сучасним вимогам, таким як однорідність та безперервність покриття, контрольованість фазового складу, екологічна безпека, та висока продуктивність. Розробка комбінованих (гібридних) технологій відкриває нові можливості для формування багатофункціональних покриттів з покращеними властивостями.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на створення універсальних моделей для оптимізації режимів електроіскрового легування залежно від матеріалу, структури та експлуатаційних вимог покриття.

2.3 Гібридні технології електроізоляційного різання (ЕІР)

Як і будь-який процес обробки поверхні, ЕІР має певні недоліки, пов'язані з

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

низькою якістю мікрорельєфу поверхні, наявністю пор, можливістю утворення тріщин, зниженою втомною міцністю, обмеженою товщиною сформованого шару та наявністю залишкових розтягувальних напружень у покритті [47]. Через ці недоліки розробка комбінованих технологій модифікації поверхні на основі ЕІР стає дедалі важливішою. Використання комбінованих технологій обробки дозволяє покращити якість поверхні після ЕІР, зменшити пористість, сформувати стискаючі напруження в поверхневому шарі, та покращити якість поверхні.

На рисунку 4 показано основні напрямки розвитку гібридних технологій на основі ЕІР, які знайшли застосування у виробництві. Цей перелік не є вичерпним, оскільки метод ЕІР швидко вдосконалюється, і з'являються нові гібридні технології. Основні гібридні технології поєднують ЕІР з подальшою обробкою поверхні з використанням концентрованих потоків енергії та матеріалів (лазерна, іонна, плазмова обробка тощо) та ЕІР з подальшою поверхневою пластичною деформацією (ППД). Список також може включати технології формування багат шарових (комбінованих) електроіскрових покриттів. Ці гібридні методи можуть формувати поверхневий шар із необхідними властивостями [48–51].

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

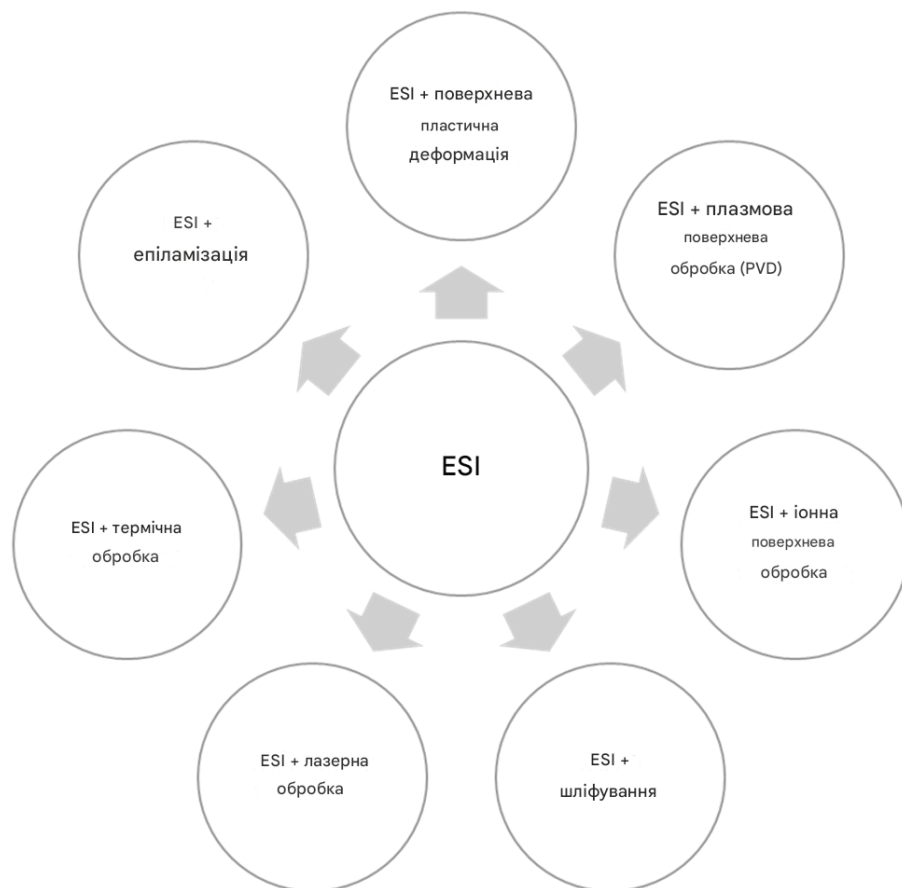


Рисунок 2.4 – Напрямки розвитку комбінованих (гібридних) технологій на основі методу електроізоляційного розряду (ЕІР).

Аналіз літератури показав, що найпопулярнішими технологіями, що використовуються на практиці, є комбінований ЕІР з подальшою поверхневою пластичною деформацією (ППД). Як основні ППД використовуються такі методи, як обкатка, алмазне полірування [52], безабразивне ультразвукове оздоблення (БУОЗ) [53] та інші. Вибір конкретної комбінації залежить від призначення та наявного обладнання.

Поєднання ЕІР з подальшою обробкою поверхні за допомогою концентрованих потоків енергії є перспективним напрямком розвитку. У дослідженнях [54–56] комбіновані процеси обробки, що включають вплив на загартовану поверхню іскрового розряду з подальшою лазерною обробкою (ЛО), вважаються дуже перспективними. ЛО дозволяє зменшити пористість покриттів ЕІР, усунути подряпини, тріщини та неоднорідності, а також збільшити щільність покриття. Локальне плавлення покриття та підкладеної сталевий підкладки відбувається під впливом лазерного променя. В результаті термокапілярної

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

конвекції, спричиненої нерівномірним розподілом температури по поверхні ванни розплаву та поверненням плазмового потоку, легуючий матеріал переноситься в об'єми ванни, що дозволяє багаторазово збільшити глибину шару сплаву. Однак, в результаті ТО, вигорання (випаровування) легкоплавких компонентів можливе. Тому використання комбінованих технологій для отримання покриттів, що містять ЛО, потребує подальших досліджень.

Зовсім недавно плазмово-осаджені плівки широко використовуються як захисні покриття [57], включаючи магнетронне напилення [58]. Низька адгезія є основним недоліком таких покриттів. Для подолання цієї проблеми використовуються такі технології напилення, як лазерне напилення та електроіскрове легування, які забезпечують високу адгезію завдяки металургійним реакціям, що відбуваються на межі розділу покриття-підкладка, і розплавлений матеріал підкладки змішується з нанесеним матеріалом. Однак отримані покриття демонструють високу шорсткість поверхні та утворення мікротріщин, що впливає на стійкість до агресивних середовищ.

Проблему дефектності електроіскрових покриттів можна вирішити вакуумним напиленням та магнетронним напиленням. Комбіновані покриття демонструють кращу стійкість до окислення, корозійну стійкість, зносостійкість тощо [59].

Незважаючи на значний прогрес у розвитку гібридних технологій, універсальні критерії вибору оптимальної комбінації методів залежно від умов експлуатації ще не сформульовані. Це вказує на необхідність подальшого систематичного аналізу та накопичення емпіричних результатів, включаючи кількісні порівняння показників якості покриттів, таких як глибина дифузії, мікротвердість, зносостійкість, адгезія та залишкові напруження.

Гібридні технології на основі електророзрядного легування (EDA) мають високий потенціал для промислового впровадження завдяки низькому енергоспоживанню, простоті впровадження та можливості локальної обробки складних поверхонь. ЕІЛ є екологічно безпечним методом, оскільки не використовує токсичні реагенти та не генерує значних викидів [10]. Однак, його

					MP. ATm – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

поєднання з іншими методами, такими як ЛО, SPD, фізичне осадження з парової фази (PVD) та інші, може збільшити використання ресурсів. Тим не менш, інтеграція процесів та їх автоматизація можуть оптимізувати ці витрати. Окремі методи обробки поверхонь, такі як ЕІЛ, ЛО, PVD, HIPIMS (високоенергетичне імпульсне магнетронне розпилення) та інші, вже знайшли промислове застосування. Для широкого впровадження гібридних технологій у промисловість необхідно провести економічний аналіз, який враховує вартість обладнання, тривалість обробки та ефективність покриттів у реальних умовах експлуатації. Подальші дослідження повинні охоплювати весь життєвий цикл гібридних технологій, а також розробляти моделі співвідношення витрат та ефективності для конкретних галузей, таких як авіація, енергетика та медицина.

2.4 Удосконалення комбінованих методів обробки електроізоляційним обробленням (ЕІД) та полімерним обробленням під дією імпульсів (ППД)

Методи поверхневої пластичної деформації (ППП) ефективно використовуються для підвищення зносостійкості та довговічності деталей після ЕІД. Вони базуються на впливі деформуючого інструмента (кульки, ролика, індентора іншої форми) з певним тиском, що застосовується відповідно до схеми кочення, ковзання або пресування (Рисунок 5).

					MP. ATm – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

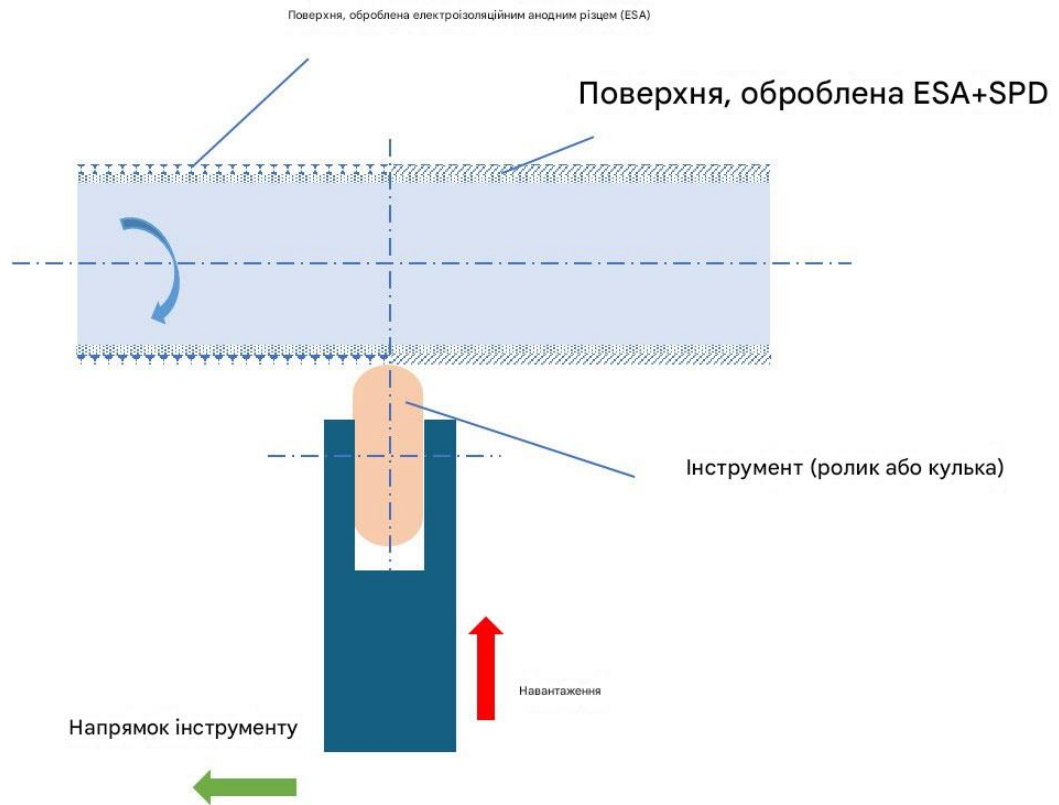


Рисунок 2.5 – Схема процесу припрацювання покриттів ЕІЛ.

Метод інтегрального оброблення наноструминним струмом (ІПД) має багато переваг, включаючи технологічну простоту, низьку трудомісткість, відсутність потреби в дорогому обладнанні та можливість обробляти деталі будь-якої геометрії чи розміру. Основними результатами є підвищена твердість, зменшення шорсткості та підвищена стійкість до втоми, зносу та корозії [28].

Серед різних методів ІПД є дробоструминна обробка, різблення, вальцювання поверхні роликом та кулею, вирівнювання, вібраційна обробка, гартівне токарне точіння, шліфування поверхні на оправці тощо.

Використання ІПД після електроізоляційного оброблення (ІЛС) може усунути характерні недоліки останнього, такі як мікротріщини, висока шорсткість та розтягувальні напруження [20,59]. Тому поєднання ІЛС та ІПД є перспективним способом підвищення експлуатаційних властивостей загартованого шару.

Слід зазначити, що ІПД може не тільки зміцнювати поверхню деталей, але й відновлювати її, формуючи, наприклад, кілька опорних зон на шийці вала. Крім того, цей метод може бути використаний для створення спеціальних мікрорельєфів на загартованих поверхнях деталей.

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Різні комбіновані покриття мають велике значення в інженерній практиці, і покращення їхньої якості є актуальним завданням.

Обробка поверхні після попереднього електроіскрового різання (ЕІР) має певні особливості. Через відносно малу товщину шарів, що утворюються під час ЕІР (десятки мікрон), їх подальше шліфування для зменшення шорсткості поверхні в деяких випадках є складним або взагалі неприйнятним.

Це зменшує шорсткість поверхні, знімає кінцеві розтягуючі напруження та дозволяє кулькове кочення (БР) [59,60]. Після такої обробки макронапруження, отримані електроіскровим різанням, стають стискаючими, а їх величина практично не залежить від зусилля припрацювання. Це свідчить про те, що пластичне течія матеріалу покриття відбувається в процесі припрацювання покриття.

Одним з найперспективніших методів обробки деталей, отриманих методом електроіскрового різання (СПР), є алмазне вигладжування (ДР), яке, на відміну від кулькового або роликового припрацювання, дозволяє обробляти деталі з дуже високою твердістю [61]. Використання сферичного алмазу як інструменту дозволяє здійснювати локальну пластичну деформацію, зменшувати шорсткість поверхні, а також зменшувати хвилястість і пористість.

У серії робіт [28,62,63] було проведено дослідження структурного стану покриттів електроізоляційного анодування (ЕІА) після подальшого вирівнювання за допомогою інтегрального анодування (ІАП) з алмазом (ДАН) та кулькового прокату (КУП).

Було оцінено напружено-деформований стан поверхневого шару після ІАП покриттів ЕІА [62], а також вплив технологічних параметрів на мікрогеометрію, структуру та властивості комбінованих покриттів [28,63].

Як показано на рисунках 6 та 7, ефективність ІАП як методу зменшення шорсткості поверхні залежить від R_{sp} та матеріалу електрода зі сплаву ЕІА. Якщо значення R_a значною мірою визначається радіусом алмазного індентора для покриттів, отриманих за допомогою вольфрамового електрода, то вплив радіуса індентора зменшується зі збільшенням пластичності матеріалу електрода (хрому та нікелю) (рисунок 6). Характерно, що для ІПД ДС (Рисунок 7) майже всі точки

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

залежності $R_a = f(R_{cp})$ укладаються на одну й ту саму криву для всіх покриттів, незалежно від матеріалу легуючого електрода. Автори пояснюють цей ефект механізмом формування поверхні, який складається з двох процесів: деформування м'якої підкладки покриття та зрізання мікронерівностей [63]. У [62] запропоновано формули для розрахунку необхідної сили деформації залежно від матеріалу легованого електрода, м'якого та твердого покриття.

Аналіз мікроструктури поверхневого шару після ІПС+ ДС з ДС показує, що якість поверхні покращується зі збільшенням діаметра індентора. Водночас, відсутні дефекти, які виникають під час ДС. Перевага надається ДС з інденторами $R = 3$ мм та $R = 4$ мм при зусиллях 1920 та 1330 МПа відповідно. Згладжена поверхня має меншу шорсткість; у шарі не спостерігається тріщин, а розподіл твердості є рівномірним.

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

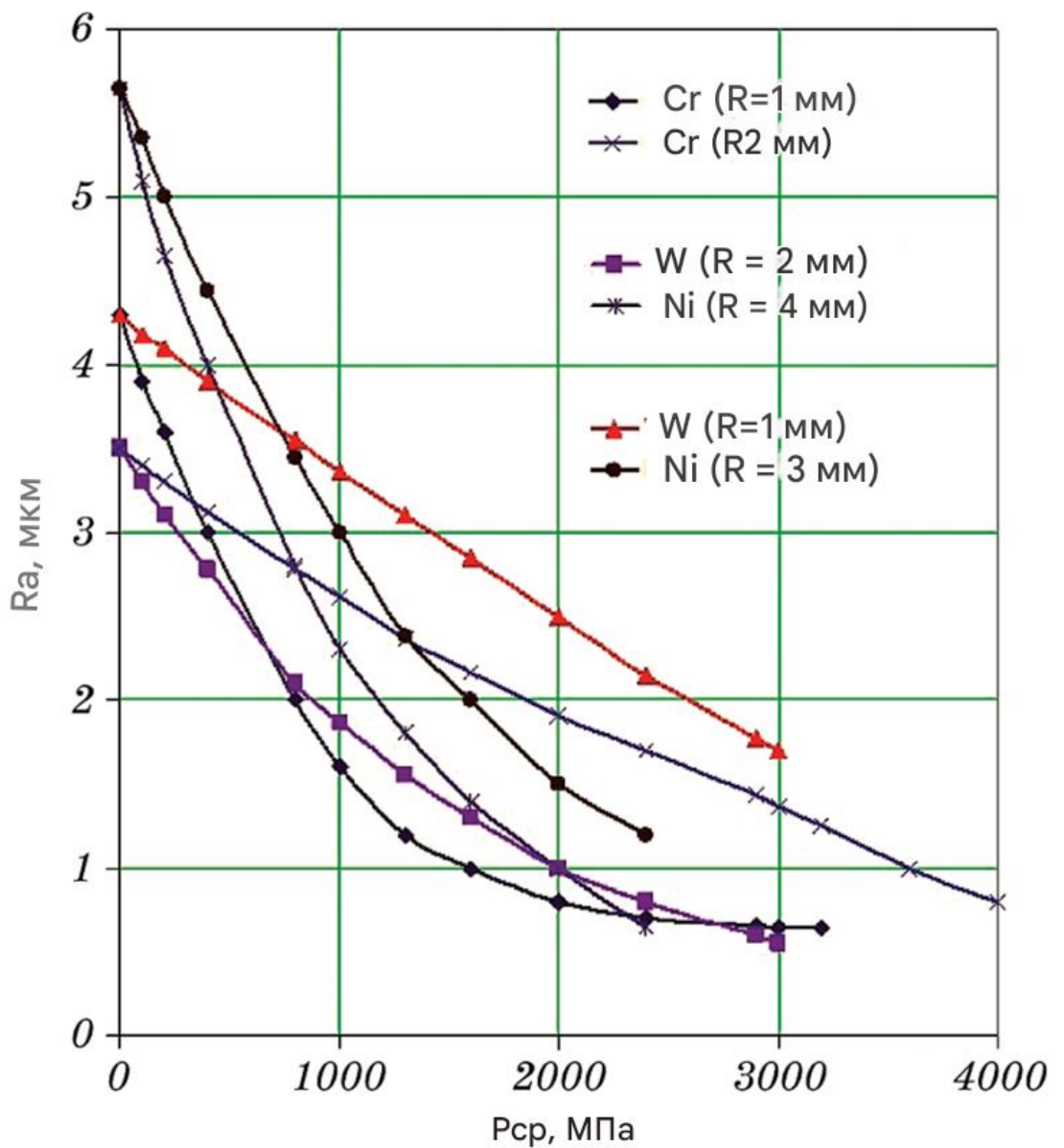


Рисунок 2.6 – 0 Шорсткість поверхні (R_a) сталі 45 (вуглецева сталь із вмістом вуглецю 0,45%) після комбінованої обробки (ЕІЛ з вольфрамом, хромом та нікелем, а потім DS) залежить від сили (P_{cp}) алмазного згладжування (DS) при різному радіусі алмазного індентора (R) [63].

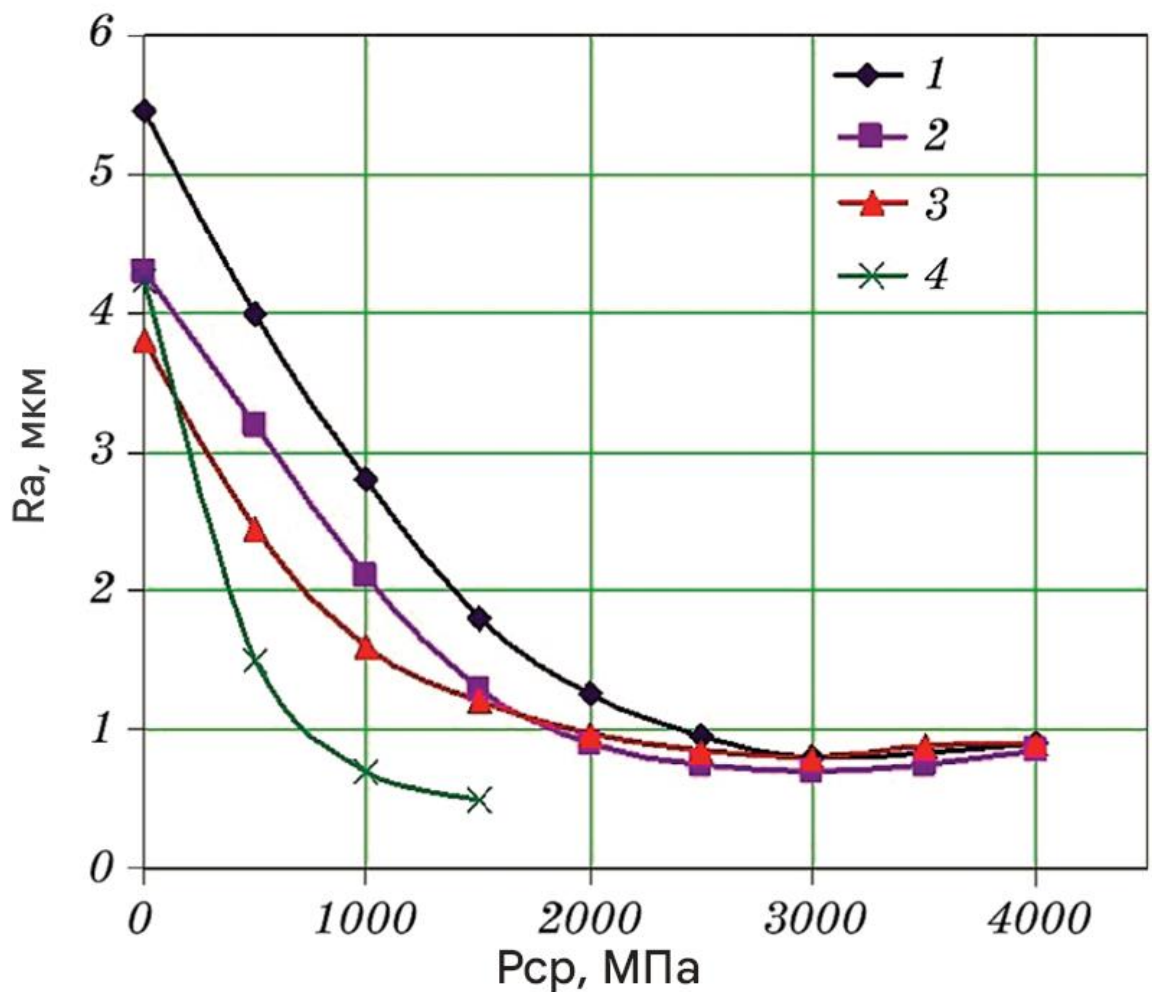


Рисунок 2.7 – Шорсткість поверхні (Ra) сталі 45 (вуглецева сталь із вмістом вуглецю 0,45%) після комбінованої обробки (електророзрядне зчеплення з нікелем (1), вольфрамом (2), хромом (3) та оловом (4), а потім BR) залежить від сили (Rcp) кочення кульки [63].

У таблиці 1 показано, як основні методи паророзрядного оброблення (SPD), що використовуються після електророзрядного зчеплення (ЕІЛ), порівнюються один з одним.

Було оцінено вплив цих методів на шорсткість, твердість та товщину загартованого шару. Серед досліджених методів було виявлено, що кочення кульки (BR) є найефективнішим для зменшення шорсткості при низькій початковій топографії поверхні, особливо після ЕІЛ з низькою енергією розряду (0,6 Дж), коли Ra зменшилася до 0,11–0,21 мкм. Водночас, ефективність BR знижується в умовах високої енергії (6,8 Дж), ймовірно, через структурні ускладнення, що виникають внаслідок сильних термомеханічних впливів під час ЕІЛ, а також утворення

загартованого, високоміцного шару, який менш схильний до подальшої пластичної деформації. DS та BR є найперспективнішими методами зменшення шорсткості з одночасним збільшенням твердості шляхом прокатки. Однак надмірного гартування слід уникати, оскільки воно може збільшити залишкові напруження в поверхневому шарі, зменшуючи втмну міцність і потенційно призводячи до мікротріщин.

Очевидно, що при BR фокус деформації менш локалізований, що, звичайно, змінює умови гартування шару. BR забезпечує більш рівномірний вплив сили на поверхневий шар. Під час BR ESI вольфрамкових покриттів (діаметр кульки 19 мм при $P_{ср} = 1380$ МПа) на сталі 45 отримані шари характеризуються високою якістю: покриття твердість 8000 МПа, яка поступово зменшується від поверхні до підкладки [63].

Таблиця 2.1 – 0 Результати впливу наступної технології обробки на параметри поверхні після цементації EІЛ (CEІЛ) при різних енергіях розряду сталі AISI 321 (до обробки $R_a = 0,5$ мкм) [59,64].

Енергія розряду для EІЛ, Дж	Спосіб обробки *	Загальна глибина шару після обробки, мкм	Мікротвердість **, МПа	Шорсткість R_a , мкм
0,6	CEІЛ	48	10130	0,9 – 1,0
	CEІЛ + БУО	50	8800	0,2
	CEІЛ + БУО + шліфування	48	8410	0,6
	CEІЛ + шліфування	18	7230	0,6
	CEІЛ + КК	30	9500	0,11– 0,21
2,83	CEІЛ	200	9740	5,8-6,7
	CEІЛ + БУО	210	9700	0,8
	CEІЛ + БУО + шліфування	195	9500	0,8
	CEІЛ + шліфування	130	7900	0,8
	CEІЛ + КК	96	8400	0,53 – 0,71
6.8	CEІЛ	250	11000	10,0–14,5
	CEІЛ + БУО	244	9850	0,8
	CEІЛ + БУО + шліфування	220	8750	0,8

	СЕІЛ + шліфування	110	6700	0,8
	СЕІЛ + КК	115	9000	1,23–1,58

* СЕІЛ — цементация електроіскровим легуванням; БУО — безабразивне ультразвукове оброблення; КК — кулькове кочення;

** у [59,64] значення мікротвердості в одиницях HV.

Однак додаткове зміцнення не завжди необхідне, враховуючи збільшення напружень у поверхневому шарі. Комбінація ЕІЛ + БУО забезпечує оптимальний баланс низької шорсткості (~0,8 мкм) та високої мікротвердості (до 9850 МПа) з достатньою товщиною зміцненого шару (Таблиця 1).

На жаль, у наявній літературі немає конкретних, експериментально перевірених або отриманих рекомендацій щодо визначення величини очікуваних деформацій м'яких антифрикційних металевих покриттів або комбінованих електроіскрових покриттів (CESC).

Крім того, у літературі немає інформації про структуру CESC, що піддаються подальшій або попередній обробці SPD, а також про вплив такої технології зміцнення на довговічність та інші властивості виробів. Ця обставина вказує на необхідність широкого спектру експериментальних та теоретичних досліджень, спрямованих на виявлення окремого впливу різних факторів на параметри якості поверхневого шару, оскільки навіть найвдаліше рішення проблеми пружнопластичної деформації зміцненого шару електроізоляційного напилення (ЕІП) не може бути надійним інструментом для визначення очікуваної поведінки матеріалу шару під час інтегральної мікроелектронної обробки (ІПП).

Доцільно зосередитися на вивченні механізмів деформації покриттів ЕІП + ІПП, а також на розробці моделей, які можуть передбачати вплив ІПП на структуру та властивості шару. Оптимальні параметри ІПП для покриттів, сформованих різними електродами, необхідно визначати з урахуванням глибини, твердості та фазового складу шару. Особливу увагу слід приділити аналізу мікроструктури, залишкових напружень та довговічності при реальному терті та втомному навантаженні. Результати цих досліджень дозволять створити науково

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

обґрунтовані рекомендації для промислового застосування та подальшої автоматизації технологій ЕПІ + ІПП.

3.2. Удосконалення комбінованих методів електроізоляції (ЕІЗ) та лазерної обробки (ЛО)

Комбіновані методи обробки матеріалів, зокрема, поєднання ЕІЗ та лазерної обробки (ЛО), стали важливими інструментами в сучасних технологіях поверхневого зміцнення.

Такий підхід дозволяє вирішити широкий спектр проблем, які важко вирішити за допомогою традиційних методів обробки [17,64]. ЛО дозволяє зменшити пористість покриттів ЕІЛ, усунути подряпини, тріщини та неоднорідності, а також збільшити щільність покриття [65,66]. Під впливом лазерного променя відбувається локальне плавлення покриття ЕІЛ та підкладеної сталеві підкладки. В результаті термокапілярної конвекції, викликаної нерівномірним розподілом температури на поверхні розплаву та поверненням потоку плазми, сплав дифундує в підкладку, що дозволяє значно збільшити глибину шару сплаву [67].

Автори [14,68,69] виділяють ключові характеристики комбінованих покриттів ЕІЛ + ЛО, зазначаючи, що мікроструктура та властивості суттєво залежать від параметрів обробки.

Ці покриття демонструють кращу адгезію до підкладки порівняно з тими, що оброблені ЕІЛ або ЛО окремо, а також покращену гомогенізацію хімічного складу. Також покращуються структура та кристалізація, а мікротріщини заповнюються, що призводить до вищої щільності покриття та покращеної корозійної стійкості. Товщина покриття збільшується, тоді як шорсткість зменшується порівняно з покриттями ЕІЛ, хоча вона вища, ніж поверхня підкладки. Однак, ЛО може спричинити випаровування легкоплавких компонентів, що свідчить про необхідність подальших досліджень для оптимізації комбінованого процесу нанесення покриттів ЕІЛ+ЛО.

Вплив лазерної обробки (ЛО) на структуру, фазовий склад та зносостійкість високоентропійних покриттів $(\text{Ti}_{0.5}\text{W}_{0.25}\text{Cr}_{0.5}\text{FeCo}_{1.75}\text{Ni}_3\text{Al})$ та

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

$Ti_{0.8}W_{0.25}Cr_{0.5}FeCo_{1.75}Ni_3AlB_{0.6}$), отриманих за допомогою ЕЛ, досліджувався в [70]. Рентгенівський дифракційний аналіз виявив значні зміни у фазовому складі після ЛО, зокрема, збільшення твердого розчину ОЦК та зникнення піків дифракції боридів (див. рисунки 8 та 9). Ці результати означають, що ЛО може ефективно запобігати осадженню боридної фази в покриттях ЕЛ. Мікроструктурний аналіз показав утворення зони термічного впливу, що простягається до 100 мкм, тоді як розподіл хімічних елементів та мікротвердість залишалися рівномірними. Досягнення високоякісних покриттів вимагає ретельного вибору параметрів термічного впливу. Випробування на зносостійкість показали, що комбіновані покриття ESI + ЛО продемонстрували 40-кратне та 2,4-кратне збільшення зносостійкості при квазістатичному та динамічному навантаженні відповідно при випробуваннях з індентором Si_3N_4 порівняно з необробленими лазером покриттями. Аналогічно, зносостійкість з карбідним індентором (WC-6% Co) збільшилася в 36 та 2,6 рази відповідно [70].

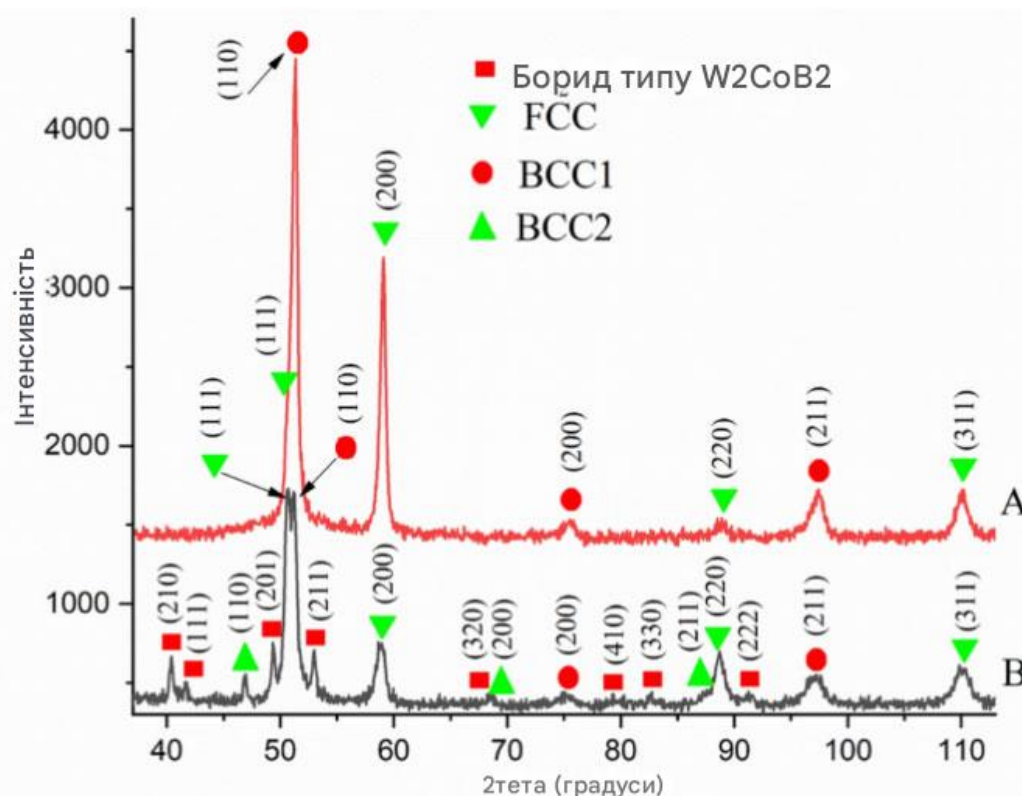


Рисунок 2.8 – Рентгенівські дифрактограми литих сплавів $Ti_{0.5}W_{0.25}Cr_{0.5}FeCo_{1.75}Ni_3Al$ (A) та $Ti_{0.8}W_{0.25}Cr_{0.5}FeCo_{1.75}Ni_3AlB_{0.6}$ (B) [70].

					MP. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Сплави були отримані дуговим плавленням з використанням металів з чистотою >99.5 ат. % та порошку дибориду титану.

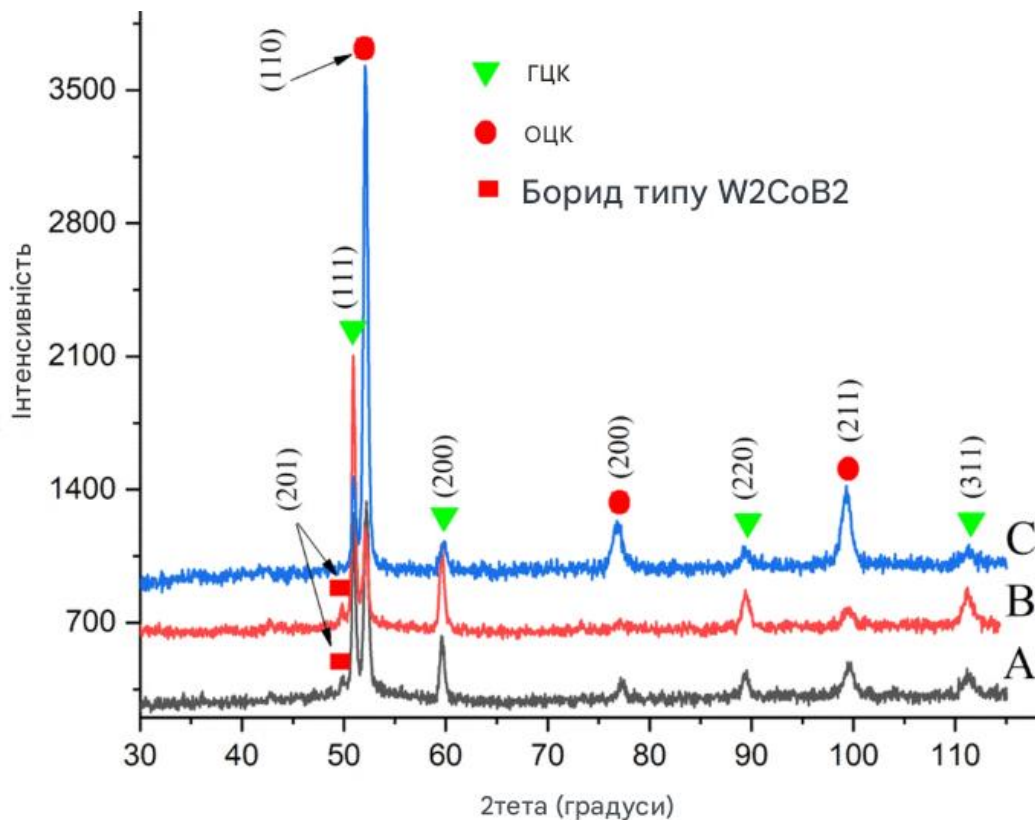


Рисунок 2.9 – Рентгенівські дифрактограми поверхні покриттів $Ti_{0.8}W_{0.25}Cr_{0.5}FeCo_{1.75}Ni_3AlB_{0.6}$, отриманих методом електрофізичного випромінювання (ЕФВ) при різних енергіях розряду: (А) 0.52 Дж, (В) 1.1 Дж та (С) 1.1 Дж з подальшою лазерною обробкою (ЕПВ + ЛТ) [70]. Для лазерної обробки поверхні використовувалися такі параметри: довжина хвилі опромінення 1.06 мкм; тривалість лазерного імпульсу 5 мс; фокусна відстань системи 100 см; частота імпульсів 10 Гц; діаметр плями 1.25 мм; напруга 550 В; енергія випромінювання 3.9 Дж; щільність потужності 0.65×10^5 Вт/см². ЕПВ та лазерна обробка проводилися на повітрі. Комбінована технологія електроізоляційного фарбування (ЕІБ) з подальшим лазерним обробленням (ЛТ) використовувалася для формування твердих зносостійких [54,71], керамічних [65,72] та спеціальних покриттів [70,73]. Автори показали, що ЛТ після ЕІБ може змінювати мікроструктуру та фазовий склад покриттів, що призводить до змін їх фізико-механічних властивостей. Комбінована технологія дозволяє покращити якість поверхні, зменшити

шорсткість, підвищити зносостійкість, усунути несприятливі розтягувальні напруження, спричинені ЕІБ, забезпечити кращу корозійну стійкість тощо.

Використання гібридних технологій ЕІБ та ЛТ ефективно покращує механічні та фізичні властивості поверхневих шарів. Однак, для максимальної ефективності впровадження цієї технології у виробництво необхідно вирішити низку питань.

До них належать:

оптимізація параметрів ЕІБ та ЛТ; застосування нових методів лазерної обробки, таких як лазерне плакування та лазерне плавлення з додаванням порошку; моделювання та імітація процесів обробки для визначення оптимальних параметрів;

вибір матеріалів для ЕІБ, таких як використання складних легуючих систем для покриттів; та застосування багатоступеневих технологій обробки для формування багатошарових покриттів.

Результати дослідження дозволять краще обробляти матеріали для широкого діапазону застосувань, що вимагають досягнення високих експлуатаційних характеристик.

3.3. Удосконалення технології відновлення зношених поверхонь деталей методом електроізоляційного різання з подальшим нанесенням металополімерних матеріалів.

Поточний напрямок – це поєднання електричного впливу на поверхню з подальшим нанесенням полімеру [9] та металополімерних матеріалів (МПМ) [10]. Комбінована технологія МПМ + МПМ дозволяє досягти необхідного рівня мікрооднорідності (шорсткості) та подальшої обробки лезом для забезпечення іншого співвідношення площ наплавленого металу та металополімерного матеріалу.

Переваги гібридної технології МПМ + МПМ (метод МПМ з подальшим нанесенням металополімерних матеріалів) очевидні: безперервність поверхні становить 100%; шорсткість значно нижча, а твердість вища. Завдяки можливості нанесення покриттів ESI з використанням широкого спектру електродних

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

матеріалів, можна варіювати механічні, теплові, електричні та інші властивості робочих поверхонь деталей широкий діапазон [74]. Проникнення МПМ у порожнини та мікронні нерівності відновлених деталей виключає можливість утворення корозійних ямок у цих порожнинах. Зносостійкість, надійність та довговічність відновлених деталей вищі, ніж у відновлених за окремими технологіями.

Слід зазначити, що при застосуванні комбінованого технологічного методу ESI + МПМ можливі різні варіанти формування поверхні. Метод ESI може варіювати висоту мікронерівностей, а їх подальша обробка лезом (ріжучим інструментом) може забезпечити різні співвідношення між площами наплавленого металу та металополімерного матеріалу [75].

Недоліками технології ESI + МПМ є низька твердість та міцність сформованого поверхневого шару, особливо у випадках, коли шар МПМ наноситься після ESI.

У цьому контексті в [76] запропоновано метод, де поверхневий шар армується принаймні одним шаром дроту після ESI; потім наноситься МПМ, і після полімеризації сформований шар піддається фінішній обробці. Однак, цей метод не позбавлений своїх недоліків. Це, перш за все, труднощі, пов'язані з закріпленням армуючого дроту на ремонтованій ділянці та нерівномірний розподіл армуючого матеріалу, як на вертикальній, так і на горизонтальній площині ремонтованої поверхні. У роботі [74] рекомендується використовувати зносостійкий матеріал у вигляді порошку як армуючий матеріал.

Незважаючи на свої незаперечні переваги, комбінована технологія ESI + МПМ також має недоліки. Це, перш за все, наступні:

- зниження твердості та міцності сформованого поверхневого шару, що складається лише з МПМ, який розташований над покриттям, нанесеним методом ESI;
- МПМ добре показує себе на стиск і значно гірше на зсув, що негативно впливає на їх використання у відновленні поверхонь тертя [77].

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

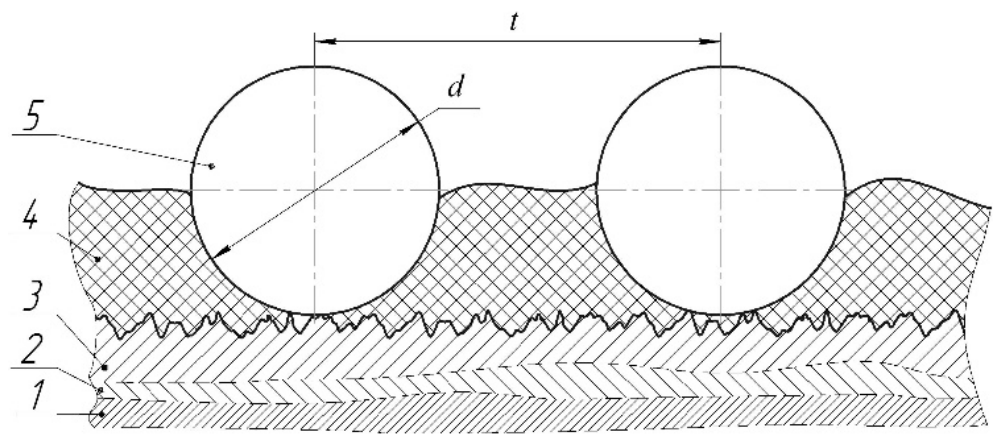
Основне застосування комбінованої технології ESI + MPM – це відновлення поверхонь деталей у нерозбірних з'єднаннях (сіла підшипників, півмуфти тощо).

У [78,79] запропоновано комбіновану технологію електроізоляційного різання (EIP) + металоізоляційного різання (MPP), яка включає нанесення покриття EIP на зношену поверхню деталі металевим електродом; нанесення MPP на оброблену поверхню, яка армується дротом перед полімеризацією. У цьому випадку на зношену поверхню деталі 1 (Рисунок 10) методом EIP наноситься шар 3 покриття з будь-якого твердого зносостійкого металу (хрому, нікелю тощо). У цьому випадку між нанесеним металом і деталлю формується перехідний шар 2, що представляє взаємне дифузійне проникнення анодного та катодного елементів. Покриття можна наносити, змінюючи енергію розряду в діапазоні 0,036–6,8 Дж. Зі збільшенням енергії розряду зростає товщина покриття та шорсткість поверхні. Згодом на поверхню EIP наноситься метало-полімерний матеріал 4. Автори показують, що використання комбінованої технології EIP з подальшим нанесенням MPP дозволяє підвищити міцність та зносостійкість сформованих покриттів.

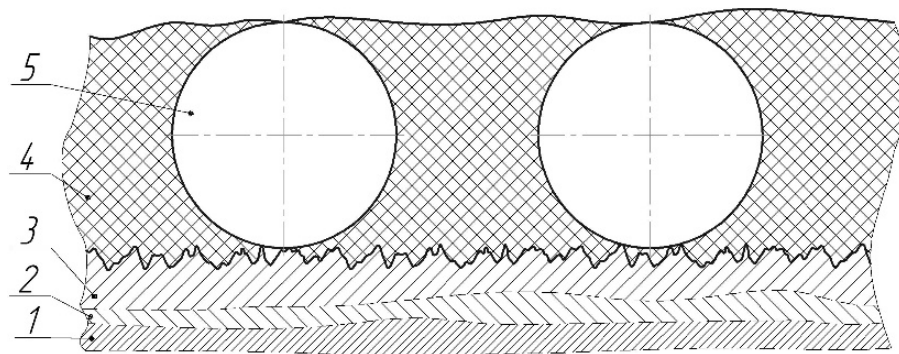
Часто виникає потреба відновлювати плоскі та вигнуті зношені поверхні деталей з твердих, зносостійких металів, наприклад, корпусів насосів, компресорів, центрифуг, редукторів тощо (Рисунок 11).

У цьому випадку після нанесення покриття EPI на оброблену поверхню 1 (див. Рисунок 11) наноситься сітка із загартованого, термічно обробленого дроту з мінімальним розміром осередків $1,0-1,5 \times 1,0-1,5 \text{ мм}^2$. У цьому випадку товщина нанесеного MPM повинна забезпечувати покриття дротів (2) сітки щонайменше на половину їх діаметра. Сітку можна закріпити зовні поверхні, що підлягає відновленню, будь-яким відомим методом, наприклад, за допомогою клею (3). Після встановлення сітки необхідно продовжувати наносити MPM, доки вона не буде повністю покрита. У випадку значного зносу нанесення сітки можна повторювати необхідну кількість разів.

					MP. ATm – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

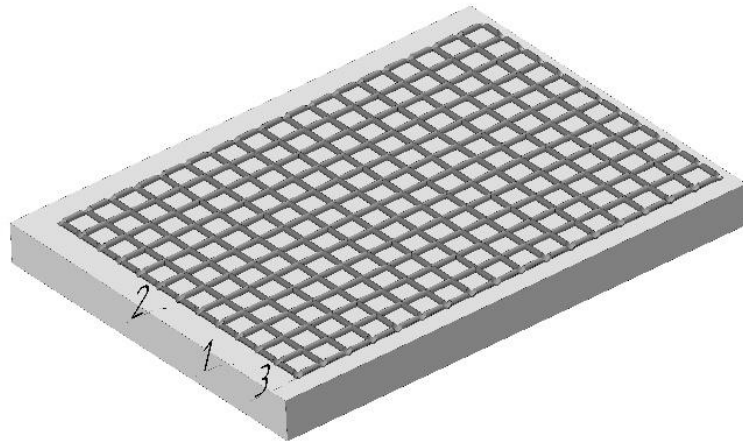


а)

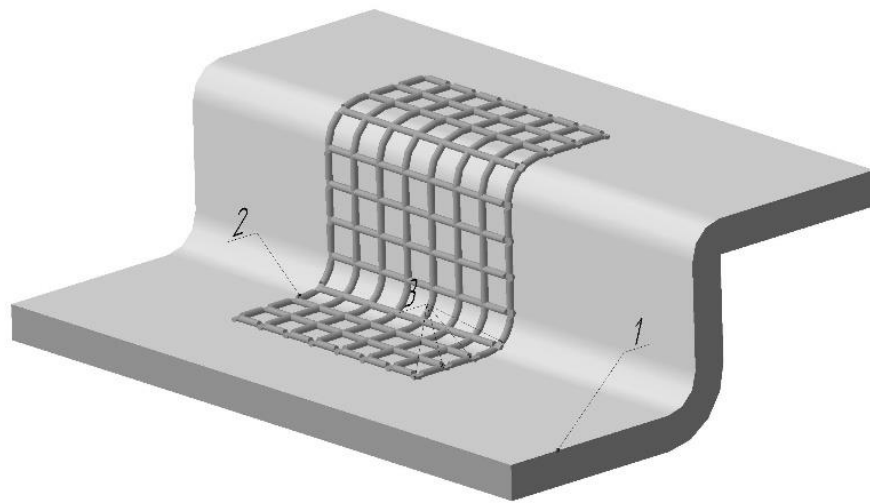


б)

Рисунок 2.10 – Відновлення зношених поверхонь обертових тіл за комбінованою технологією електроізоляційного армування (ЕІА) + металополімерного армування (МПМ): (а) схематичне зображення етапу занурення армуючого дроту в шар МПМ, нанесений після ЕІА; (б) схематичне зображення готового покриття, включаючи шар МПМ, армований дротяним шаром. 1 — деталь, 2 — формувальний перехідний шар, 3 — ЕІА-покриття виготовлене з твердого зносостійкого металу, 4 — металополімерний матеріал, 5 — армуючий дріт [75].



а)



б)

Рисунок 2.11 – Схеми поверхонь для відновлення зношених поверхонь: (а) — плоска, (б) — криволінійна: 1 — підкладка, 2 — армуюча сітка, 3 — проміжний адгезійний шар (клей) [78].

Таким чином, в результаті застосування запропонованого методу відновлення зношених поверхонь деталей утворюється шар, якість, зносостійкість, надійність та довговічність якого вищі, ніж при використанні методів електроізоляційного різання (ЕІР) та окремого застосуванні хімічно-імпульсного фарбування (МІР) для відновлення.

Формування структури та властивостей покриттів, отриманих за комбінованою технологією ЕІР з подальшим застосуванням МІР, показано в [10], де автори досліджували покриття на аустенітній сталі AISI 321. Поверхня спочатку

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

оброблялася ЕІР графітовим електродом, потім ЕІР алюмінієвим електродом та твердим сплавом. МПМ було нанесено на покриття твердого сплаву Т15К6, попередньо армоване порошком у вигляді суміші твердого сплаву ВК6, доданої до двокомпонентної епоксидної системи, наповненої феросиліцієм Loctite 3478 з концентрацією армування ~60%. Це дало покриття товщиною до 1,5 мм з мікротвердістю 9500–10 100 МПа. Шорсткість поверхні становила Ra = 1,2 мкм. Ця технологія пропонується для відновлення зношених поверхонь обертових тіл (наприклад, валів насосів).

Складна структура покриттів ЕІЛ + МРМ була підтверджена електронною мікроскопією [80]. На поверхні є «темний» шар. Його мікротвердість становить від 5000 до 5400 МПа. Глибше в металі утворюється «світлий» шар. Мікротвердість цього шару поступово зменшується до підкладки (Рисунок 12). Використання зносостійкого матеріалу у вигляді порошку як армуючого матеріалу рекомендовано в [74].

Для збільшення товщини та гідраабразивної зносостійкості пропонується проводити лазерну обробку комбінованих покриттів ЕІЛ + МРМ [80]. ЛО покриттів сприяє формуванню характерної шаруватої мікроструктури, параметри якої залежать від обраного режиму обробки. Як показано в таблиці 2, збільшення тривалості лазерного імпульсу при зменшенні частоти до 50 Гц призводить до зростання товщини зміцненого шару та збільшення його мікротвердості. Це пов'язано з глибшим термічним ефектом та покращеною модифікацією поверхні. Комплексні дослідження впливу ЛО покриттів параметри дозволяють виявити ключові закономірності та встановити оптимальні умови обробки, що забезпечують необхідне поєднання міцності та експлуатаційних характеристик покриття.

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

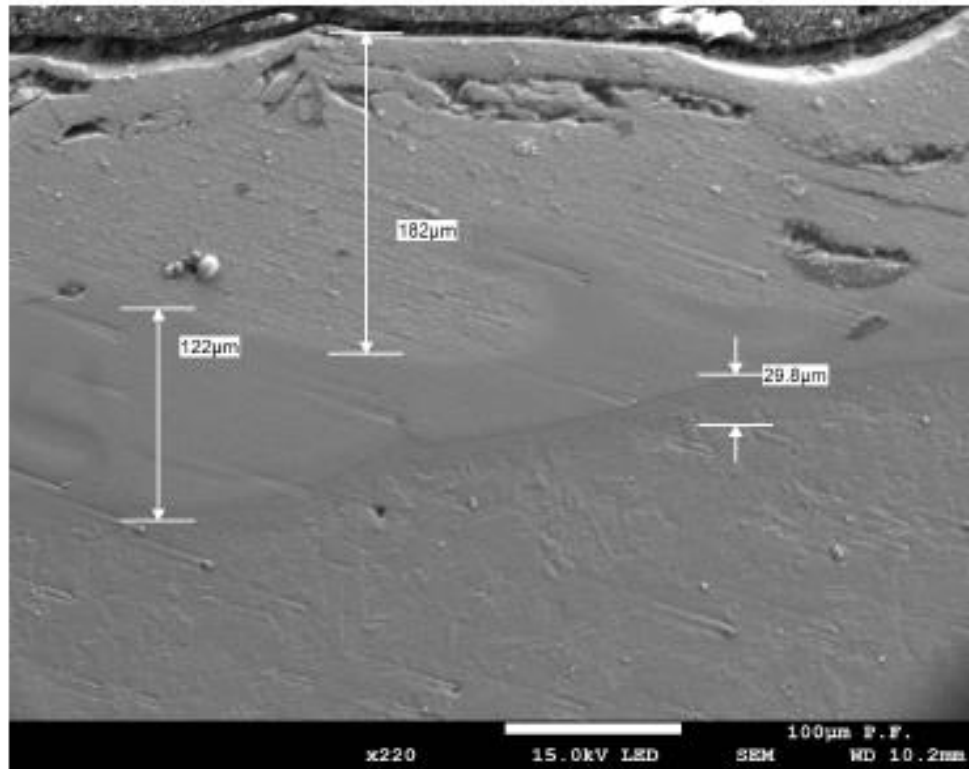


Рисунок 2.12 – Мікроструктура покриття (підкладка – сталь AISI 321) після послідовного електроізоляційного фарбування (ЕІЛ) Т15К6 (енергія розряду $W_p = 0,55$ Дж), ЕІЛ Т15К6 ($W_p = 0,90$ Дж) та напилення методом мікроепсиліаційного напилення (МПН). ЕІЛ – це суміш порошку ВК6 та двокомпонентної епоксидної системи, наповненої феросиліцієм Loctite 3478 [80].

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Таблиця 2.2 – Характеристики поверхневих шарів на сталі AISI 321 після гібридної технології: ЕІЛ (легування електродним твердим сплавом Т15К6, режим ЕІЛ – енергія розряду 0,55 Дж, потім 0,90 Дж) + ЕІЛ (порошок твердого сплаву ВК6 у двокомпонентній епоксидній системі, наповненій феросиліцієм Loctite 3478) + ЛО.

Режим ЛО	Товщина, мкм	Мікротвердість, МПа	Суцільність, %	Шорсткість поверхні, Ra, мкм
Режим 1 (живлення 120 мм/хв, напруга 500 В, лазерний імпульс $0,3 \times 10^{-3}$ с, частота 100 Гц)	10/100 *	6110/2650 *	65/100 *	2,1
Режим 2 (живлення 120 мм/хв, напруга 500 В, лазерний імпульс $0,3 \times 10^{-3}$ с, частота 50 Гц)	40/130	7200/4500	90–95/100	3,3
Режим 3 (живлення 120 мм/хв, напруга 500 В, лазерний імпульс 1×10^{-3} с, частота 50 Гц)	50/190	8900/6500	90–95/100	6.2
Режим 4 (живлення 120 мм/хв, напруга 550 В, лазерний імпульс 1×10^{-3} с,	100/230	9250/7250	100/100	8.1

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

частота 50 Гц)				
Режим 5 (живлення 120 мм/хв, напруга 600 В, лазерний імпульс 1×10^{-3} с, частота 50 Гц)	420/260	10 000/7300	100/100	9.0

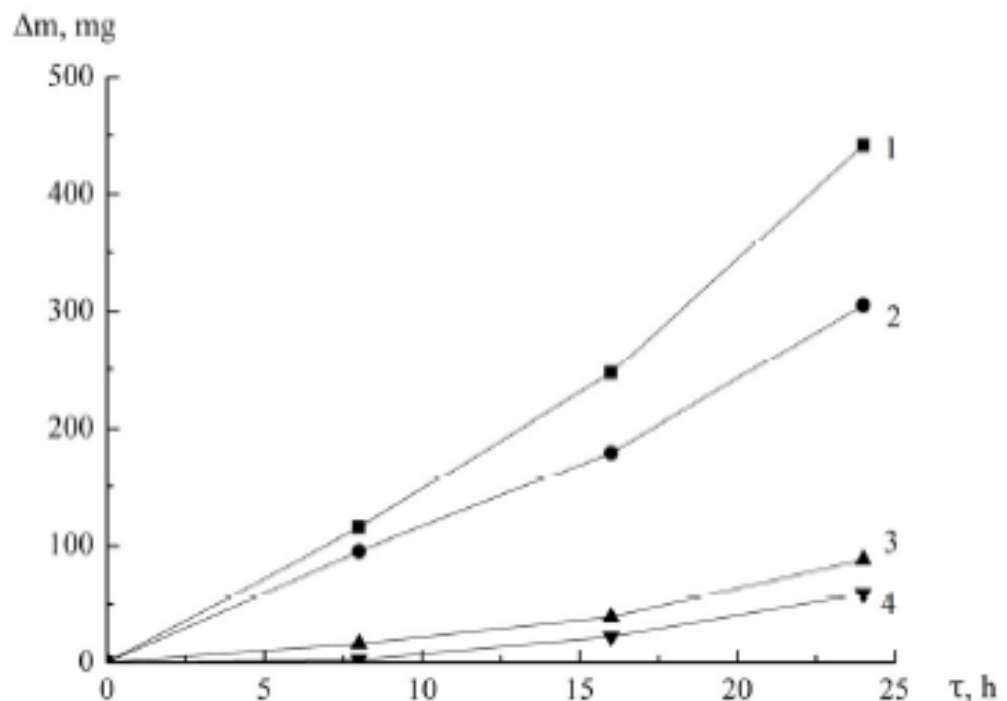


Рисунок 2.13 – Абразивне зношування (втрата ваги) в залежності від часу випробування для зразків AISI 321 послідовно: 1— без покриття; 2—ЕІЛ Т15К6 ($W_p = 0,55$ Дж) + ЕІЛ Т15К6 ($W_p = 0,90$ Дж); 3—ЕІЛ Т15К6 ($W_p = 0,55$ Дж) + ЕІЛ Т15К6 ($W_p = 0,90$ Дж) + МРМ; 4—ЕІЛ Т15К6 ($W_p = 0,55$ Дж) + ЕІЛ Т15К6 ($W_p = 0,90$ Дж) + МРМ + LP. МРМ — це суміш порошку VK6 та двокомпонентної епоксидної системи, наповненої феросиліцієм Loctite 3478. Режими LP: подача 120 мм/хв; напруга 550 В; лазерний імпульс 10^{-3} с; частота 50 Гц [81].

Комбіновані технології ЕІЛ та МРМ створюють високоміцні, безперервні покриття з низькою шорсткістю, підвищеною зносостійкістю та довговічністю.

Цей ефект ще більше посилюється завдяки подальшій лазерній обробці. Подальші дослідження повинні бути зосереджені на оптимізації параметрів армування (дротом або порошком), покращенні адгезії між шарами, вивченні впливу мікроструктури на продуктивність та розробці моделей для прогнозування зносостійкості та довговічності в складних виробничих умовах.

3.4. Комбінована обробка ЕІЛ та парофазне осадження (VPD)

Для багатьох галузей промисловості важливо формувати тверді, зносостійкі покриття на робочих поверхнях деталей у поєднанні з іншими функціональними властивостями (корозійна стійкість, термостійкість, певні триботехнічні властивості тощо). Підвищена твердість зазвичай досягається шляхом формування карбідів, нітридів, боридів, інтерметалідів, МАХ-фаз тощо в покриттях. Досить поширеним методом отримання перелічених фаз є парофазне осадження (CVD, PVD, іонне азотування, магнетронне розпилення тощо) [82–85]. Як підкладки використовуються сплави на основі заліза, міді, титану, нікелю, магнію та композити, такі як тверді сплави [86–88]. Хоча ці методи є перспективними, їх широке використання в промисловості обмежене малою товщиною покриттів, поганою адгезією до підкладки (у більшості випадків), використанням дорогого обладнання, високою вартістю, складністю контролю формування покриття тощо.

Для забезпечення кращої адгезії до підкладки, зменшення пористості та покращення цілісності захисного покриття, отриманого методами парофазного осадження (VPD), зменшення шорсткості та забезпечення високої якості поверхні пропонується використовувати гібридні технології, що складаються з попередньої обробки поверхні методом електроізоляційного напилення (ЕІН).

Тому автори [89] пропонують подвійну обробку, ЕІН, з подальшим плазмовим азотуванням, для забезпечення твердості та зносостійкості алюмінієво-бронзових та чавунних поверхонь. Було показано, що електроізоляція (ЕІЗ) з електродом зі сталі AISI-304 може досягти твердості поверхні 600 HV0.2 (~6000 МПа) на алюмінієво-бронзовій підкладці та 1100 HV0.2 (~11 000 МПа) на чавунній підкладці (Рисунок 14).

					MP. ATm – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Гібридна технологія ЕІЗ з подальшим іонно-плазмовим азотуванням знайшла практичне застосування для формування захисного покриття на шийці підшипника вала або на поверхні напресованої на неї втулки [90]. Було показано, що ЕІЗ з алюмінієвим електродом забезпечує формування алюмінієвого підшару, а подальше азотування сприяє насиченню поверхні азотом та формуванню сприятливої структури та фазового стану. Загартований шар товщиною 300 мкм з максимальною поверхневою мікроструктурою.

Твердість 7700 МПа була отримана на сталі 37Cr4. Для остаточної обробки поверхні шийки вала, до якої пред'являються підвищені вимоги до шорсткості, було проведено послідовність електроізоляційної обробки алюмінієм, поверхневої пластичної деформації (безабразивне ультразвукове оброблення, БУО) та плазмового азотування. Крім того, інтегральна обробка поверхнею (ІПД) перед азотуванням збільшує зону дифузії азотованого шару, що сприяє інтенсифікації процесу азотування.

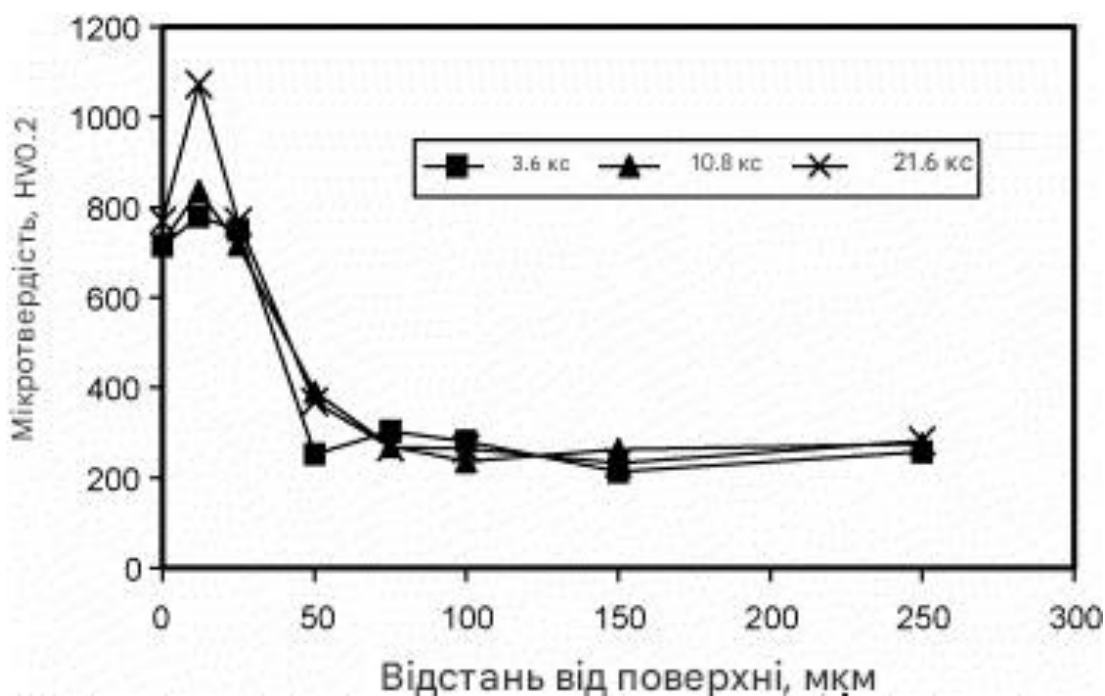


Рисунок 2.14 – Вплив тривалості азотування на мікротвердість зразків чавуну, покритих електроізоляцією (параметри електроізоляції: конденсатор 150 мкФ, напруга 50 В, легуючий електрод: нержавіюча сталь AISI-304 [89].

При азотуванні сталі 37Cr4 після електроізоляції твердосплавним електродом (VK 6) утворюється зміцнений шар з мікротвердістю 10 500 МПа та товщиною 100–

120 мкм [63]. Однак висока шорсткість поверхні $R_a = 3,5$ мкм не дозволяє використовувати ці покриття без додаткової обробки (наприклад, інтегрально-плазмовою обробкою). Для покращення процесу електроізоляції автори пропонують послідовний процес електроізоляції VK8 + Cu + VK8 з подальшим азотуванням. Показано, що мідний підшар сприяє кращій адгезії твердого сплаву та позитивно впливає на шорсткість. Тому для практичного застосування багат шарові покриття електроізоляцією з подальшим іонно-плазмовим покриттям Рекомендуються азотування, які мають задовільну шорсткість $R_a = 0,6$ мкм, 100% суцільність, значну глибину сформованого шару (до 120 мкм) та мікротвердість, яка плавно зменшується з глибиною та досягає 9500 МПа на поверхні на сталі 37Cr4.

Слід зазначити, що для термооброблених деталей під шаром підвищеної твердості після електроізоляції з'являється зона розм'якшення – зона зниженої твердості. Це призводить до продавлювання загартованого шару, що призводить до зносу деталі. Згідно з [91], іонне азотування до або після електроізоляції може усунути зони зниженої твердості, коли використовуються електроди з чистих, твердих, зносостійких металів. Крім того, відбувається поступова зміна твердості загартованого шару та збільшення загальної глибини зони підвищеної твердості.

Після поверхневого гартування шийок підшипників кочення (ПК) (цементация, газове азотування, цементування тощо) можливі відхилення поверхонь від необхідної геометричної форми, та Щоб усунути їх, необхідно видалити частину поверхневого шару [86]. Оскільки твердість загартованого поверхневого шару зменшується зі збільшенням глибини поверхні, найтвердіша частина поверхні видаляється. Якщо знос значний (>1 мм на діаметр), зношені шийки вала розточуються і на них напресовуються втулки. Втулки піддаються поверхневому гартуванню перед використанням. Зовнішня поверхня втулки шліфується до номінального розміру підшипника. Тому після напресування втулки на вал її зовнішній діаметр може зменшитися до 0,3 мм, що призводить до значного зниження твердості її поверхні та необхідності її відновлення. Відновити твердість

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

поверхневого шару пресованої втулки без необхідного попереднього розбирання за допомогою вищезгаданих технологій практично неможливо.

Також рекомендуються комбіновані технології електроізоляційного різання з подальшим плазмовим азотуванням для забезпечення кращої корозійної стійкості. У [92] нанесено покриття з високоентропійного сплаву (НЕА) AlCoCrFeMnNi на поверхню сталі 1045 за допомогою електроізоляційного різання. Було запропоновано метод осадження з подальшим плазмовим азотуванням при 500 °С протягом 8 годин. Автори показали, що, незважаючи на високий вміст пасивуючих речовин Елементи (Al, Cr) у покриттях НЕА, ЕІЛ демонстрували недостатню стійкість в агресивному середовищі через наявність тріщин та високих напружень [93]. Однак подальше азотування значно покращує корозійну стійкість. Це пов'язано, головним чином, з процесами дифузії, що відбуваються під час обробки. Атоми азоту дифундують у покриття, загоюють (заповнюють) тріщини та пори, легують поверхневі шари, спотворюють кристалічну решітку та утворюють азотовмісні фази (Рисунок 15). Крім того, термічна обробка під час азотування зменшує напруження в покритті.

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

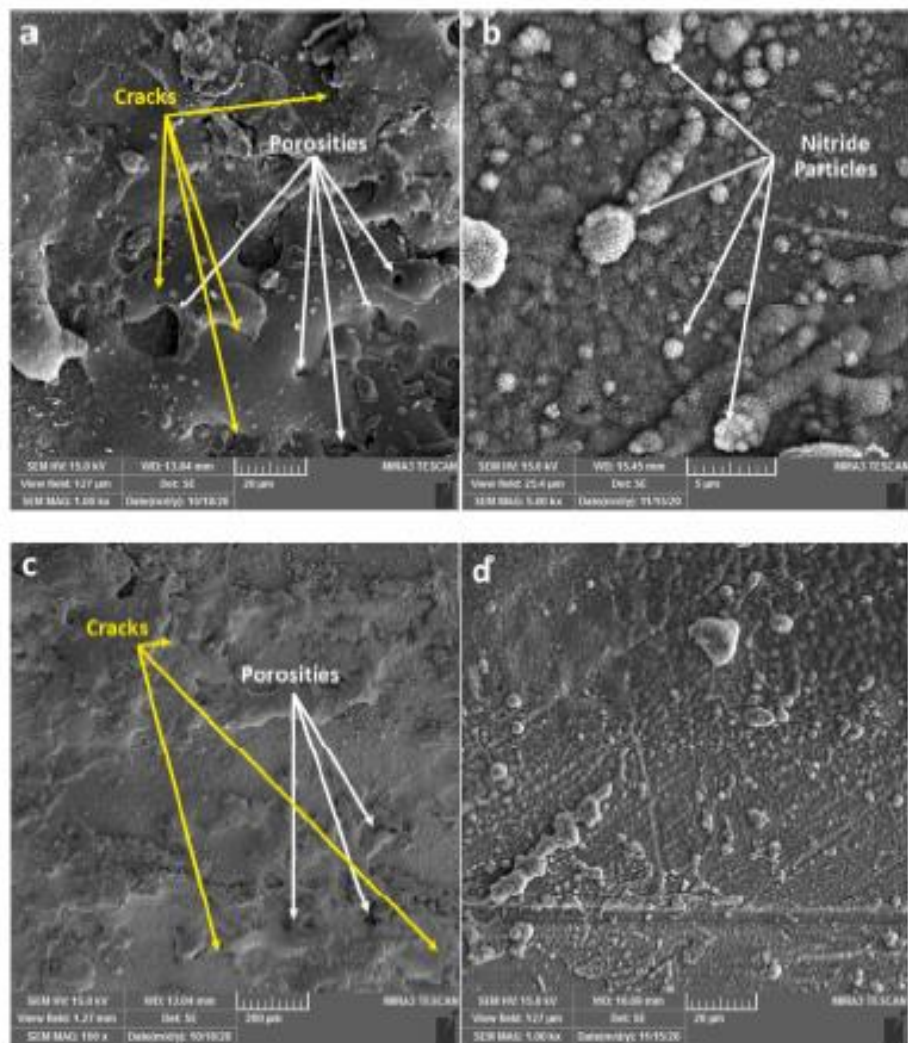


Рисунок 2.15 – Морфологія зразків після електроізоляції (а,с) та після електроізоляції та модифікації плазмовим азотуванням (b,d), що призводить до більш гладкої морфології та закриття мережі поверхневих тріщин.

Підкладка: вуглецева сталь 1045; легуючий електрод: високоентропійний сплав (HEA) AlCoCrFeMnNi; параметри плазмового азотування: 500 °C протягом 8 годин, постійна напруга –600 В [92].

Можливості технології електроізоляції для формування багатошарових функціональних покриттів з покращеним набором характеристик можна значно розширити, поєднавши її з технологією магнетронного розпилення (MS) [94,95]. Відносно велика товщина покриттів, сформованих за допомогою технології електроізоляції + MS, є фундаментальною перевагою гібридної технології та дозволяє заповнити нішу застосування, де товщина класичних вакуумних покриттів недостатня. Підшар електроізоляції призначений, перш за все, для

забезпечення ідеальної адгезії (завдяки локальному плавленню) та великої товщини покриття (до 100 мкм). Водночас, шар ЕІЛ, нанесений за класичною технологією синтезу, може містити елементи підкладки, що обмежує можливості контролю складу та властивостей такого покриття. Верхній шар, сформований за допомогою технології MS та товщиною до 10 мкм, визначає вищі механічні характеристики завдяки відсутності у складі елементів підкладки та можливості включення до складу покриття реакційноздатних газових елементів, азоту та вуглецю [22]. Важливо, що при використанні технологій ЕІЛ та MS можна використовувати вихідні матеріали (електродний інструмент та напилювальну мішень) однакового складу. За допомогою гібридної технології ЕІЛ усуваються дефекти покриття; покращується якість покриттів, а також підвищується продуктивність та ефективність напилення [94].

Тому гібридні технології ЕІЛ з подальшим напиленням з газової фази мають значний потенціал для подальшого розвитку та вдосконалення, дозволяють значно покращити показники покриття та рекомендуються для впровадження у виробництво.

2.5 Промислове застосування гібридних технологій

Гібридні покриття, отримані методом електроіскрового легування, широко використовуються в промисловості завдяки своїм унікальним властивостям, що поєднують високу зносостійкість та корозійну стійкість.

Зокрема, покриття ЕІЛ використовуються в машинобудуванні для відновлення та захисту поверхонь вузлів тертя, таких як вали, шестерні та посадочні місця підшипників. Це значно подовжує термін служби обладнання та знижує витрати на ремонт.

Порівняльний аналіз параметрів покриттів, отриманих за допомогою різних гібридних технологій на основі електроіскрового легування (ЕІЛ), показує помітне покращення функціональних властивостей оброблених поверхонь (див. Таблицю 3). Зокрема, поєднання ЕІЛ з БУО або ЛО може значно зменшити шорсткість поверхні (R_a 0,2–0,8 мкм), зберігаючи або навіть збільшуючи твердість. Це важливо для деталей, що потребують високої зносостійкості та точності. Тим часом

					MP. ATm – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

використання додаткових технологій (МРМ, НІРІМС та іонно-плазмового азотування) впливає не тільки на мікротвердість та товщину шару, але й на морфологію та структуру покриттів (Рисунок 16). Таким чином, результати демонструють широкий спектр можливостей, що пропонуються гібридними технологіями електроізоляційного вібраційного аналізу (ЕІЛ) для регулювання характеристик покриттів, залежно від конкретних виробничих потреб, підкреслюючи їх потенційне застосування в машинобудуванні, енергетиці та аерокосмічній промисловості.

Таблиця 2.3 – Параметри покриттів, отриманих за допомогою ЕІЛ та гібридних технологій на основі ЕІЛ.

Спосіб обробки *	Режими обробки	Матеріали	Параметри покриття		
			Товщина, мкм	Твердість, МПа	Шорсткість, Ra, мкм
ЕІЛ + БУО [59,64]	ЕІЛ: $W_p = 0,6$ Дж; БУО: частота 18–22 кГц, швидкість припрацювання 50 м/хв, швидкість подачі — не більше 0,2 мм/об, кількість проходів — 1	Підкладка – вуглецева сталь з 0,45% С, легуючий електрод – графіт	48	1013	0,9–1,0
			200	974	5,8–6,7
			250	1100	10,0–14,5
	ЕІЛ: $W_p = 2,83$ Дж; БУО: те саме		210	970	0,8
	ЕІЛ: $W_p = 6,8$ Дж;		244	985	0,8

ЕІЛ[96]	Напруга 230 В, конденсатор 300 мкФ, струм 2,1 А, час осадження 2 хв/см ²	Підкладка — вуглецева сталь з 0,45% С, легуючий електрод — сплав WC-Co (95 мас.% WC-5 мас.%Co)	25–35	1013	2,64–3,16
ЕІЛ + ЛО [96]	ЕІЛ: те саме; ЛО: тривалість імпульсу 0,5 мс, частота 45 Гц, хід лазерного променя 0,35 мм, швидкість руху 230 мм/хв		30–40	953	9,87–10,57
ЕІЛ [80]	Стабільно при $W_p = 0,55$ Дж та $W_p = 0,90$ Дж	Підкладка— 12Х18Н10Т, легуючий електрод – твердий сплав Т15К6; МПМ — порошок твердого сплаву ВК6 у двокомпонентній епоксидній системі заповненій феросиліцієм Loctite 3478	50	5000–5400	37
ЕІЛ + МРМ+ ЛО [80]	ЕІЛ: те саме; ЛО: подача 120 мм/хв, напруга 500 В, лазерний імпульс $0,3 \cdot 10^{-3}$ с, частота 50 Гц		40	«Темний» шар 7200	3,3
ЕІЛ + МРМ+ ЛО [80]	ЕІЛ: те саме; ЛТ: живлення 120 мм/хв, напруга 600 В, тривалість лазерного імпульсу $1 \cdot 10^{-3}$ с,		130	«Світлий» шар 4500	–
			420	«Темний» шар 10 000	9,0
		260	«Світлий» шар 7300	–	

	частота 50 Гц				
ЕІЛ [94]	ЕІЛ: струм розряду 120 А, частота імпульсів 3200 Гц, тривалість імпульсу 20 мкс	Підкладка – вуглецева сталь з 0.45% С, легуючий електрод – Сu та твердий сплав VK8; середовище плазмового азотування – суміш аміаку та азоту	6 23	200 ± 400	2,9
ЕІЛ + MS (HIPIMS) [94]	ЕІЛ: те саме; HIPIMS: середня потужність 1 кВт, пікова потужність 50 кВт, піковий струм 50 А, частота 1 кГц, тривалість імпульсу 50 мкс		6÷12	–	5.5
ЕІЛ [59]	ЕФІ: послідовно Сu (струм 0.5–0.6 А; напруга 38.5–56.1 В; ємність 20 мкФ) та твердий сплав VK8 (струм 2.0–2.2 А; напруга 68.7 В; ємність 300 мкФ)	Підкладка — молибден; середовище ЕІЛ–аргон; легуючий електрод–HfSi2–MoSi2–HfB2 кераміка; середовище HIPIMS–аргон	20	7600–9500	0.9
ЕІЛ + іонно-плазмове азотування [59]	ЕФІ: те саме; іонно-плазмове азотування; температура		70	2800–5750	0,6

	520 °C, 12 год.			
--	--------------------	--	--	--

* ЕІЛ — електроіскрове легування; БУО — безабразивна ультразвукова обробка; ЛО — лазерна обробка; МРМ — метало-полімерний матеріал; МS — магнетронне напилення; НІРІМС — потужне імпульсне магнетронне напилення.

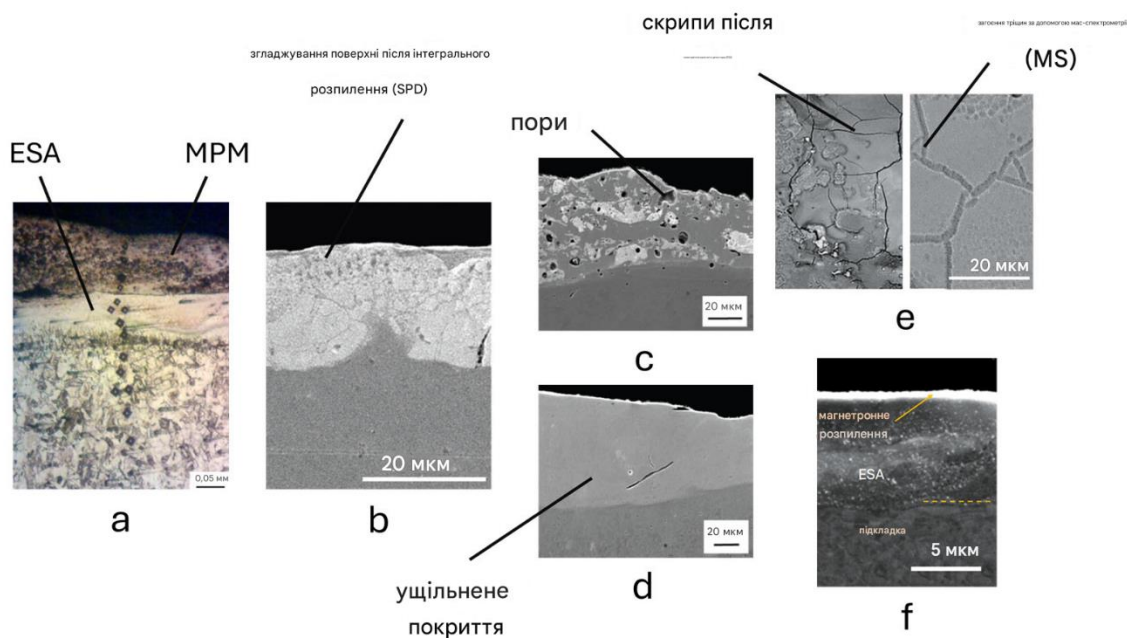


Рисунок 2.16 – Вплив гібридних технологій електроізоляційного напилення (ЕІН) на морфологію та мікроструктуру покриття: (а) ЕІН + металополімерний матеріал з відбитками після випробування на мікротвердість; (б) ЕІН + покриття поверхневої пластичної деформації; (с) покриття ЕІН перед лазерною обробкою; (д) ЕІН + покриття лазерною обробкою; (е) поверхня ЕІН + покриття магнетронним напиленням; (ф) поперечний переріз ЕІН + покриття магнетронним напиленням.

Дослідження [10,59,81] показали, що застосування комбінованих металополімерних матеріалів з подальшою поверхневою пластичною деформацією (ППП) значно покращує якість сталевих деталей, збільшуючи їхню твердість та зносостійкість без суттєвого впливу на металеву основу. Це особливо актуально для обертових компонентів у механічних системах, які працюють під високими навантаженнями та зносом. Прикладами є спіральні та циліндричні поверхні центрифужних гвинтів, що піддаються гідроабразивному зносу, та маточини лопаток повітродувок (Рисунок 17).

Дослідження [14,16,17] підтверджують ефективність гібридних технологій електроіскрового розсіювання (ЕІЛ) у створенні триботехнічних покриттів, що зменшують тертя та покращують термін служби деталей. Використання модифікованих електроіскрових покриттів на основі MoS₂, як описано в [20,42], демонструє потенціал для значного покращення антифрикційних властивостей, що особливо корисно для підшипників та рухомих механізмів у промисловому обладнанні.

Поєднання технології ЕІЛ та лазерного розсіювання (ЛО) є перспективним методом формування гібридних покриттів, які є міцнішими та мають довший термін служби. Такі покриття використовуються в промислових масштабах для захисту робочих поверхонь деталей насосів, підшипників та інструментальних сталей.

Практичні результати, наведені в посиланнях [54, 65, 67], вказують на значне покращення зносостійкості та зменшення тертя в компонентах трибосистем.

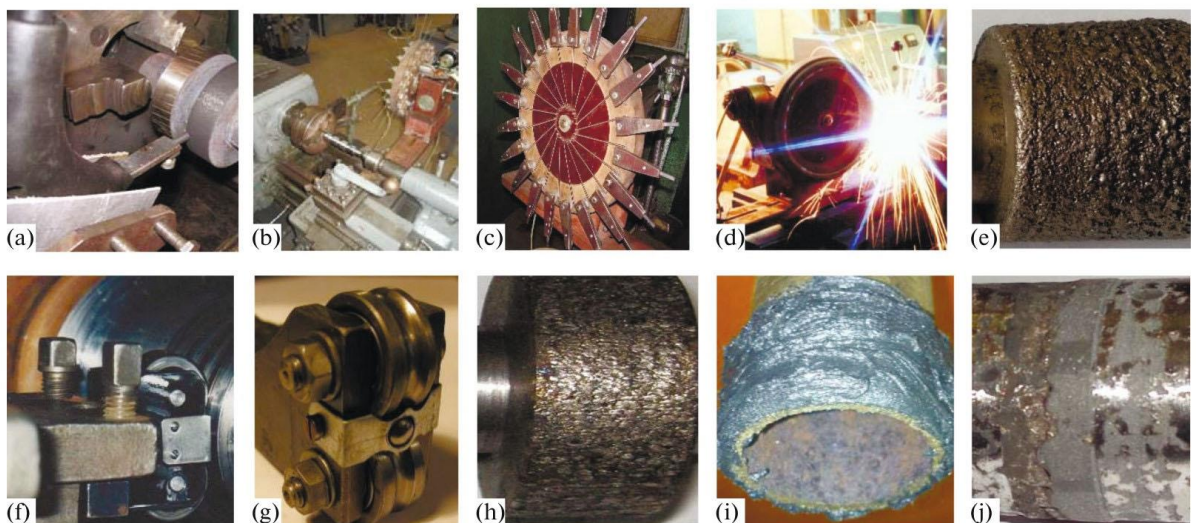


Рисунок 2.17 – Формування комбінованих покриттів на сталі 12X18H10T (AISI 321) методом електроізоляційного розпилення (ЕІР) та механізованої установки в промислових умовах: (а) цементація ЕІР (ЕПЗ), легуючий електрод – графіт; (б) ініціювання ЕІР, легуючий електрод–алюміній; (с) інструмент для кріплення електродів з твердого сплаву; (d) ЕІР з твердим сплавом Т15К6; (е) поверхня зразка з ЕПЗ; (f) кулькове прокатки (КП); (g) інструмент для КП; (h)

поверхня зразка після КП; (i) поверхня зразка з металополімерним матеріалом (МПМ), армованим твердим сплавом ВК6; (j) точена поверхня зразка [10].

Крім того, кілька досліджень [23,27,35,47,49–52,61,96,97] аналізували використання гібридних технологій ЕІР для відновлення та покращення критичних компонентів промислового обладнання.

До них належать відновлення опорних шийок ротора в підшипниках гвинтових компресорів [23], підсилення металевих імпульсних торцевих ущільнень, що працюють під високими динамічними навантаженнями [27,61], відновлення компонентів насоса, що піддаються впливу радіаційного середовища [35], та покращення продуктивності підшипників ковзання у високошвидкісних турбінних компресорах [47] (Рисунок 18). Крім того, застосування електроізоляційного оброблення (ЕІР) для відновлення втулок підшипників ковзання в трибологічно вимогливих системах також продемонструвало суттєві переваги [49–52]. Ці інтегровані підходи до інженерії поверхні можуть значно покращити експлуатаційну надійність деталей в промислових умовах, продовжуючи їхній термін служби та мінімізуючи незаплановані простої та витрати на технічне обслуговування.

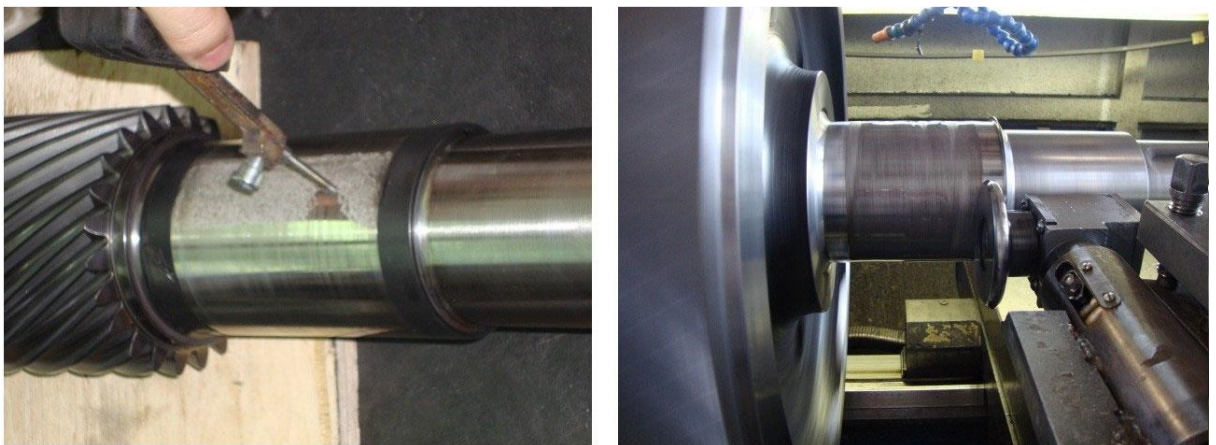


Рисунок 2.18 – Енергоефективне зчеплення (ЕЗЗ) опорних шийок шестерні (а) та опорний шар опорної шийки шестерні (б). Турбокомпресор – це модель GTT-3 виробництва компанії TRIZ LTD [97].

Незважаючи на ефективність гібридних технологій, що поєднують ЕЗЗ з додатковими обробками, такими як лазерні, іонні, плазмові та термохімічні процеси, їх впровадження у великих промислових масштабах залишається

					MP. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

обмеженим через технологічні, економічні та організаційні проблеми. Однією з ключових проблем є відсутність стандартизації технологічних режимів, що обмежує передбачуваність результатів та стабільність характеристик покриття за різних умов експлуатації. Крім того, обмежена інтеграція процесів ЕЗЗ в Сучасні автоматизовані виробничі лінії перешкоджають масштабованості технології для масового виробництва. Обмежені дослідження механізмів формування гібридних структур та їхньої довгострокової поведінки при циклічному навантаженні, корозії та радіаційному впливі були проведені. Це критично важливо для авіаційної, енергетичної та хімічної промисловості. Аналогічно, недостатнє моделювання та цифрова підтримка процесів електрофізичного анодування (EIA) ускладнюють розробку нових складів покриттів із заданими властивостями.

Перспективні напрямки для подальших досліджень включають розробку інтелектуальних систем керування процесами EIA, базованих на машинному навчанні, та створення багатофункціональних наноструктурованих покриттів, які поєднують зносостійкість, термостійкість та антикорозійну стійкість. Також існує інтерес до розробки нових методів EIA з використанням нових класів матеріалів, таких як високоентропійні сплави та нано- та аморфні сплави. Крім того, існує значний інтерес до оцінки впливу на навколишнє середовище та економічної доцільності гібридних технологій порівняно з традиційними методами модифікації поверхні.

Гібридні технології на основі EIA демонструють значний потенціал для покращення сталості та зменшення негативного впливу промислових процесів на навколишнє середовище.

Поєднання електроіскрового фарбування (ESA) з іншими екологічно чистими методами, такими як мас-спектрометрія (MS) або фотоелектричне осаджування (PVD), зменшує споживання ресурсів та енерговитрати у виробничих процесах. Це призводить до скорочення викидів CO₂ та інших забруднюючих речовин, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку та екологічної безпеки, зокрема Цілям 9 (промисловість, інновації та інфраструктура) та 12 (відповідальне

					MP. ATm – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

споживання та виробництво), згідно з Порядком денним сталого розвитку на період до 2030 року.

2.6 Підсумки та перспективи

Формування функціональних покриттів є дуже перспективним підходом до покращення довговічності, твердості та зносостійкості деталей машин та інструментів. Електроіскрове легування (ESA) виявилось перспективним методом модифікації поверхні, що пропонує локалізовану обробку, мінімальний термічний вплив та міцну адгезію покриттів. ESA дозволяє наносити тверді, зносостійкі шари з широкого спектру провідних матеріалів з контрольованими властивостями.

Гібридні (комбіновані) технології обробки поверхні використовуються для покращення якості ESA-покриттів та надання поверхням певних властивостей. Основними комбінованими технологіями є електроіскрове напилення (ESA) з подальшою обробкою поверхні концентрованою енергією та потоками матеріалу (лазерна обробка, іонна імплантація, плазмове осадження тощо) та ESA з подальшою поверхневою пластичною деформацією (SPD). Список також може включати багатошарові (комбіновані) електроіскрові покриття, які можна використовувати для формування поверхневого шару з необхідними властивостями. В огляді підкреслюється, що такі гібридні технології значно покращують властивості поверхні, забезпечуючи індивідуальні мікроструктури, покращену адгезію, збільшення товщини та зменшення шорсткості.

Незважаючи на ці переваги, багатопараметричний характер гібридних обробок ускладнює керування та оптимізацію процесів. Наприклад, поєднання ESA та SPD вимагає подальшого дослідження поведінки напруження-деформації, оптимальних умов навантаження та геометрії індентора. ESA, а потім LT, показали багатообіцяючі результати, зокрема у зміні шорсткості поверхні та структурної однорідності твердих покриттів. Однак, комбінації, що включають парофазне осадження, залишаються недостатньо вивченими.

Ще однією проблемою є відсутність систем управління, які можуть автоматизувати гібридні процеси ESA в режимі реального часу. Для досягнення промислової масштабованості необхідно дослідити стабільність процесу та

					MP. ATm – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

повторюваність результатів, а також можливість інтеграції цифрових технологій. Хоча наразі майже немає літератури про застосування штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН) до гібридних процесів ЕСА, їхній потенціал

Сучасні автоматизовані виробничі лінії перешкоджають масштабованості технології для масового виробництва. Обмежені дослідження механізмів формування гібридних структур та їхньої довгострокової поведінки при циклічному навантаженні, корозії та радіаційному впливі були проведені. Це критично важливо для авіаційної, енергетичної та хімічної промисловості. Аналогічно, недостатнє моделювання та цифрова підтримка процесів електрофізичного анодування (ЕІА) ускладнюють розробку нових складів покриттів із заданими властивостями.

Перспективні напрямки для подальших досліджень включають розробку інтелектуальних систем керування процесами ЕІА, базованих на машинному навчанні, та створення багатофункціональних наноструктурованих покриттів, які поєднують зносостійкість, термостійкість та антикорозійну стійкість. Також існує інтерес до розробки нових методів ЕІА з використанням нових класів матеріалів, таких як високоентропійні сплави та нано- та аморфні сплави. Крім того, існує значний інтерес до оцінки впливу на навколишнє середовище та економічної доцільності гібридних технологій порівняно з традиційними методами модифікації поверхні.

Гібридні технології на основі ЕІА демонструють значний потенціал для покращення сталості та зменшення негативного впливу промислових процесів на навколишнє середовище.

Поєднання електроіскрового фарбування (ЕСА) з іншими екологічно чистими методами, такими як мас-спектрометрія (MS) або фотоелектричне осаджування (PVD), зменшує споживання ресурсів та енерговитрати у виробничих процесах. Це призводить до скорочення викидів CO₂ та інших забруднюючих речовин, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку та екологічної безпеки, зокрема Цілям 9 (промисловість, інновації та інфраструктура) та 12 (відповідальне

					MP. ATm – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

споживання та виробництво), згідно з Порядком денним сталого розвитку на період до 2030 року.

5. Підсумки та перспективи

Формування функціональних покриттів є дуже перспективним підходом до покращення довговічності, твердості та зносостійкості деталей машин та інструментів. Електроіскрове легування (ESA) виявилось перспективним методом модифікації поверхні, що пропонує локалізовану обробку, мінімальний термічний вплив та міцну адгезію покриттів. ESA дозволяє наносити тверді, зносостійкі шари з широкого спектру провідних матеріалів з контрольованими властивостями.

Гібридні (комбіновані) технології обробки поверхні використовуються для покращення якості ESA-покриттів та надання поверхням певних властивостей. Основними комбінованими технологіями є електроіскрове напилення (ESA) з подальшою обробкою поверхні концентрованою енергією та потоками матеріалу (лазерна обробка, іонна імплантація, плазмове осадження тощо) та ESA з подальшою поверхневою пластичною деформацією (SPD). Список також може включати багатошарові (комбіновані) електроіскрові покриття, які можна використовувати для формування поверхневого шару з необхідними властивостями. В огляді підкреслюється, що такі гібридні технології значно покращують властивості поверхні, забезпечуючи індивідуальні мікроструктури, покращену адгезію, збільшення товщини та зменшення шорсткості.

Незважаючи на ці переваги, багатопараметричний характер гібридних обробок ускладнює керування та оптимізацію процесів. Наприклад, поєднання ESA та SPD вимагає подальшого дослідження поведінки напруження-деформації, оптимальних умов навантаження та геометрії індентора. ESA, а потім LT, показали багатообіцяючі результати, зокрема у зміні шорсткості поверхні та структурної однорідності твердих покриттів. Однак, комбінації, що включають парофазне осадження, залишаються недостатньо вивченими.

Ще однією проблемою є відсутність систем управління, які можуть автоматизувати гібридні процеси ESA в режимі реального часу. Для досягнення промислової масштабованості необхідно дослідити стабільність процесу та

					MP. ATm – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

повторюваність результатів, а також можливість інтеграції цифрових технологій. Хоча наразі майже немає літератури про застосування штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН) до гібридних процесів ЕСА, їхній потенціал є важливим. Застосування штучного інтелекту/машинного навчання можуть сприяти інтелектуальному вибору параметрів, прогнозуванню властивостей покриття та забезпечувати адаптивне керування гібридними технологіями.

Висновки до розділу 2

Майбутні дослідження повинні зосередитися на таких аспектах:

- Кількісна оптимізація параметрів гібридної обробки за допомогою експериментально-обчислювальної синергії;
- Розробка фізико-математичних моделей для прогнозування поведінки покриття на основі вхідних даних процесу;
- Застосування машинного навчання для інтелектуального вибору режимів обробки для балансування продуктивності та якості покриття;
- Поглиблені дослідження залишкових напружень, адгезійної міцності та довгострокової продуктивності в експлуатаційних умовах.

Усуваючи ці прогалини в дослідженнях, гібридні технології на основі електромагнітного електричного поля (EIA) можуть бути вдосконалені в високо настроювані рішення для поверхневої інженерії для різних промислових застосувань.

					MP. ATm – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ, ОБРОБЛЕНИХ ЕЛЕКТРОІСКРОВИМ ЛЕГУВАННЯМ ЗА ВИКОРИСТАННЯМ ГРАФІТОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ

3.1 Матеріали та методи

Широкі можливості зміни властивостей сталевих поверхонь в потрібному напрямку відкриваються при використанні графіту в якості анода в процесі електроіскрового легування. Поверхні електродів піддаються локальній дії високих тисків ударної хвилі і температур [22, 23]. При цьому відбувається миттєвий розігрів анода, і крапля або тверда частинка матеріалу анода переміщується до катода. Летючі від анода до катода фрагменти нагріваються до високої температури. Іскровий розряд відбувається в мікроскопічно малих обсягах і триває 50 – 400 мікросекунд. На катоді утворюються лунки і мікрОВИРИВИ, в яких частинки анода і катода взаємодіють між собою і оточуючим середовищем, активізуються дифузійні процеси, що призводить до утворення нових фаз і зміни структури в поверхневому шарі. Наявний науковий доробок в області застосування графіту в електроіскрових технологіях пов'язаний як з дослідженням фазових змін в поверхневих шарах сплавів заліза при електроіскровому легуванні (ЕІЛ) графітом, так і вдосконаленням технології реалізації цього процесу.

Встановлено [24], що при ЕІЛ графітом сплавів заліза формується зміцнений шар, поєднує в'язкий аустеніт і твердий карбід.

Висока швидкість охолодження призводить до формування фазового складу по метастабільній діаграмі з утворенням карбідів і інших метастабільних фаз. Графіт у вільному вигляді в цьому випадку не виділяється. Застосовуючи компактні електроди металів і порошки графіту, феросиліцію або міді, можна отримати в сформованому шарі вільний графіт, який використовується в якості твердої змазки для підвищення експлуатаційних характеристик деталей пар тертя зі сталі, титанових і мідних сплавів [25]. Дослідження механізму формування фаз при електроіскровому науглецьовуванні [26] показали, що процес утворення

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цементитної фази фази (Fe_3C) в поверхневому шарі сталевих зразків відбувається через етапи утворення рідкої фази, її насичення іонами вуглецю і азоту, яку треба буде швидкісний кристалізації з утворенням залишкового аустеніту і нітриду заліза (Fe_4N). для підвищення зносо- і корозійної стійкості мідних деталей в ряді хімічних середовищ їх обробляли методом ЕІЛ алюмінієвим, а потім графітовим електродами [27].

ЕІЛ графітовим електродом не супроводжується збільшенням розмірів деталі, що дає підставу порівнювати його з різновидом хіміко-термічної обробки – цементациєю [28]. Слід зазначити, що при традиційній цементациї (нагрів до температури $900-950^{\circ}C$ і для отримання 1 мм шару – витримка 10 годин в карбюризаторі) необхідно з метою усунення поволок і викривлення зішліфувувати частину поверхневого шару, причому найбільш тверду. Цей метод не завжди дозволяє добитися необхідного результату.

У електроіскрових технологіях графіт також використовують для зменшення шорсткості поверхонь, сформованих попередньою електроіскровою обробкою іншими електродними матеріалами (мідь, срібло, нікель, титан) [29]. Показано, що найбільш ефективний вплив на шорсткість покриттів має ЕІЛ графітом в тому випадку, коли попередня обробка здійснюється електродами з металів, що не утворюють розчини з вуглецем, або карбїду.

Технологія електроіскрового легування металевих поверхонь графітовим електродом і різні технології зниження величини шорсткості сталевих зразків після електроіскрової цементациї (ЕЦ) знаходять застосування при необхідності підвищення зносостійкості і ресурсу роботи деталей технологічного обладнання та інструментів [20-34].

Проведені дослідження і практичний досвід показали перспективність розвитку цього напрямки електроіскрової технології.

Накопичені дані про фазові і структурні перетвореннях в поверхневих шарах сталей і різних металів при електроіскровому легуванні графітом, є відомості про вплив на структуру і властивості технологічних режимів і механічної обробки цементованих поверхонь. Поряд з цим відсутні кількісні дані про вплив

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

енергії розряду на глибину цементації, властивості і шорсткість металевих поверхонь, вплив електроіскрової цементації на міцність сталевих зразків. Необхідно вдосконалювати методи обробки цементованих поверхонь з метою зниження шорсткості і підвищення рівня властивостей.

Мета роботи:

- дослідити вплив енергії розряду і часу легування на глибину цементованого шару, його мікротвердість і шорсткість поверхні;
- встановити найбільш раціональні режими обробки цементованих поверхонь, використовуючи спосіб поетапного електроіскрового легування графітом і метод безабразивної ультразвукової фінішної обробки (БУФО), з метою зниження шорсткості і оптимізації властивостей;
- дослідити вплив електроіскрового цементування на зносостійкість і міцність при розтягуванні сталевих зразків;

3.2 Об'єкти і методи досліджень

Для досягнення необхідних параметрів точності розмірів і шорсткості робочої поверхні деталі після електроіскрового легування графітом необхідне застосування додаткових методів обробки, в якості яких були використані: шліфування абразивними кругами і метод безабразивної ультразвукової фінішної обробки [35]. Останній метод заснований на тому, що в процесі обробки між деформуючим елементом і оброблюваною поверхнею виникає періодичний контакт з частотою ультразвукових коливань. В момент контакту миттєві напруження істотно вище середніх, що викликає значну пластичну деформацію. Так само як і при інших методах поверхневого деформування (вигладжування, обкатування і ін.), Внаслідок обробки зменшується шорсткість поверхні. Досвід показав, що БУФО вирішує проблему напружень розтягу, які виникають при ЕІЛ, компенсуючи їх напруженнями стиску, що виникають в процесі обробки. БУФО здійснювалася на базі токарно-гвинторізного верстата 16К20 з застосуванням магнітострикційного перетворювача ПМС-39 і ультразвукового генератора УЗУ-030.

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Для досліджень використовували спеціальні сталеві зразки у вигляді катушки, що складається з двох дисків діаметром 50 мм і шириною 10 мм, з'єднаних між собою проміжними валиками діаметром 15 мм, які мали дві технологічні ділянки такого ж діаметру для закріплення в патроні при обробці. Поверхні дисків перед електроіскровою цементацією шліфували до $R_a = 0,5$ мкм. Зразки закріплювали в патроні токарного верстата, після чого проводилися ЕЦ в автоматизованому режимі і обробка БУФО (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – БУФО сталевого зразка після електроіскрової цементації.

При проведенні досліджень використовували зразки з сталей 40Х, 38ХМЮА, 40ХН2МЮА, 30Х13, АРМКО-заліза і 12Х18Н10Т і плоскі зразки зі сталі 20 розміром 15x15x6 мм.

Як електрод застосовувався графіт марки ЕГ-4. ЕЦ проводилася на установках «Елітрон-24А» способом поетапної ЕЦ з метою зниження шорсткості. Енергія розряду в знаходилась в діапазоні 0,1 – 6,8 Дж.

Металографічні дослідження шліфів поверхневого шару зразків в перерізі проводили на оптичному мікроскопі «Неофот-21».

Вимірювали мікротвердість на мікротвердомірі ПМТ-3 вдавненням алмазної піраміди під навантаженням 0,5 Н.

Глибину цементації (h) визначали металографічним методом як відстань від поверхні виробу до середини перехідної зони.

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Зазвичай перехідна зона – це доевтектоїдна зона, де в структурі є однакові обсяги фериту і перліту. Час ЕЦ зразків становила 5 хв / см^2 .

Проведені експерименти показали, що зростання глибини зміцненого шару після 5 хвилин ЕЦ різко сповільнюється (рис. 1.5). При енергії розряду 0,5 Дж зміцнений шар в основному формувався протягом однієї хвилини.

Оптимальний час ЕЦ одиниці площі зразка при поетапній обробці з метою зниження шорсткості визначали досвідченим шляхом, виходячи зі ступеня пошкоджуваності оброблюваної поверхні (табл. 6.4). При більшому часі обробки шорсткість практично не змінювалася.

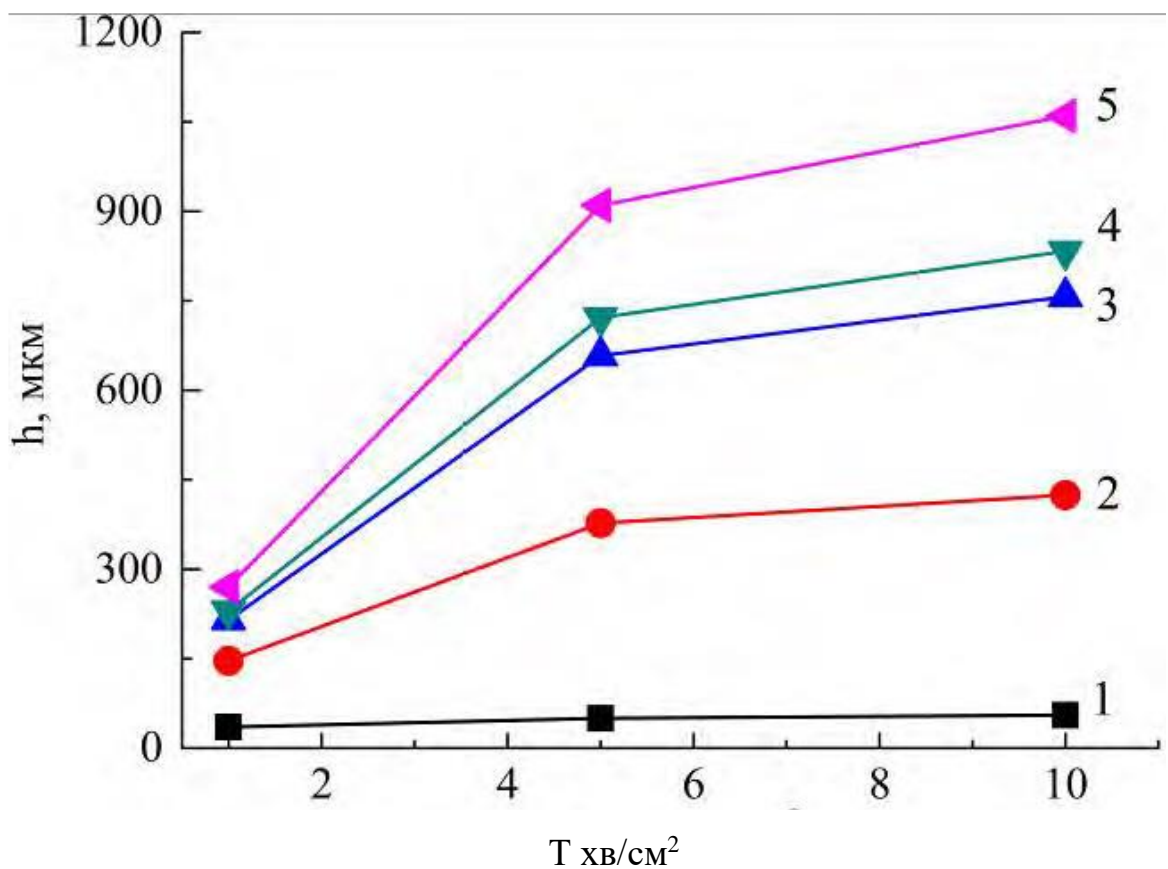


Рисунок 3.5 – Залежність глибини зміцненого шару від часу легування графітом сталі 40Х при енергії розряду 0,5 (1), 1,41 (2), 2,83 (3), 3,4 (4) і 6,8 Дж (5).

Режими ЕЦ і застосовувані методи послідууючої обробки поверхні наведені при викладі результатів досліджень.

Для апробації інтегрованої технології зміцнення сталевих деталей ЕЦ і БУФО проводили порівняльні випробування на зносостійкість з метою заміни

технології виготовлення захисної втулки масляних ущільнень з монель-металу, які застосовуються в центробіжних компресорах. Випробування на зносо

стійкість проходили на машині тертя 2168 УМТ за схемою «кільце-плоский зразок» [36]. Кільця виготовлялися з сталей 40Х і 12Х18Н10Т і монель-металу з покриттям за стандартною технологією. Як контртіла використовувався прямокутний зразок з твердого сплаву Т15К6 з шорсткістю робочої поверхні $R_a = 1,6$ мкм. Випробування проводилися в умовах обмеженого змащування. Як мастила використовувалося масло індустріальне І20.

Оцінка зносостійкості виконувалася по лінійні ному зносу поверхні зразків. Для оцінки зносостійкості використовувався метод штучних баз по ГОСТ 16524-72. Швидкість ковзання становила $V = 0,8$ м/с, навантаження – 10 МПа, тривалість випробувань – 9 годин, що відповідає шляху тертя 26 км.

На всіх етапах досліджень вимірювалася шорсткість поверхні на приладі профілографі - профілометрі мод. 201 заводу «Калібр», модернізованому таким чином, що результати через спеціальний пристрій передавалися на комп'ютер.

Статичні випробування на розтягнення зразків (діаметром 10 і робочою довжиною 50) до і після ЕЦ проведені за стандартною методикою у відповідності до ГОСТ 1497-84.

Таблиця 3.1 – Час ЕЦ в залежності від енергії розряду

Енергія розряду, Дж	0,1	0,31	0,53	0,9	2,83	3,4	6,8
Продуктивність ЕЦ, хв / см ²	2,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5



(а)



(б)



(в)

Рисунок 3.6 – Вид поперечного перерізу зразків із сталей 38ХМЮА (а) і 40Х (б, в) після ЕЦ. Час обробки – 1 хв / см²: (А) - Wp = 0,9 Дж, x200; (Б) – Wp = 0,60 Дж, x200; (В) – Wp = 2,60 Дж, x250.

Результати досліджень

Ефективність використання поверхнево зміцнених деталей пов'язана як з показниками геометричних характеристик поверхні (шорсткість, хвилястість), оскільки більшість руйнувань починається на поверхні, так і властивостями приповерхневого і зміцненого шару. При проведенні досліджень основними параметрами оцінки якості поверхневого шару після електроіскровий цементації були: товщина цементованого шару, його мікротвердість і структура, шорсткість поверхні. Одночасно вивчали структуру і твердість серцевини сталевих зразків.

Досліди показали, що з збільшенням часу обробки і енергії розряду товщина цементованих шарів зростає, а структура матеріалу основи залишається незмінною (рис. 3.6).

У структурі зразків можна виділити три характерні зони: цементовий («білий») шар, перехідну зону з дрібнодисперсним зерном і зону основного металу. Чим ближче до поверхні, тим вище мікротвердість в приповерхневому шарі. Мікротвердість на поверхні становить для сталей 38ХМЮА і 40ХН2МЮА 1350 і 760 НV відповідно (рис. 1.6). У міру поглиблення мікротвердість знижується і плавно переходить в твердість основи відповідно 225 і 250 НV. Зниження твердості на поверхні цементованих зразків пов'язано з гетерогенним будовою зміцненого шару, присутністю на поверхні тонкої трооститной (дисперсної суміші фериту і цементиту) смуги або сітки. Товщина трооститной смуги становить 50-60 мкм.

Після БУФО така смуга, як правило, відсутня. Досліди показали, що при ЕЦ стали 20 трооститной смуги немає.

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

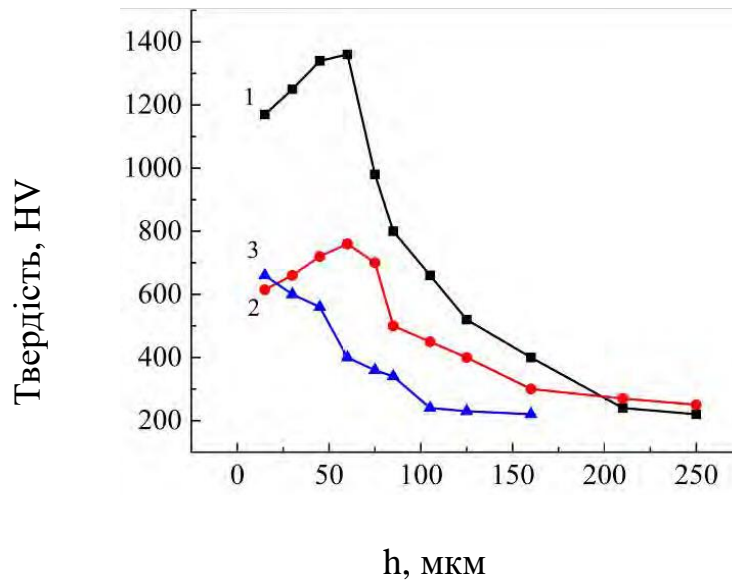
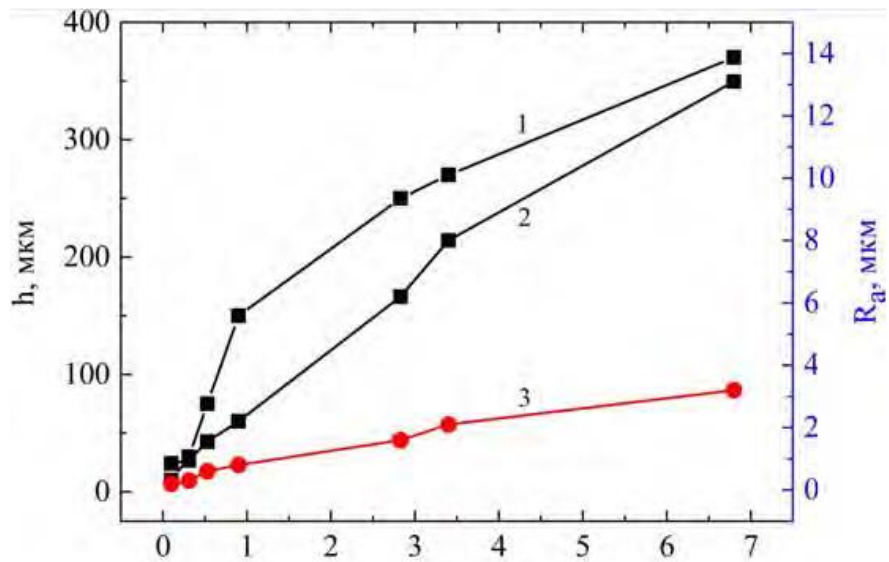


Рисунок 3.7 – Розподіл мікротвердості HV в цементованому шарі сталі 38ХМЮА (1) і сталі 40ХН2МЮА (2) після ЕЦ ($W_p = 0,9$ Дж, 5 хв / $см^2$) і сталі 40Х після поетапної цементації ($W_p = 2,83$ і $0,9$ Дж, 5 і 2 хв / $см^2$ відповідно) і обробки БУФО (3).

Встановлено, що при цементації сталевих поверхонь електроіскровим легуванням товщина зміцненого шару зі збільшенням енергії розряду і часу легування збільшується. При цьому зростає і шорсткість

поверхні (рис. 1.7). Максимальна мікротвердість на поверхні сталі 38ХМЮА змінюється в межах 900 – 1010 МПа.

Результати досліджень загальної товщини шару підвищеної твердості, максимальної мікротвердості на поверхні і шорсткої після ЕЦ, БУФО і шліфування сталей 40Х і 12Х18Н10Т наведені в табл. 3.5.



Енергія розряду, Дж

Рисунок 3.8 – Залежність від енергії розряду товщини цементованого шару h (1), шорсткості поверхні R_a після ЕЦ (2) і після ЕЦ і Буфо (3) сталі 38ХМЮА.

Таблиця 3.2 – Глибина шару, мікротвердість і шорсткість поверхонь зразків із сталей 40Х і 12Х18Н10Т після електроіскровий цементації при використанні без абразивна ультразвукова фінішна обробка (буфо) БУФО і шліфування

Енергія розряду, Дж	Метод обробки зразка	Глибина шару після обробки, мкм		Мікротвердість, HV		Шорсткість R_a , мкм	
		40Х	12Х18Н10Т	40Х	12Х18Н10Т	40Х	12Х18Н10Т
0,6	ЕЦ + БУФО	50	50	980	880	0,2	0,2
	ЕЦ + БУФО + ШЛ	40	48	920	841	0,6	0,6
	ЕЦ + ШЛ	10	18	780	723	0,6	0,6

	ЕЦ	50	48	987	1013	0,8- 0,9	0,9-1,0
2,83	ЕЦ + БУФО	657	210	920	970	0,8	0,8
	ЕЦ + БУФО + ШЛ	635	195	895	950	0,8	0,8
	ЕЦ + ШЛ	580	130	770	790	0,8	0,8
	ЕЦ	658	200	1000	974	5,6- 6,5	5,8-6,7
6,8	ЕЦ + БУФО	908	244	854	985	0,8	0,8
	ЕЦ + БУФО + ШЛ	895	220	840	875	0,8	0,8
	ЕЦ + ШЛ	856	110	824	670	0,8	0,8
	ЕЦ	910	250	1050	1100	11,9- 14,1	10,0-14,5

Дослідження показали, що глибина цементованого шару і його мікротвердість при однакових технологічних режимах у різних марок сталей істотно відрізняються. Була проведена серія дослідів зі сталями різних складів. На рис. 1.6 наведені результати вимірювання глибини зміцненого шару при ЕЦ в

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

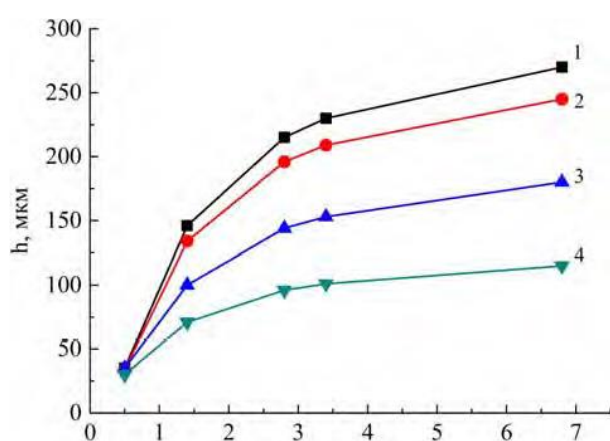
Протягом 1 і 5 хв / см² підкладок з АРМКО-заліза і ряду сталей при різних значеннях енергії розряду.

Досліди показали, що існує чітка залежність: товщина цементованого шару тим більше, ніж більший вміст вуглецю в сталі. Глибина цементування у сталей 40Х і 30Х13 із середнім вмістом вуглецю в початковому стані, близьким 0,3 – 0,4%, істотно більше, ніж у АРМКО-заліза і сталі 12Х18Н10Т, що містить до 0,12% вуглецю. Чим більше енергія розряду, тим ця різниця більш значна. При ЕЦ сталей 40Х і 12Х18Н10Т протягом 5 хв / см² з енергією розряду 6,8 Дж різниця товщини зміцнених шарів досягає 660 мкм.

Спосіб поетапної ЕЦ.

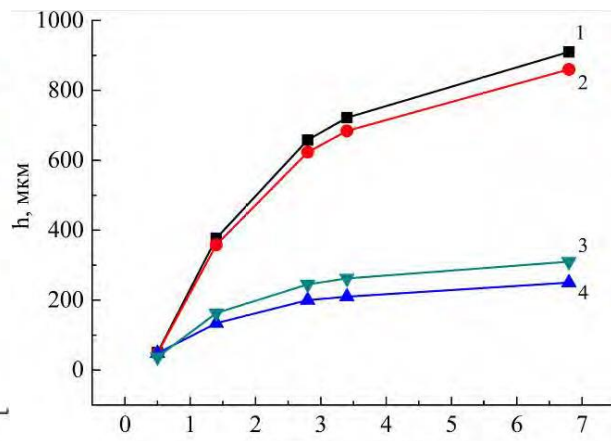
Незважаючи на те, що обробка БУФО сталейних поверхонь після електроіскрового легування графітовим електродом значно знижує шорсткість, для багатьох деталей машин це є недостатнім. Застосування після ЕЦ шліфування не є можливим, так як в даному випадку видаляється як мінімум 50 – 100 мкм поверхневого шару з найбільшою твердістю. Є дані, що для зниження шорсткості електроіскрового покриття досить як заключну операції провести «м'яке» легування графітом. Вигладжування відбувається як за рахунок нагрівання і розм'якшення гребінців під дією розпеченого графітового електрода, так і викиду металу катода і руйнування виступаючих частин поверхні в місцях прикладання імпульсів.

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Енергія розряду, Дж

а)



Енергія розряду, Дж

б)

Рисунок 3.7 – Залежність товщини цементованого шару h від енергії розряду після ЕЦ поверхні протягом 1 (а) та 5 (б) хв / см^2 сталей 40Х (1), 30Х13 (2), АРМКО-заліза (3) і сталі 12Х18Н10Т (4).

Досвід показав, що «м'яке» легування графітом не завжди в достатній мірі знижує шорсткість поверхні. Була використана технологія електроіскрового легування поверхні зразка після цементації тим же графітовим електродом, що і цементація, але поетапно, при цьому на кожному наступному етапі енергія іскрового розряду знижувалася [30, 31]. На кожному черговому етапі виконувалося електроіскрове легування графітовим електродом з такою енергією розряду, при якій формується поверхня з шорсткістю в 2 – 3 рази нижче, ніж на попередньому етапі.

Час легування, визначений дослідним шляхом, в залежності від величини енергії розряду змінювалося в діапазоні 0,5 – 2 хв / см^2 (табл. 6.5). Збільшення часу легування не сприяє зниженню величини шорсткості поверхні.

Так, наприклад, після ЕЦ сталі 38ХМЮА при енергії розряду 2,83 Дж шорсткість поверхні складає $R_a = 5,7 - 6,9$ мкм. Після ЕІЛ графітовим електродом з $T = 2$ хв / см^2 при режимі з енергією розряду 0,9 Дж шорсткість поверхні становить $R_a = 1,7 - 2,2$ мкм. Наступним поетапним легуванням можна отримати $R_a = 1,1 - 1,2$ мкм.

Для того щоб максимально знизити шорсткість поверхні, наприклад сталі

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

38ХМЮА, після ЕЦ з енергією розряду 6,8 Дж, яка становить $R_a = 11,9 - 14,0$ мкм, необхідно:

- на першому етапі провести ЕІЛ графітом при $W_p = 2,83$ Дж, тобто з енергією розряду, яка забезпечує зниження величини шорсткості \sim в 2 рази (з 11,9 – 14,0 до 6,3 – 6,9 мкм). Час ЕІЛ 0,5 хв / cm^2 ;

- на другому етапі провести ЕІЛ графітом при $W_p = 0,9$ Дж, тобто з енергією розряду, яка забезпечує зниження величини шорсткості \sim в 3 рази (з 6,3 – 6,9 до 1,7 – 2,1 мкм). Час ЕІЛ 2 хв / cm^2 ;

- на третьому етапі зробити ЕІЛ графітом при $W_p = 0,1$ Дж, тобто з енергією розряду, яка забезпечує зниження величини шорсткості \sim в 2 рази (з 1,7 – 2,1 до 0,8 – 0,9 мкм). Час ЕІЛ 2 хв / cm^2 .

Поетапне ЕІЛ графітом цементованого шару стали 38ХМЮА дозволило знизити шорсткість поверхні зі значень $R_a = 11,9 - 14,0$ мкм до 0,8 – 0,9 мкм.

Слід зазначити, що одноетапне ЕІЛ графітовим електродом з метою зниження шорсткості поверхні після ЕЦ на будь-якому режимі не дозволяє досягти аналогічних результатів.

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

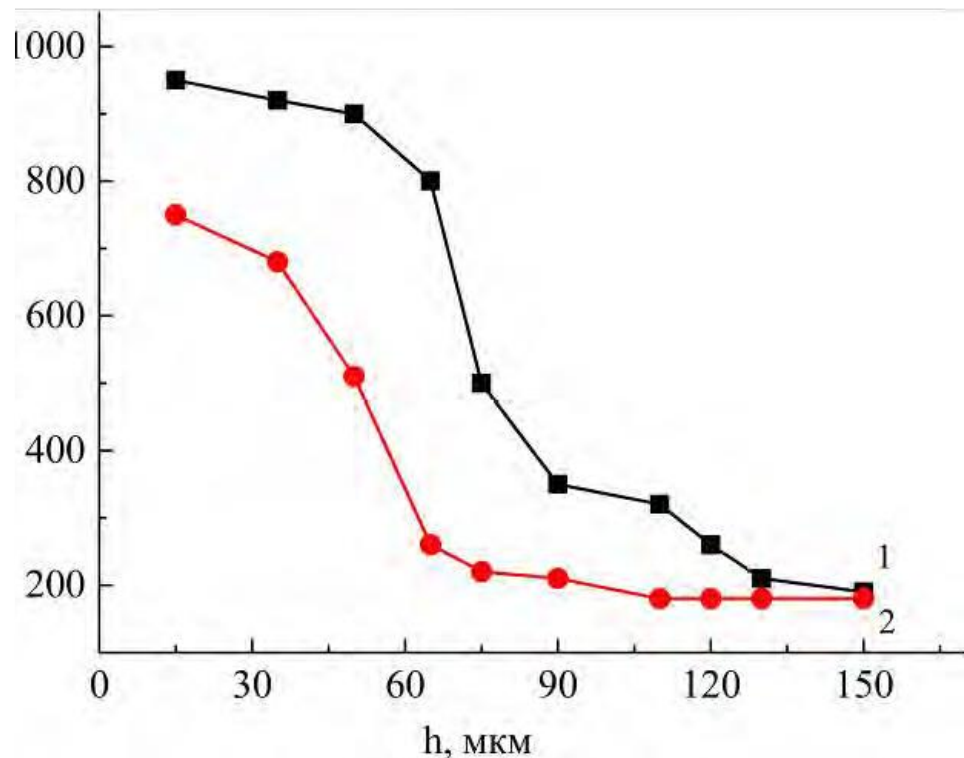


Рисунок 6.98 – Розподіл мікротвердості HV по глибині цементованого шару сталі 20 після ЕЦ при $W_p = 2,83$ Дж (1) і після поетапного ЕЦ при $W_p = 2,83; 0,9$ і $0,1$ Дж (2).

Аналізуючи розподіл мікротвердості в зразках зі сталі 20 після ЕЦ при $W_p = 2,83$ Дж і поетапній ЕЦ при $W_p = 2,83; 0,9$ і $0,1$ Дж (Рис. 6.9), можна сказати, що в обох випадках найбільша мікротвердість зміцненого шару розташована ближче до поверхні. Для першого зразка вона становить $920 - 950$ HV при глибині поширення до 60 мкм, а для другого зразка – $690 - 720$ HV при глибині 30 мкм. Зі збільшенням глибини для обох зразків величина мікротвердості плавно знижується, і на глибині 130 і 100 мкм відповідає мікротвердості основи – 180 HV. Зменшення товщини і мікротвердості зміцненого шару для зразка з поетапним ЕЦ можна пояснити як впливом ударної дії нагрітого до високої температури графітового електрода, так і незначною ерозією підкладки. Раніше було показано [38], що механічний ударний вплив на цементовий шар призводить до подрібнення карбідів і перерозподілу вуглецю в поверхневому шарі товщиною $30 - 40$ мкм.

Таким чином, в результаті поетапної ЕЦ для сталі 20:

- знижується шорсткість поверхневого шару з $R_a = 4,79$ до $R_a = 1,10$ мкм і з $R_z = 13,62$ до $R_z = 3,14$ мкм;

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

- знижується мікротвердість в «білому» шарі з 920 – 950 HV до 690 – 720 HV;
- знижується зі 130 до 100 мкм загальна глибина зони підвищеної твердості поверхневого шару.

Влив ЕЦ і БУФО на міцність

Доцільність застосування методик нанесення зміцнюючих захисних покриттів в значною мірою визначається величиною, знаком і характером розподілу залишкових технологічних напружень в поверхневих шарах системи «основа-покриття». Покриття, незалежно від способу його отримання, завжди впливає на механічні властивості матеріалу [39].

Надійність захисту і зміцнення виробів при експлуатації, зносостійкість конструкційних матеріалів з покриттям багато в чому визначають статична і циклічна міцності виробів з покриттям. У зв'язку з цим дослідження впливу ЕЦ на міцність при розтязі, границя плинності, відносне подовження і звуження сталевих зразків є актуальною науковою задачею. Було встановлено, що зміцнення зразків методом ЕЦ призводить до збільшення в 1,1 рази межі міцності при розтягуванні і в 1,04 рази межі текучості для зразків зі сталі 40Х; в 1,04 і відповідно в 1,06 рази для зразків зі сталі 12Х18Н10Т.

Застосування додатково БУФО збільшує границю міцності при розтягуванні досліджуваних матеріалів в 1,22 рази для зразків з сталі 40Х і в 1,7 рази - для зразків зі сталі 12Х18Н10Т.

Електроіскрова обробка сталевий поверхонь графітом призводить до появи в системі «покриття-основа» термічних напружень.

Величина і знак напружень залежать від співвідношення коефіцієнтів термічного розширення фаз, які формують покриття, і стали, а також температурних інтервалів реалізації технологічного процесу. Отримані дані відбивають вплив залишкових технологічних напружень, що діють в поверхневих шарах і формованих в процесі ЕЦ, на зміні характеристик статичної міцності конструкційних матеріалів. Представлені значення міцності при розтягуванні свідчать про те, що величина і знак напружень в цементованому шарі сприяють підвищенню міцності сталевих зразків після ЕЦ.

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до розділу 3

1. Встановлено закономірності та отримані кількісні дані про вплив часу обробки і енергії розряду при електроіскровому легуванні сталевих поверхонь графітом на товщину, мікротвердість і шорсткість цементованих шарів. товщина зміцненого шару зі збільшенням енергії розряду і часу легування зростає, досягаючи для сталі 40Х 0,9 мм при мікротвердості 1100 НV.

2. Показано, що глибина цементованого шару і його мікротвердість при однакових технологічних режимах у різних марок сталей істотно відрізняються. Глибина ЕЦ тим більше, чим більший вміст вуглецю в сталі в початковому стані. Чим більше енергія розряду, тим ця різниця значніша.

3. Дослідження підтвердили ефективність застосування для зниження шорсткості технології поетапного електроіскрового легування графітовим електродом поверхні зразка після цементації. На кожному наступному етапі енергія іскрового розряду знижувалася.

Поетапне ЕІЛ графітом цементованого шару сталі 38ХМЮА дозволило знизити шорсткість поверхні зі значень $R_a = 11,9 - 14,0$ мкм до $0,8 - 0,9$ мкм.

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ПРАЦІ

4.1 Розрахунок вентиляції в шиномонтажній дільниці транспортного відділення ТОВ «Памбіро»

4.1 Розрахунок необхідної питомої кількості повітря при нормальному мікрокліматі, обчислюємо за формулою:

$$V_{num} = \frac{V}{n} \text{ м}^3 / \text{чол}, \quad (4.1)$$

де V – об'єм дільниці, м^3 ;

$$V = S \cdot H \text{ м}^3;$$

S – площа приміщення, м^2 ;

$$S = 81 \text{ м}^2;$$

H – висота приміщення;

$$H = 6 \text{ м};$$

n – кількість робітників на дільниці, чол;

$$n = 1 \text{ чол.}$$

$$V_{num} = \frac{81 \cdot 6}{1} = 486 \text{ м}^3 / \text{чол.}$$

Отже $V_{\text{ндо}} \geq 20 \text{ л}^3$ то на одну людину потрібно кількість повітря $L \text{ м}^3/\text{год}$

$$L \geq V_{num} \cdot n = 20 \cdot 1 = 20 \text{ м}^3 / \text{год},$$

$$L \geq 20 \text{ м}^3 / \text{год}.$$

4.2 Надлишок кількості тепла, що виділяється на дільниці:

- Тепло, що виділяється на дільниці від світильників $Q_{T.св.с}$ обчислюємо за формулою:

$$Q_T = 1000 \cdot N \cdot \eta, \text{ Вт}, \quad (4.2)$$

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де N – потужність ламп освітлення, Вт, $N=0,360$ Вт;

η – коефіцієнт переходу електричної енергії в теплову, $\eta = 0,95$;

$$Q_1 = 1000 \cdot 0,36 \cdot 0,95 = 342 \text{ Вт.}$$

- Тепло, що виділяється організмом людини визначається:

$$Q_2 = q \cdot n, \text{ Вт,} \quad (4.3)$$

де q – тепло, що виділяється організмом однієї людини, Вт;

$$Q_2 = 200 \cdot 1 = 200 \text{ Вт.}$$

Тепло, що виділяється при роботі обладнання визначаємо за формулою:

$$Q_3 = 1000 \cdot N \cdot \eta, \text{ Вт,} \quad (4.4)$$

де N – номінальна потужність електрообладнання;

$$N = N_1 + N_2, \text{ кВт;}$$

N_1 – номінальна потужність двигунів;

N_2 – номінальна потужність нагрівача;

η – коефіцієнт загальний при роботі без охолоджувачів, дорівнює $\eta = 0,25$.

$$Q_3 = 1000 \cdot 36 \cdot 0,25 = 9000, \text{ Вт.}$$

Тепло від сонячної радіації визначається за формулою:

$$Q_4 = F_{\text{в}} \cdot q_{\text{ост.}} \cdot A_{\text{ост.}}, \text{ Вт,} \quad (4.5)$$

де $F_{\text{в}}$ – площа вікон;

$q_{\text{ост.}}$ – тепlopоступлення від сонячної радіації через 1 м^2 скла, $q_{\text{ост.}} = 75 \text{ Вт/м}^2$;

$A_{\text{ост.}}$ – коефіцієнт, який залежить від характеру застосування і сонцезахисних властивостей $A_{\text{ост.}} = 1,45$ Вт.

$$Q_4 = 5,4 \cdot 75 \cdot 1,45 = 587,25, \text{ Вт.}$$

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сумарна кількість тепла обчислюється за формулою:

$$\sum Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 342 + 200 + 9000 + 587,25 = 10129,45, \text{ Вт.} \quad (4.6)$$

6.3.3 Кількість повітря, яке необхідне для видалення тепла з дільниці визначається:

$$L = \frac{3,6 \cdot \sum Q}{c \cdot \rho (t_a - t_{id})}, \text{ м}^3/\text{ГОД} \quad (4.7)$$

де c – питома теплоємність повітря, кДж/м^3 , $c=1 \text{ кДж/м}^3$;

ρ – густина повітря, кг/м^3 $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$;

t_a – температура повітря, $^{\circ}\text{C}$;

$$t_a = t_{p.z} + k(H - 2), \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (4.8)$$

де $t_{p.z}$ – температура робочої зони $^{\circ}\text{C}$, $t_{p.z} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

k – коефіцієнт, що враховує збільшення температури по висоті, $k=1,5$;

t_{id} – температура приточного повітря $^{\circ}\text{C}$, $t_{np} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$t_a = 23 + 1,5 \cdot (18 - 2) = 29, \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$L = \frac{3,6 \cdot 10129,25}{1 \cdot 1,2 \cdot (29 - 18)} = 2762,52 \text{ м}^3/\text{ГОД}.$$

6.3.4 Кратність повітребміну визначаємо за формулою:

$$K = \frac{L}{V} = \frac{2762,52}{486} = 5,68.$$

6.3.5 Швидкість повітря в повітрепроводі приймаємо $v = 5 \text{ м/с}$.

6.3.6 Повітря подається через 6 розподільвачів, тому розхід кожного з розподільвачів визначається за формулою:

$$L_{pi} = \frac{L_a}{6} = \frac{5200}{6} = 916,67 \text{ м}^3/\text{ГОД}. \quad (4.9)$$

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6.3.7 Визначаємо площу поперечного перерізу трубопровода S , м² обчислюємо за формулою:

$$S = \frac{L_{pi}}{v_n} = \frac{916,67}{5 \cdot 3600} = 0,051 \text{ м}^2. \quad (4.10)$$

6.3.8 Визначаємо опір сітки найдовшої магістралі обчислюємо за формулою:

$$\Delta P_M = \sum_{i=1}^n \Delta P_i, \text{ Па} \quad (4.11)$$

де l – довжина трубопроводів, $l_1=10$ м, $l_{2,3}=8$ м, $l_{4,5}=6$ м, $l_6=4$ м.

ΔP_i – опір сітки на ділянка трубопровода;

$$\Delta P_i = \Delta P_{imm} + \Delta P_{имм}, \text{ Па}, \quad (4.12)$$

ΔP_{idd} – втрати на тертя, Па;

ΔP_{iii} – втрати в місцевих опорах;

$$\Delta P_i = \Delta P_{mp} \cdot l, \text{ Па}, \quad (4.13)$$

де ΔP_{dd} – втрата тиску на одиницю довжини лінії.

Результати розрахунку заносимо в таблицю 6.5.

Таблиця 4.1 – Розрахунок загального опору сітки

L, м ³ /год	l _i , м	ΔP _{імо} , Па	ΔP _{трі} , Па	∑ξ	ΔP _i , Па	V _п , м/с
916,67	10	28,5	16,8	1,9	45,3	5
916,67	8	33,6	19,7	1,5	53,3	6,1
916,67	8	33,6	19,7	1,5	53,3	6,1
916,67	6	66,9	12,9	2,2	79,8	7,1
916,67	6	66,9	12,9	2,2	79,8	7,1
916,67	4	77,8	6,2	3,8	84	5,8
	Всього				395,5	

Втрати тиску на одиницю довжини ΔP_{dd} , Па, обчислюємо за формулою:

$$\Delta P_{mp} = \lambda \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{v_n^2}{2} \cdot \rho, \text{ Па}, \quad (4.14)$$

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

де d – діаметр трубопроводу, м;

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\Pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,051}{3,14}} = 0,25 \text{ м.}$$

λ – коефіцієнт тертя;

$$\lambda = \frac{0,1266}{(\text{Re})^{116}}, \quad (4.15)$$

де – число Рейнольдса;

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{5 \cdot 0,25}{15 \cdot 10^{-6}} = 8 \cdot 10^4. \quad (4.16)$$

$$\lambda = \frac{0,1266}{(8 \cdot 10^{-4})^{116}} = 0,028.$$

Витрати тиску на найдовшій лінії по тертю $\Delta P_{\text{од}}$, Па:

$$\Delta P_{\text{од}} = 1,68 \cdot 10 = 16,8 \text{ Па.}$$

Втрати тиску на місцевих опорах:

$$\Delta P_{\text{мі}} = \sum \xi \frac{v^2 \cdot \rho}{2}, \quad (4.17)$$

$\sum \xi$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів на даній ділянці повітрепроводу на лінії 1. Інші опори показані в таблиці 6.5.

$\xi_1 = 1,4$ – місцевий розподілювач;

$\xi_2 = 0,4$ – відвід на 90° , $R/d=1,5$;

$\xi_3 = 0,1$ – трійник.

$$\sum \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 1,4 + 0,4 + 0,1 = 1,9, \quad (4.18)$$

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta P_{iii} = \frac{19,5^2 \cdot 1,2}{2} = 28,5 \text{ Па.}$$

Для інших ліній проводимо обчислення за формулами 5.12...5.18, результати обчислень заносимо в таблицю 6.6.

Таблиця 4.2 – Коефіцієнти місцевих опорів

Елементи повітрепроводу	ξ
Повітряний розподільувач	1,4
Відвід	0,4
Трійник	0,1
Трійник на проході	0,9
Трійник на проході і два відводи	0,8
Відвід. Дифузор для вентилятора	0,8
Повітрерозподільувач	2,4
Трійник на розгалуженні	3

Схема вентиляції мережі показана на рисунку 4.1

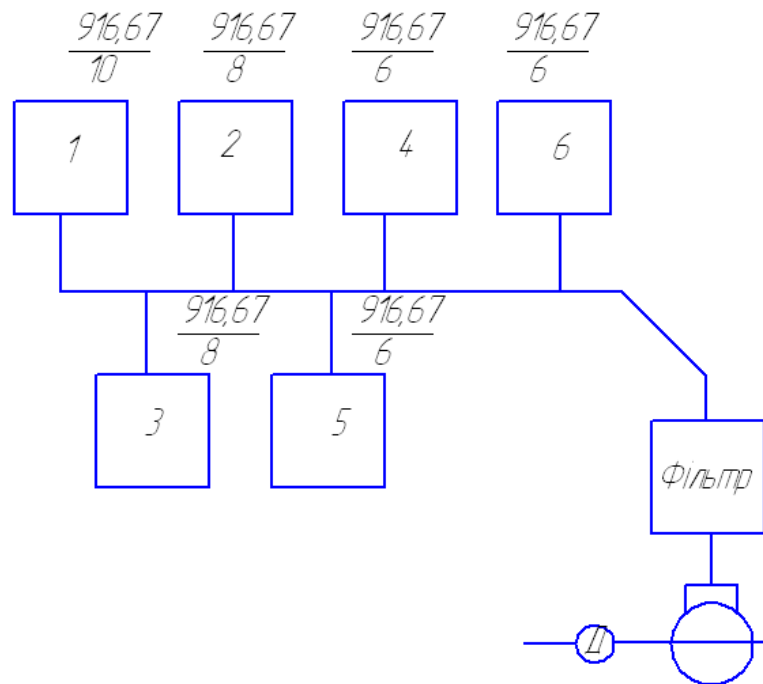


Рисунок 4.1 – Схема вентиляційної мережі

Необхідна подача вентилятора з рахуванням запасу на передбачені опори:

$$\Delta P_{\text{дд}} = \Delta P \cdot 1,1, \quad (4.19)$$

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5 + \Delta P_6, \text{ Па}$$

$$\Delta P = 45,3 + 53,3 + 53,3 + 79,8 + 79,8 + 84,02 = 395,5 \text{ Па},$$

$$\Delta P_{\text{вен}} = 395,5 \cdot 1,1 = 435,1 \text{ Па}.$$

Виходячи з необхідної подачі $L=5500 \text{ м}^3/\text{год}$ втрати тиску на лінії $\Delta P_{\text{дд}} = 435,1 \text{ Па}$ приймаємо вентилятор Ц-4-76.

Вентилятор Ц-4-76з характеристиками:

$L=5000 \text{ м}^3/\text{год}$,

ККД=0,55,

$P_v=2 \text{ кПа}$,

$n=2800 \text{ об/хв}$.

6.3.9 Потужність електродвигуна вентилятора обчислюємо за формулою:

$$N_{\text{дв}} = \frac{L \cdot P}{3,6 \cdot \eta_v \cdot \eta_n} \cdot 10^{-6}, \text{ кВт} \quad (6.20)$$

де L – подача вентилятора, $\text{м}^3/\text{год}$, $L = 5000 \text{ м}^3/\text{год}$;

P_v – тиск, який створюється вентилятором, $P_v=2 \text{ кПа}$;

η_v – ККД вентилятора, $\eta_v = 0,55$;

η_n – ККД передачі для муфти, $\eta_n = 0,98$.

$$N_{\text{дв}} = \frac{5000 \cdot 2000}{3,6 \cdot 0,55 \cdot 0,98} \cdot 10^{-6} = 5,1, \text{ кВт}$$

Приймаємо двигуни асинхронний, трьохфазний. Тип 4AA100LY3 потужністю 5,5 кВт.

					МР. АТм – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі: «Підвищення зносостійкості автомобільних деталей методом комбінування способів зміцнення в умовах товариства з обмеженою відповідальністю “Памібро”, смт. Брошнів-Осада, Івано-Франківська обл.».

В розділі 2 проаналізовано що майбутні дослідження повинні зосередитися на таких аспектах:

- Кількісна оптимізація параметрів гібридної обробки за допомогою експериментально-обчислювальної синергії;
- Розробка фізико-математичних моделей для прогнозування поведінки покриття на основі вхідних даних процесу;
- Застосування машинного навчання для інтелектуального вибору режимів обробки для балансування продуктивності та якості покриття;
- Поглиблені дослідження залишкових напружень, адгезійної міцності та довгострокової продуктивності в експлуатаційних умовах.

В розділі 3 встановлено закономірності та отримані кількісні дані про вплив часу обробки і енергії розряду при електроіскровому легуванні сталевих поверхонь графітом на товщину, мікротвердість і шорсткість цементованих шарів. товщина зміцненого шару зі збільшенням енергії розряду і часу легування зростає, досягаючи для сталі 40X 0,9 мм при мікротвердості 1100 HV.

У розділі 4 проведено розрахунок вентиляції.

Результати роботи були запропоновані керівництву підприємства для впровадження у виробничий процес.

					MP. ATm – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Hahn, D.W.; Omenetto, N. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), Part II: Review of instrumental and methodological approaches to material analysis and applications to different fields. *Appl. Spectrosc.* 2012, 66, 347–419. [[CrossRef](#)]
2. Tracton, A.A. *Coatings Technology Handbook*; Taylor & Francis Publishing: Boca Raton, FL, USA, 2006; 828p.
3. Gaponova, O.; Kundera, C.; Kirik, G.; Tarelnyk, V.; Martsynkovskyy, V.; Konoplianchenko, I.; Dovzhyk, M.; Belous, A.; Vasilenko, O. Estimating Qualitative Parameters of Aluminized Coating Obtained by Electric Spark Alloying Method. In *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings. Lecture Notes in Mechanical Engineering*; Springer: Singapore, 2019; pp. 249–266. [[CrossRef](#)]
4. Martsinkovsky, V.; Yurko, V.; Tarelnik, V.; Filonenko, Y. Designing Thrust Sliding Bearings of High Bearing Capacity. *Procedia Eng.* 2012, 39, 148–156. [[CrossRef](#)]
5. Martsinkovsky, V.; Yurko, V.; Tarelnik, V.; Filonenko, Y. Designing Radial Sliding Bearing Equipped with Hydrostatically Suspended Pads. *Procedia Eng.* 2012, 39, 157–167. [[CrossRef](#)]
6. Shimizu, M.; Sakakura, M.; Ohnishi, M.; Shimotsuma, Y.; Nakaya, T.; Miura, K.; Hirao, K. Mechanism of heat-modification inside a glass after irradiation with high-repetition rate femtosecond laser pulses. *J. Appl. Phys.* 2010, 108, 073533. [[CrossRef](#)]
7. Pogrebnjak, A.D.; Bagdasaryan, A.A.; Horodek, P.; Tarelnyk, V.; Buranich, V.V.; Amekura, H.; Okubo, N.; Ishikawa, N.; Beresnev, V.M. Positron annihilation studies of defect structure of (TiZrHfNbV)N nitride coatings under Xe¹⁴⁺ 200 MeV ion irradiation. *Mater. Lett.* 2021, 303, 130548. [[CrossRef](#)]
8. Liu, Y.; Zhang, S.; Shao, W.; Wang, Z.; Qu, J.; Zhou, W.; Zhang, S. Research on the Influence of Magnetic Field Assistance on the Quality of an Electro-Spark Deposition Layer. *Coatings* 2025, 15, 88. [[CrossRef](#)]
9. Antoszewski, B.; Tofil, S.; Scendo, M.; Tarelnik, W. Utilization of the UV laser with picosecond pulses for the formation of surface microstructures on elastomeric plastics. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2017, 233, 012036. [[CrossRef](#)]

					MP. АТМ – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

10. Tarel'nyk, V.B.; Gaponova, O.P.; Loboda, V.B.; Konoplyanchenko, E.V.; Martsinkovskii, V.S.; Semirnenko, Y.I.; Tarel'nyk, N.V.; Mikulina, M.A.; Sarzhanov, B.A. Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. Surf. Eng. Appl. Electrochem. 2021, 57, 173–184. [[CrossRef](#)]

11. Antoszewski, B.; Gaponova, O.P.; Tarel'nyk, V.B.; Myslyvchenko, O.M.; Kurp, P.; Zhylenko, T.I.; Konoplianchenko, I. Assessment of Technological Capabilities for Forming Al-C-B System Coatings on Steel Surfaces by Electrospark Alloying Method. Materials 2021, 14, 739. [[CrossRef](#)]

12. Gaponova, O.; Tarel'nyk, V.; Tarel'nyk, N.; Myslyvchenko, M. Nanostructuring of Metallic Surfaces by Electrospark Alloying Method. J. Miner. 2023, 75, 3400–3412. [[CrossRef](#)]

13. Penyashki, T.; Kostadinov, G.D.; Kande'va, M.K. Improvement of the Surface Properties of Carbon Steel Through Electrospark Coatings from Multicomponent Hard Alloys. Materials 2025, 18(10), 2211. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

14. Rukanskis, M. Control of Metal Surface Mechanical and Tribological Characteristics Using Cost Effective Electro-Spark Deposition. Surf. Engin. Appl. Electrochem. 2019, 55, 607–619. [[CrossRef](#)]

15. Barile, C.; Casavola, C.; Pappalettera, G.; Renna, G. Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review. Coatings 2022, 12, 1536. [[CrossRef](#)]

16. Rukanskis, M.; Padgurskas, J.; Mihailov, V.; Rukuiz'a, R.; Žunda, A.; Baltakys, K.; Tu'ckut' e, S. Investigation of the Lubricated Tribo-System of Modified Electrospark Coatings. Coatings 2023, 13, 825. [[CrossRef](#)]

17. Mihailov, V.; Kazak, N.; Ivashcu, S.; Ovchinnikov, E.; Baciu, C.; Ianachevici, A.; Rukuiza, R.; Zunda, A. Synthesis of Multicomponent Coatings by Electrospark Alloying with Powder Materials. Coatings 2023, 13, 651. [[CrossRef](#)]

					MP. АТМ – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18. Wang, J.; Zhang, M.; Dai, S.; Zhu, L. Research Progress in Electrospark Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review. *Coatings* 2023, 13, 1473. [[CrossRef](#)]

19. Gaponova, O.P.; Tarel'nyk, V.B.; Antoszewski, B.; Radek, N.; Tarel'nyk, N.V.; Kurp, P.; Myslyvchenko, O.M.; Hoffman, J. Technological Features for Controlling Steel Part Quality Parameters by the Method of Electrospark Alloying Using Carburezer Containing Nitrogen—Carbon Components. *Materials* 2022, 15, 6085. [[CrossRef](#)]

20. Gaponova, O.P.; Antoszewski, B.; Tarel'nyk, V.B.; Kurp, P.; Myslyvchenko, O.M.; Tarel'nyk, N.V. Analysis of the Quality of Sulfomolybdenum Coatings Obtained by Electrospark Alloying Methods. *Materials* 2021, 14, 6332. [[CrossRef](#)]

21. Al-Quraan, T.M.A.; Tokaruk, V.V.; Mikosianchyk, O.A.; Mnatsakanov, R.G.; Kichata, N.M.; Kuzin, N.O. Influence of Continuity of Electric Spark Coatings on Wear Resistance of Aluminum Alloy. *Tribol. Ind.* 2021, 43, 603–614. [[CrossRef](#)]

22. Lu, K.; Zhu, J.; Ge, W.; Hui, X. Progress on New Preparation Methods, Microstructures, and Protective Properties of High-Entropy Alloy Coatings. *Coatings* 2022, 12, 1472. [[CrossRef](#)]

23. Tarel'nyk, V.B.; Konoplyanchenko, E.V.; Kosenko, P.V.; Martsinkovskii, V.S. Problems and Solutions in Renovation of the Rotors of Screw Compressors by Combined Technologies. *Chem Pet. Eng.* 2017, 53, 540–546. [[CrossRef](#)]

24. Sidorenko, S.I.; Ivashchenko, E.V.; Lobachova, G.G.; Mazanko, V.F. The Influence of Ti and Zr on the Diffusion of Isotope Ni in the Iron Surface Layer at Electric-Spark Alloying in Carbon Containing Environment. *Defect Diffus. Forum* 2008, 277, 87–90. [[CrossRef](#)]

25. Tarel'nyk, V.B.; Paustovskii, A.V.; Tkachenko, Y.G.; Konoplianchenko, E.V.; Martsynkovskiy, V.S.; Antoszewski, B. Electrode Materials for Composite and Multilayer Electrospark-Deposited Coatings from Ni–Cr and WC–Co Alloys and Metals. *Powder Met. Met. Ceram* 2017, 55, 585–595. [[CrossRef](#)]

26. Umanskyi, O.; Storozhenko, M.; Baglyuk, G.; Melnyk, O.; Brazhevsky, V.; Chernyshov, O.; Terentiev, O.; Gubin, Y.; Kostenko, O.; Martsenyuk, I. Structure and

					MP. АТМ – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

Wear Resistance of Plasma-Sprayed NiCrBSiC–TiCrC Composite Powder Coatings
Powder Metall. Met. Ceram. 2020, 59, 434–444. [[CrossRef](#)]

27. Tarel'nik, V.B.; Martsinkovskii, V.S.; Zhukov, A.N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse End Seals. Part 1. Chem. Petrol. Eng. 2017, 53, 114–120. [[CrossRef](#)]

28. Tarelnyk, V.B.; Gaponova, O.P.; Konoplianchenko, Y.V.; Martsynkovskyy, V.S.; Tarelnyk, N.V.; Vasylenko, O.O. Improvement of quality of the surface electroerosive alloyed layers by the combined coatings and the surface plastic deformation. I. Features of formation of the combined electroerosive coatings on special steels and alloys. Metallofiz. I Noveishie Tekhnol. 2019, 41, 47–69. [[CrossRef](#)]

29. Tarelnyk, V.B.; Gaponova, O.P.; Konoplyanchenko Ye, V.; Yevtushenko, N.S.; Herasymenko, V.O. The Analysis of a Structural State of Surface Layer after Electroerosive Alloying. II. Features of Formation of Electroerosive Coatings on Special Steels and Alloys by HardWear-Resistant and Soft Antifriction Materials. Metallofiz. Noveishie Tekhnol. 2018, 40, 795–815. [[CrossRef](#)]

30. Reynold, J.L.; Holdren, R.L.; Brown, L.E. Electro-Spark Deposition. Adv. Mater. Process 2003, 161, 35–37.

31. Gould, J. Application of electro-spark deposition as a joining technology. Weld J. 2011, 90, 191–197.

32. Gaponova, O.; Tarel'nyk, N.V. Improvement of the quality parameters of the surface layers of steel parts after alitization by the electrospark alloying method Part 3. Mathematical model of forecasting quality parameters of coatings taking into account the performance of surface treatment. Metallofiz. I Noveishie Tekhnol. 2024, 46, 771–795. [[CrossRef](#)]

					MP. АТМ – 88.00.00.000 ПЗ	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

ТЕМА РОБОТИ: Підвищення зносостійкості

автомобільних деталей методом комбінування способів

зміцнення в умовах товариства з обмеженою відповідальністю

“Памібро”, смт. Брошнів-Осада, Івано-Франківська обл.

ВИКОНАВ: ст.гр. АТм-24-2 Ю.П. Семотюк

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

Актуальність теми. Гібридні методи значно покращують якість покриття, підвищуючи твердість, адгезію та структурну цілісність, а також зменшуючи шорсткість та дефекти. Однак, багатопараметричний характер цих процесів створює проблеми оптимізації. У цьому огляді виявлено прогалини в знаннях, пов'язані з відтворюваністю процесу, контролем формування мікроструктури та довгостроковою продуктивністю в умовах експлуатації. Обговорюються нещодавні прориви в поєднанні ЕІЛ з високоенергетичною обробкою поверхні. Майбутні дослідження повинні зосередитися на систематичній оптимізації параметрів, діагностиці *in situ* та прогнозному моделюванні, щоб забезпечити розробку спеціалізованих гібридних покриттів.

Метою магістерської роботи є дослідження та систематична оптимізація параметрів, та прогнозному моделюванні, щоб забезпечити розробку спеціалізованих гібридних покриттів.

Об'єкт дослідження є гібридні методи які значно покращують якість покриття, підвищуючи твердість, адгезію та структурну цілісність, а також зменшуючи шорсткість та дефекти.

Предмет дослідження процес нанесення зносостійкого покриття методом комбінованої обробки.

Методи дослідження металографічні та трибологічні дослідження

Наукова новизна результатів роботи проаналізовано можливість отримання багатошарові (комбіновані) покриттів, які можна використовувати для формування поверхневого шару з необхідними властивостями. Такі гібридні технології значно покращують властивості поверхні, забезпечуючи індивідуальні мікроструктури, покращену адгезію, збільшення товщини та зменшення шорсткості.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблено технологію комбінованого використання електроіскрової цементації, яка може бути використана для реставрації швидкозношуваних деталей автомобілів.

Основний вид діяльності ТОВ «Памібро»

17.21 Виробництво гофрованого паперу та картону, паперової та картонної тари

Види діяльності

46.49 Оптова торгівля іншими товарами господарського призначення

47.19 Інші види роздрібної торгівлі в неспеціалізованих магазинах

41.20 Будівництво житлових і нежитлових будівель

Місцезнаходження юридичної особи

Україна, 77611, Івано-Франківська обл., Рожнятівський р-н, селище міського типу Брошнів-Осада, ВУЛИЦЯ СІЧОВИХ СТРІЛЬЦІВ, будинок 52А/3.

Дане підприємство має власний автопарк. Тут також є авторемонтні майстерні, які обслуговують не тільки автомобілі самого підприємства, але і автомобілів інших власників з смт. Брошнів-Осада.



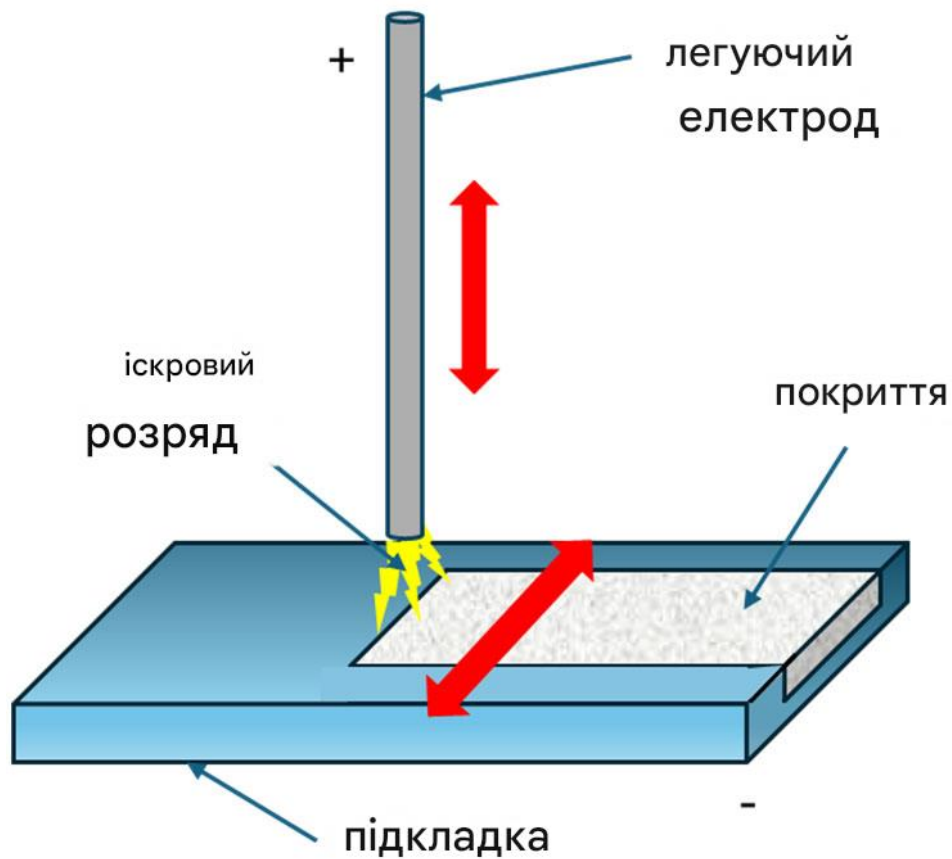


Рисунок 1 – Схема традиційної технології електроіскрового легування.

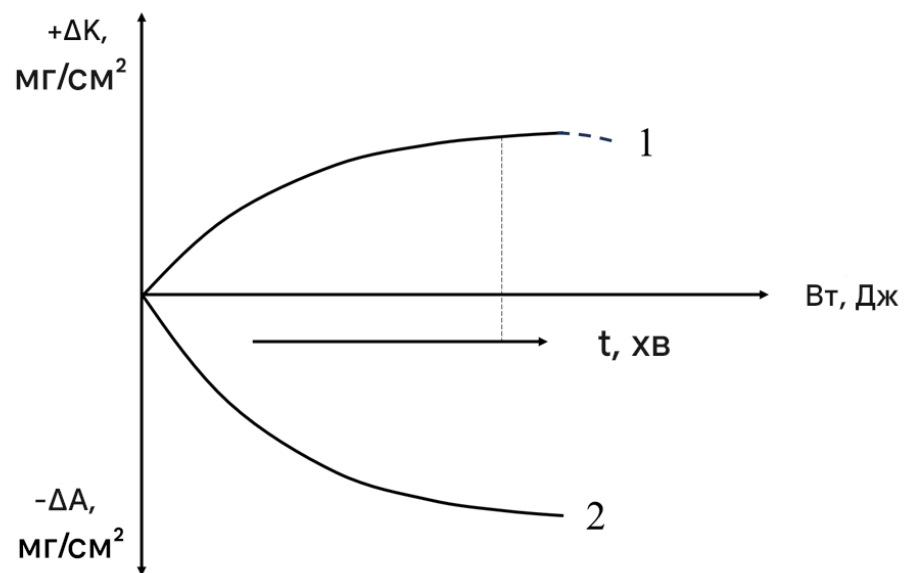


Рисунок 2 – Зміна ваги катода (1) та анода (2) як функція прикладеної енергії та часу обробки. ΔA – ерозія анода; ΔK – коефіцієнт посилення катода; W_p – прикладене значення енергії іскрових розрядів при осадженні підкладки площею 1 cm^2 .

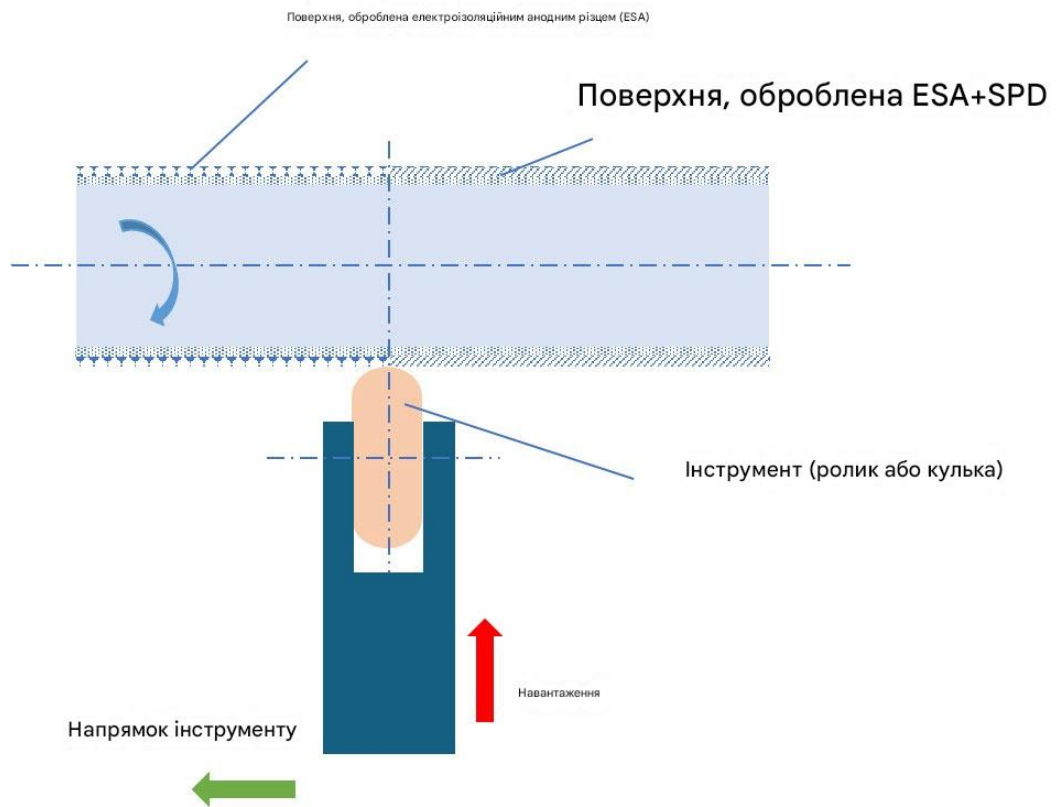


Рисунок 3 – Схема процесу припрацювання покриттів ЕІЛ.



Рисунок 4 – БУФО сталевого зразка після електроіскрової цементації.

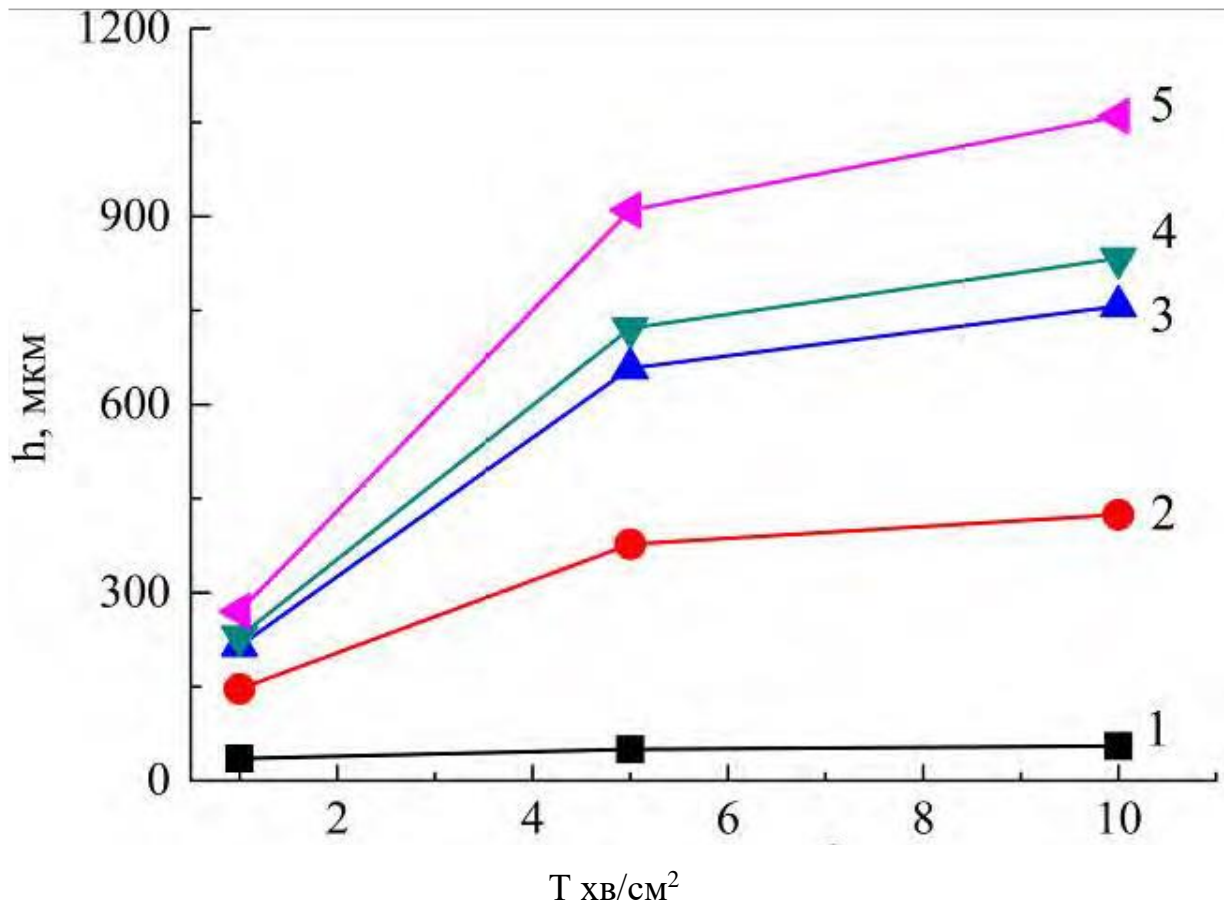


Рисунок 5 – Залежність глибини зміцненого шару від часу легування графітом сталі 40X при енергії розряду 0,5 (1), 1,41 (2), 2,83 (3), 3,4 (4) і 6,8 Дж (5).

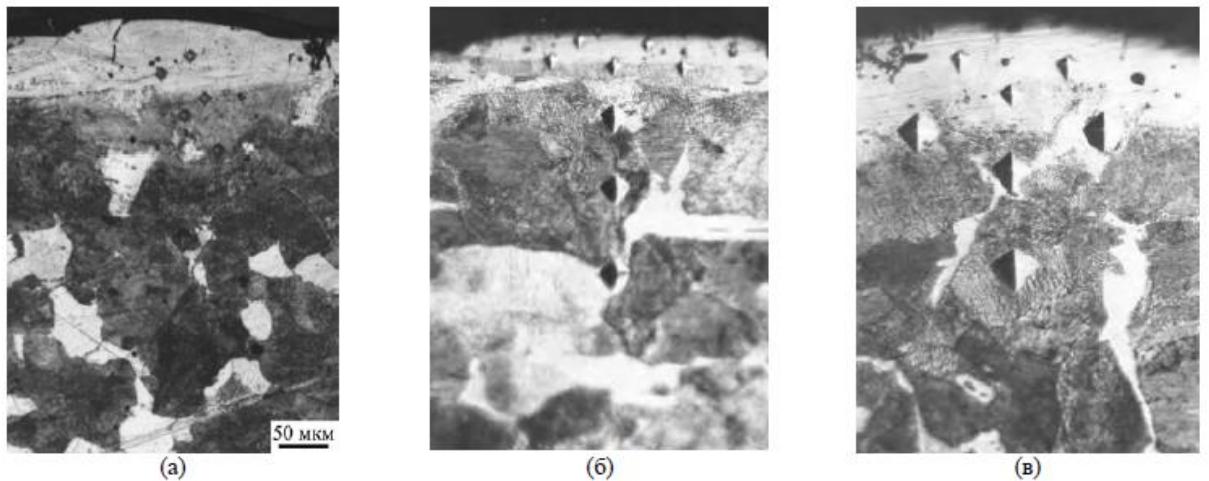


Рисунок 6 – Вид поперечного перерізу зразків із сталей 38ХМЮА (а) і 40Х (б, в) після ЕЦ. Час обробки – 1 хв / см²: (А) - $W_p = 0,9$ Дж, $\times 200$; (Б) – $W_p = 0,60$ Дж, $\times 200$; (В) – $W_p = 2,60$ Дж, $\times 250$.

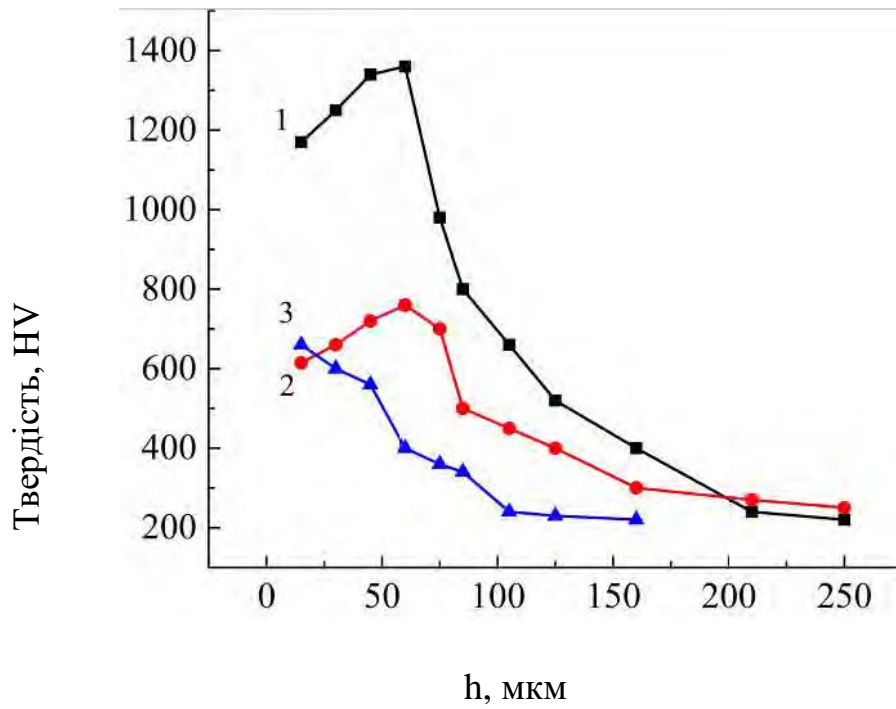


Рисунок 7 – Розподіл мікротвердості HV в цементованому шарі сталі 38ХМЮА (1) і сталі 40ХН2МЮА (2) після ЕЦ ($W_p = 0,9$ Дж, 5 хв / cm^2) і сталі 40Х після поетапної цементації ($W_p = 2,83$ і $0,9$ Дж, 5 і 2 хв / cm^2 відповідно) і обробки БУФО (3).

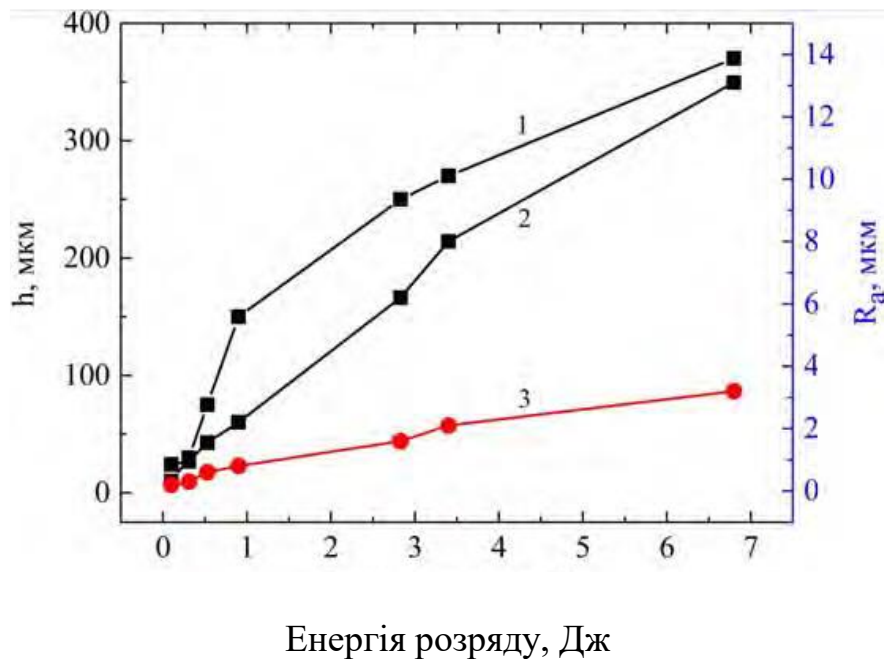


Рисунок 8 – Залежність від енергії розряду товщини цементованого шару h (1), шорсткості поверхні R_a після ЕЦ (2) і після ЕЦ і Буфо (3) сталі 38ХМЮА.

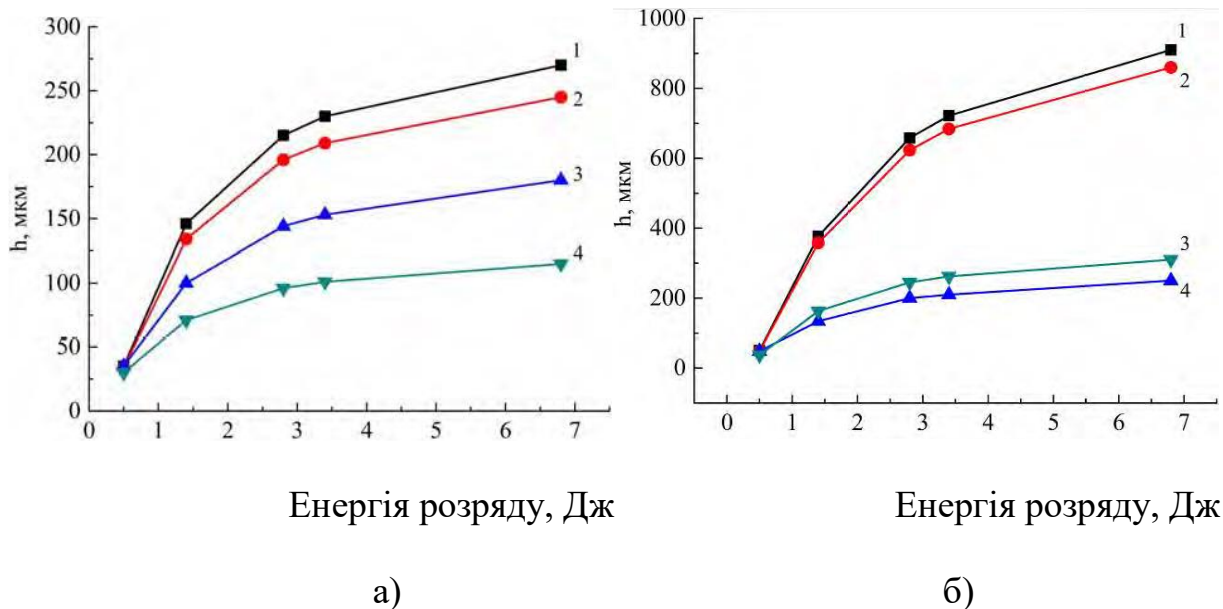


Рисунок 9– Залежність товщини цементованого шару h від енергії розряду після ЕЦ поверхні протягом 1 (а) та 5 (б) хв / cm^2 сталей 40Х (1), 30Х13 (2), АРМКО-заліза (3) і стали 12Х18Н10Т (4).

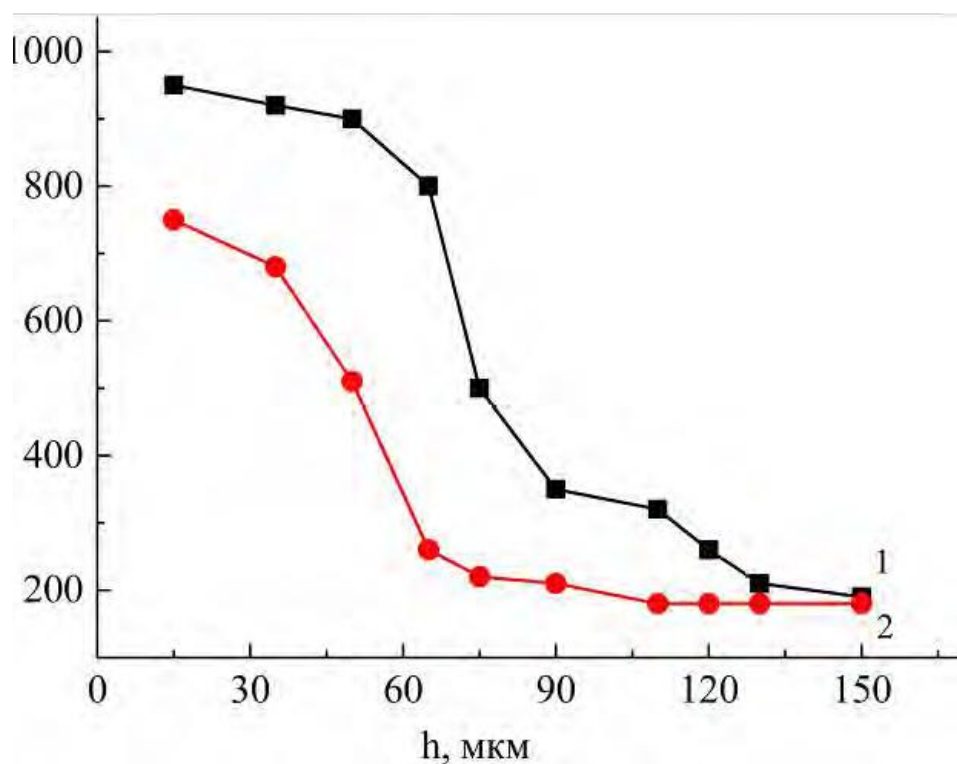


Рисунок 10 – Розподіл мікротвердості HV по глибині цементованого шару стали 20 після ЕЦ при $W_p = 2,83$ Дж (1) і після поетапного ЕЦ при $W_p = 2,83; 0,9$ і $0,1$ Дж (2).

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі: «Підвищення зносостійкості автомобільних деталей методом комбінування способів зміцнення в умовах товариства з обмеженою відповідальністю “Памібро”, смт. Брошнів-Осада, Івано-Франківська обл.».

В розділі 2 проаналізовано що майбутні дослідження повинні зосередитися на таких аспектах:

- Кількісна оптимізація параметрів гібридної обробки за допомогою експериментально-обчислювальної синергії;
- Розробка фізико-математичних моделей для прогнозування поведінки покриття на основі вхідних даних процесу;
- Застосування машинного навчання для інтелектуального вибору режимів обробки для балансування продуктивності та якості покриття;
- Поглиблені дослідження залишкових напружень, адгезійної міцності та довгострокової продуктивності в експлуатаційних умовах.

В розділі 3 встановлено закономірності та отримані кількісні дані про вплив часу обробки і енергії розряду при електроіскровому легуванні сталевих поверхонь графітом на товщину, мікротвердість і шорсткість цементованих шарів. Товщина зміцненого шару зі збільшенням енергії розряду і часу легування зростає, досягаючи для сталі 40X 0,9 мм при мікротвердості 1100 HV.

У розділі 4 проведено розрахунок вентиляції.

Результати роботи були запропоновані керівництву підприємства для впровадження у виробничий процес.