

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Митної справи, матеріалів, технологій та гостинності

(повне найменування факультету)

Кафедра Матеріалознавства

(повна найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»

ВСТАНОВЛЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ
СТВОРЕННЯ ЗАХИСНИХ КОМБІНОВАНИХ МЕТАЛООКСИДНИХ ПОКРИТТІВ З
ПІДВИЩЕНИМИ ТРИБОТЕХНІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ / ESTABLISHING THE
INFLUENCE OF ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS ON THE PROCESS OF
CREATING PROTECTIVE COMBINED METAL OXIDE COATINGS WITH ENHANCED
TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS.

спеціальність 132 «Матеріалознавство»

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Індустріальний

інжиніринг і менеджмент»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІМ(ІІМ)-41

Лебедь Богдан Олександрович

(підпис)

Керівник:

д.т.н., професор

Імбірович Наталія Юріївна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» _____ 20__ р.

к.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:

Гусачук Дмитро Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет мітної справи, матеріалів, технологій та гостинності
 Кафедра матеріалознавства
 Ступінь вищої освіти: бакалавр
 Галузь знань: 13 Механічна інженерія
 Спеціальність: 132 Матеріалознавство
 Освітня програма: Індустріальний інжиніринг та менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри

— Імбірович Н.Ю.

«03» січня 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Лебедь Тодор Александрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Встановлення впливу екстротвірних характеристик фракції створення захисних полімерних літосисцирних покриттів з підвищеними фізико-механічними властивостями
 керівник роботи Імбірович Н.Ю., т.н., прор.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, місце роботи)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «—» 20 року № —

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «13» травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Виставити порожню шх15, металового порожню, сина пресування, т-ра спікання, розмір улазів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Розділ 1. Огляд технічної літератури
Розділ 2. Методика експериментальних досліджень
Розділ 3. Експериментальна частина
Розділ 4. Висновки
Список використаних джерел

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

1. Методика пресування та напівання покриттів
2. Методика ПЕО
- 3, 4. Мікроструктурні дослідження
5. Статистична обробка ПЕО
6. Фізико-механічні властивості покриттів
7. Висновки

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР 2426.00.000 ПЗ

Арк.

1

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання приймає
Н. Кондрат	Фізичні параметри моторів	03.01.26	16.05.26

7. Дата видачі завдання «03» січня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Вступ. Огляд технічної літератури	05.05.26	виконано
2	Методика експериментальних досліджень	12.05.26	виконано
3	Експериментальне частинне висновок	19.05.26	виконано

Здобувач вищої освіти

Ледеро Б.О.
(прізвище та ініціал)

Керівник кваліфікаційної роботи

Ледеро Б.О.
(прізвище та ініціал)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР 2426.00.000 ПЗ

Арк.

2

АНОТАЦІЯ

Лебедь Б.О. Встановлення впливу електрофізичних характеристик процесу створення захисних комбінованих металооксидних покриттів з підвищеними триботехнічними характеристиками. Рукопис. «

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Індустріальний інжиніринг та менеджмент» за спеціальністю 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026. «

Кваліфікаційна робота бакалавра складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. «

У цій роботі досліджувалися комбіновані захисні покриття, що наносяться на пресовані сталеві втулки для їх захисту. «

Комбіновані захисні покриття складаються з двох покриттів: електрометалізація та плазмово-електролітичне оксидування. «

Ця робота включає дослідження методів нанесення покриттів та їх фізико-механічних властивостей. «

Пояснювальна записка містить 29 рисунків, 4 таблиці, 54 сторінки, 7 слайдів формату А4, предсталених в додатку. «

Ключові слова: синтез, оксидування, плазма, електроліт, порошок, пресування, покриття. «

					БР-2426.00.000-ПЗ «		
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата			
Розробив	Лебедь				Встановлення впливу електрофізичних характеристик процесу створення захисних комбінованих металооксидних покриттів з підвищеними триботехнічними характеристиками	Літ.	Арк.
Перевірив	Імбірович					3	54
«	«					ЛНТУ «	
Н.Контр.	Мисковець					каф. матеріалознавства	
Затв.	Імбірович					тр. 4 ІМС-31 «	

					БР 2426.00.000 ПЗ		Арк.
Змн.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата			3

ANNOTATION

Lebedj B.O. . Manuscript.

Bachelor's qualification work of EP " Industrial engineering and management" specialty 132 Material Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The bachelor's qualification work consists of an introduction, three sections, conclusions, a list of used literature, and appendices.

In this work combined protective coatings applied to pressed steel bushings for their protection were investigated.

Combined protective coatings consist of two coatings: electrometallization and plasma electrolytic oxidation.

This work includes a study of coating methods and their physical and mechanical properties.

The explanatory note contains 29 figures, 4 tables, 54 pages, 7 slides of A4 format presented in the appendix.

Key words: synthesis, oxidation, plasma, electrolyte, powder, pressing, coating.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	7
1.1. Порошкова металургія, як метод створення деталей	7
1.2. Порошкове пресування та його види	8
1.3. Вимоги до процесу пресування	9
1.4. Електрометалізаційне напилення	11
1.5. Розпилювальні системи металізатора	13
1.6. Функціональні властивості покриттів	18
1.7. Основи плазмоелектролітного оксидування	20
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	24
2.1. Технологія пресування, обробки та напилення на спресовані деталі електрометалізаційного покриття	24
2.2. Технологія нанесення другого шару покриття методом ПЕО	27
2.3. Методика мікрааналізу	29
2.4. Методика визначення твердості та товщини комбінованих покриттів	31
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	32
3.1. Мікроструктура електрометалізаційного покриття та спресованої основи зразків	32
3.2. Товщина напиленого покриття на зразках зі втулок, спресованих за різних режимів	36
3.3. Мікроструктура ПЕО-покриття	37
3.4. Встановлення товщини комбінованих захисних покриттів	40
3.5. Мікротвердість комбінованих покриттів на спресованих підложках	43
3.6. Співзалежність мікротвердості покриття з його товщини	47
ВИСНОВКИ	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	53
ДОДАТКИ	55

ВСТУП

Метою даної роботи є розроблення комбінованих металооксидних покриттів шляхом плазмоелектролітної обробки електродугово-напиленних шарів на сталях, а також дослідження механізмів і стадій формування оксидно-керамічних шарів на гетерогенних газотермічних покриттях залежно від їх структури та хімічного складу.

Поєднання різних типів покриттів дозволяє суттєво покращити експлуатаційні характеристики матеріалів, зокрема підвищити твердість, зносостійкість, корозійну стійкість, пластичність, а також опір контактним і динамічним навантаженням та вібраціям. Завдяки особливостям хімічного й фазового складу, а також специфічній структурі керамічних шарів, оксидні покриття, отримані на вентильних металах методом Плазмоелектролітичне оксидування, характеризуються високими функціональними властивостями. Багатофункціональність оксидно-керамічних покриттів забезпечує їх широке використання в різних галузях промисловості, причому перелік деталей, які піддаються такій обробці, постійно розширюється.

Разом із тим потенціал методу ще не повністю реалізований. Тривають дослідження, спрямовані на вдосконалення процесу синтезу оксидно-керамічних покриттів, створення нових електролітів та розроблення сучасних джерел живлення. Водночас одним із основних недоліків процесу електродугового оксидування є обмежене коло металів, на які можливо безпосередньо наносити такі покриття. Розширення сфери застосування методу плазмоелектролітного оксидування для інших металів і сплавів можливе завдяки використанню комплексної технології, що поєднує газотермічне напилення дротів або порошків на основі алюмінію з подальшим плазмоелектролітним оксидуванням. Крім того, застосування такої комбінованої технології дає змогу відновлювати зношені деталі та подовжувати ресурс роботи обладнання.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Порошкова металургія, як метод створення деталей

Порошкова металургія – це галузь матеріалознавства та металургії, яка охоплює процеси виробництва порошків металів, їхніх сплавів і хімічних сполук, а також неметалевих матеріалів, і виготовлення з них напівфабрикатів, заготовок та готових виробів. Особливістю даної технології є те, що основний компонент матеріалу під час формування виробу не доводиться до стану плавлення.

На сучасному етапі світовий обсяг виробництва металевих порошків (Fe, Cu, Ni, Co, Cr, W, Mo, V), їхніх сплавів та сполук, зокрема карбідів і боридів, із розмірами частинок від 0,1 ... 1,0 мкм до 1 мм перевищує 1 млн тонн на рік, тоді як обсяги виготовлення виробів із цих матеріалів становлять приблизно 550 ... 650 тис. тонн щорічно.

Методи порошкової металургії мають важливе значення завдяки можливості створення матеріалів, отримання яких традиційними технологіями є неможливим або економічно недоцільним. Зокрема, це стосується композицій із металів і неметалів, матеріалів із регульованою пористістю, систем із компонентами, що мають значну різницю температур плавлення (наприклад, W – Cu), а також матеріалів зі спеціальними електричними, магнітними та іншими функціональними властивостями.

Крім того, порошкова металургія характеризується мінімальними втратами матеріалу під час виробництва, дозволяє скоротити кількість технологічного обладнання та зменшити трудові витрати. Завдяки цьому технологія є високоефективною при виготовленні деталей загального машинобудівного та побутового призначення, які традиційно отримують

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

методами лиття та механічної обробки. Для виготовлення таких виробів використовують порошки сталей, бронз, латуней та інших матеріалів [1].

Технологічний процес порошкової металургії включає кілька основних етапів:

- а) отримання порошків;
- б) підготовку шихти;
- в) пресування;
- г) спікання.

У деяких випадках додатково застосовують гаряче опресовування, калібрування та просочування мастильними матеріалами та інші види обробки.

1.2. Порошкове пресування та його види

Виріб, виготовлений із металевого порошку, називають порошковим виробом або порошківкою. Найбільш поширеними способами формування таких виробів є холодне та гаряче пресування [2].

Залежно від напрямку прикладення зусиль розрізняють однобічне та двобічне пресування.

Однобічне пресування застосовують переважно для виготовлення виробів простої геометричної форми, зокрема втулок і кілець. Під дією пуансона порошковий матеріал ущільнюється, деформується, а окремі частинки можуть частково руйнуватися. Через вплив сил тертя між порошком і стінками прес-форми прикладене навантаження розподіляється нерівномірно, що призводить до неоднорідності густини матеріалу та погіршення якості готового виробу. При збільшенні співвідношення висоти виробу до його діаметра нерівномірність розподілу густини стає більш вираженою.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Двобічне пресування передбачає одночасний рух двох пуансонів назустріч один одному. Такий метод використовують для виготовлення виробів, висота яких більш ніж удвічі перевищує їх діаметр. Завдяки зустрічному переміщенню пуансонів забезпечується більш рівномірний розподіл густини порошку по висоті виробу. Крім того, для досягнення однакової середньої густини необхідне зусилля є на 30 ... 40 % меншим порівняно з однобічним пресуванням. Для формування виробів складної конфігурації застосовують пресувальні машини з кількома пуансонами [3].

Залежно від виду армувального матеріалу, конструкції виробу, його форми та способу подачі матеріалу у форму, виділяють два основні методи формування виробів із полімерних композиційних матеріалів (ПКМ): пряме та ливарне пресування.

Окремим різновидом є мундштукове пресування, яке використовують для виготовлення виробів, довжина яких значно перевищує діаметр, наприклад прутків і труб. Цей метод особливо ефективний для порошків, що важко піддаються пресуванню, зокрема порошків берилію, вольфраму та інших тугоплавких матеріалів.

1.3. Вимоги до процесу пресування

Найбільш поширеним і водночас найнебезпечнішим видом дефектів при пресуванні є поперечні та діагональні тріщини. Їх утворення пов'язане з руйнуванням частинок під час пресування, пружним розвантаженням контактів між ними, а також особливостями процесу вилучення спресованого брикету з матриці. У момент випресовування одночасно відбуваються два протилежні процеси: розширення пресовки після виходу з матриці та поступове розширення самої матриці.

Серед основних факторів, що спричиняють виникнення таких дефектів, можна виділити:

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

а) умови пресування, які знижують міцність брикетів, зокрема наявність гладких плоских частинок, надмірне окислення та наклеп порошкових частинок, а також введення мастильних матеріалів у кількостях, що перевищують оптимальні;

б) високі тиски пресування, особливо при обробці твердих матеріалів. У цьому випадку пружні сили, які викликають розтріскування, збільшуються пропорційно до тиску, тоді як міцність брикетів зростає повільніше. У результаті при певному значенні тиску руйнівні пружні напруження перевищують міцність пресовки, що призводить до появи тріщин;

в) нерівномірний розподіл домішок або компонентів у складних порошкових сумішах, що може бути наслідком недостатньо якісного змішування чи використання хімічно неоднорідного порошкового матеріалу;

г) нерівномірне зняття тиску під час видалення брикету з прес-форми, що часто пов'язано з недосконалістю конструкції форми або її перекосом у процесі пресування та розвантаження;

д) надто повільне випресовування, а особливо зупинки під час цього процесу. Для зменшення ризику виникнення тріщин рекомендується використовувати роз'ємні матриці, які забезпечують швидке усунення горизонтальних стискальних зусиль і рівномірне всебічне розширення брикету;

е) наявність у виробках тонких стінок або різких переходів між окремими елементами конструкції [3].

1.4. Електрометалізаційне напилення

Особливості різних типів електрометалізаторів визначаються насамперед розташуванням привідних роликів, які забезпечують подачу електродних дротів у зону горіння електричної дуги, а також способом передавання їм обертального руху [4, 5].

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найбільш поширеною є так звана «тягнуча» схема подачі дроту, за якої привідні ролики розташовані безпосередньо в корпусі металізатора (рисунок 1.1). У цьому випадку в одному конструктивному блоці поєднані системи подачі електродних дротів та розпилення розплавленого металу.

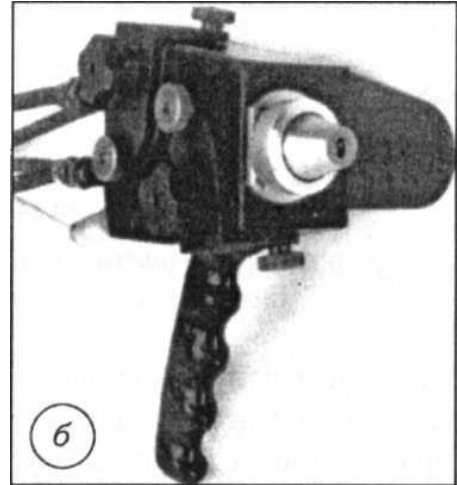
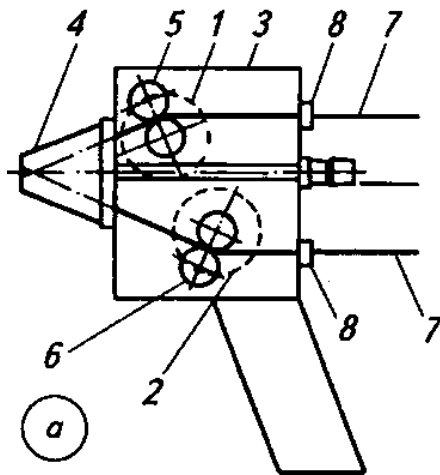


Рисунок 1.1 – Схема (а) та загальний вигляд (б) ручного металізатора з незалежною подачею електродних дротів:

- 1, 2 – привідні ролики;
- 3 – корпус;
- 4 – сопло;
- 5, 6 – головки;
- 7 – електродний дріт;
- 8 – струмопідвід.

Приведення роликів у рух здійснюється за допомогою пневмотурбіни або електродвигуна, які встановлюються безпосередньо в корпусі металізатора. Пневматичний привід найчастіше застосовується в ручних електрометалізаторах. Для зниження швидкості обертання вала турбіни чи електродвигуна використовують черв'ячний одно- або двоступеневий планетарний редуктор. Регулювання швидкості подачі електродного дроту здійснюється шляхом зміни об'єму повітря, що надходить до турбіни.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

«Тягнуча» схема подачі дозволяє розміщувати касети з електродним дротом на значній відстані – до 3 м, що забезпечує її широке практичне застосування. Водночас у випадках, коли необхідно максимально зменшити масу або габарити металізатора, використовують «штовхаючу» схему подачі дроту.

У компактному ручному металізаторі з незалежною системою подачі дротів для приводу застосовано два мотор-редуктори типу ЕДУ 145Р. Електронна система окремого регулювання частоти обертання кожного двигуна забезпечує плавну зміну швидкості подачі дроту в межах від 1,5 до 14 м/хв. Це дозволяє використовувати для металізації різні електродні матеріали, зокрема мідь, цинк, сталь, алюміній та інші.

Також було розроблено стаціонарний металізатор, здатний подавати електродні дроти з різними, але фіксованими швидкостями за допомогою одного електродвигуна (рисунок 1.2). Така можливість реалізується шляхом використання набору змінних пар привідних шестерень – так званої «гітари».

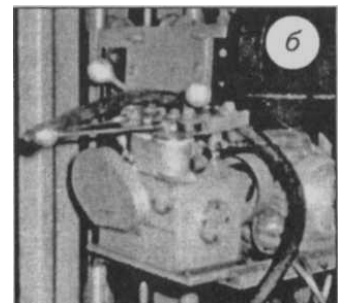
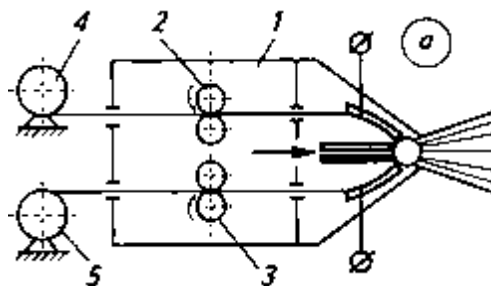


Рисунок 1.2 – Схема (а) та загальний вигляд (б) металізатора:

1 – корпус;

2, 3 – притискні ролики з приводною системою змінних шестерень;

4, 5 – касети з електродним дротом

Такий металізатор, залежно від встановленого набору шестерень, забезпечує постійні швидкості подачі електродних дротів у співвідношенні

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

від 1:1 до 5:1 (у межах 2,5 ... 12,5 м/хв). Це дозволяє здійснювати розпилення як різнорідних пар дротів (цинк–сталь, алюміній – сталь, латунь – сталь), так і однорідних (сталь – сталь, цинк – цинк тощо).

На рисунку 1.2 а представлено конструктивну схему такого електрометалізатора. Блок змінних шестерень («гітара») для кожного електродного дроту розташований поза межами корпусу та закритий захисною кришкою (рисунок 1.2 б). Така конструкція дозволяє досить легко змінювати швидкість подачі одного або обох дротів шляхом заміни відповідної пари шестерень.

Як показано на схемі (рисунок 1.2 а), швидкість подачі електродного дроту (4) є більшою порівняно з дротом (5). Це пояснюється тим, що привід обох роликів здійснюється від одного електродвигуна, при цьому кутові швидкості активних роликів (2, 3) однакові. Водночас лінійна швидкість ролика, який подає дріт (4), є більшою через більший діаметр його привідної шестерні, встановленої на спільному валу.

1.5. Розпилювальні системи металізатора

Відповідно до загальноприйнятої термінології [6], соплові системи, які застосовуються в електродугових металізаторах, умовно поділяють на два основні типи: закриті та відкриті (рисунок 1.3).

У закритій сопловій системі електроди розміщуються всередині сопла, а розпилювальний газ подається в область горіння електричної дуги через спеціальну діафрагму (рисунок 1.3 а). Завдяки цьому забезпечується більша площа розпилення електродного матеріалу порівняно з відкритою системою ($a_1 > a_v$). Разом із тим, оскільки оптимальний діаметр діафрагми у 3 ... 4 рази перевищує діаметр електродного дроту, це призводить до підвищених витрат розпилювального газу.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перевагою закритої соплової системи є можливість отримання дрібніших і більш однорідних за гранулометричним складом частинок розпиленого матеріалу [7]. Це сприяє зменшенню пористості сформованих покриттів та покращенню їх захисних властивостей.

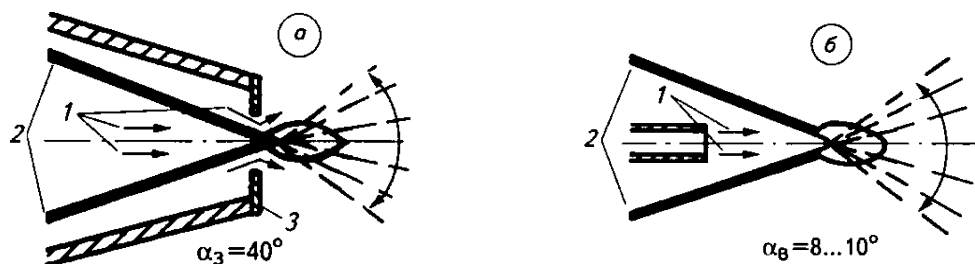


Рисунок 1.3 – Схеми розпилювальних головок металізатора:

а – закрита; б – відкрита:

1 – потік повітря;

2 – електроди;

3 – діафрагма

Підвищення робочої напруги електричної дуги сприяє переходу процесу напилення від електродугового до квазіплазмового режиму. За таких умов горіння дуги стає більш стабільним, зменшується рівень її пульсацій, а характер відриву розплавленого металу від електрода змінюється з крапельного на струменевий. У результаті цього адгезійна міцність сформованих покриттів зростає на 50 ... 100 % (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Вплив електричних параметрів дуги на адгезію покриття до основи

U _{хх} , В	U _р , В	I _р , А	Q, кг/год	P, кВт·год	L _д , мм	P/Q, кВт·год/кг	σ _{адг.} , МПа
40	30	170	4,9	5,1	3	1,04	9
90	70	440	19	30,0	5	1,57	17
150	75	500	19	37,5	7	1,97	20
190	85	500	19	42,5	9	2,32	18
280	140	350	15,7	54,6	15	3,41	-

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

U_{xx} – напруга холостого ходу джерела живлення;

U_p – робоча напруга;

I_p – робочий струм;

Q – продуктивність розпилення;

P – енерговитрати на розпилення;

L_d – довжина дуги;

$\sigma_{адг.}$ – міцність зчеплення покриття, отриманого розпиленням електрода з шихтою.

Існують соплові системи, у яких поєднано центрально-соплову та диференційну схеми подачі повітря [8]. Саме за таким принципом конструктивно виконана соплова система електрометалізаторів ЕМ-17.

У такій головці (рисунок 1.4) процес розпилення електродного матеріалу відбувається наступним чином: після ввімкнення подачі розпилювального повітря через сопло 2 до струмопроводів 3 і 4 підводиться електричне живлення, а також запускається механізм подачі електродних дротів 7 і 8. У момент їх контакту виникає електрична дуга, яка розплавляє дроти. Під дією повітряного струменя, що надходить через основне сопло 2 та додаткові сопла 9 і 10, утворюється металоповітряний потік.

Додаткові сопла 9 і 10 виконують не лише функцію формування факела потоку, а й забезпечують охолодження струмопроводів 3 і 4, що суттєво збільшує термін їх експлуатації.

Особливу групу становлять розпилювальні головки, призначені для нанесення покриттів на внутрішні поверхні. Для реалізації такого процесу конструкція головки оснащується додатковим повітряним соплом, виконаним у вигляді трубки, зігнутої під певним кутом. Вона слугує продовженням основного повітряного сопла та одночасно виконує функцію відсікача факела розпиленого металу [9] (рисунок 1.5).

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

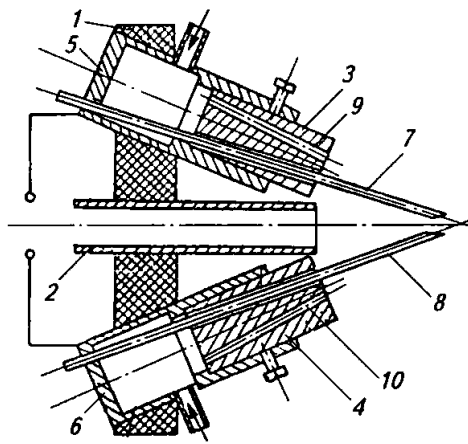


Рисунок 1.4 – Схема соплової системи електро-металізатора, що поєднує центрально соплову та диференційну схеми подачі повітря:

- 1 – корпус;
- 2 – основне газове сопло;
- 3,4 –струмопроводи;
- 5,6 – колектори;
- 7,8 – електроднідроти;
- 9,10 – додаткові газові сопла

Для розпилення металу в електродугових металізаторах застосовують різні гази. Найпоширенішим є стиснене повітря, яке повинно бути очищеним від механічних домішок, парів і мастил. Особливо жорсткі вимоги висуваються до вмісту вологи, оскільки її наявність негативно впливає на якість розпилення металу. Окрім повітря, в електродугових металізаторах широко використовують інертні гази, азот та інші газові середовища.

Під час роботи в повітряному середовищі електродний матеріал окиснюється як у розплавленому, так і в охолодженому стані, внаслідок чого в електрометалізаційному покритті утворюються оксиди. Їх присутність сприяє підвищенню твердості та окремих механічних характеристик

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

покриття, проте водночас зменшується адгезія, збільшується гетерогенність структури та ускладнюється подальша механічна обробка.

Наявність пилу під час роботи металізатора може спричиняти розшарування покриттів, що призводить до погіршення їх механічних властивостей. Для запобігання цьому доцільно застосовувати спеціальні фільтри з розміром пор від 80 до 100 мкм [11].

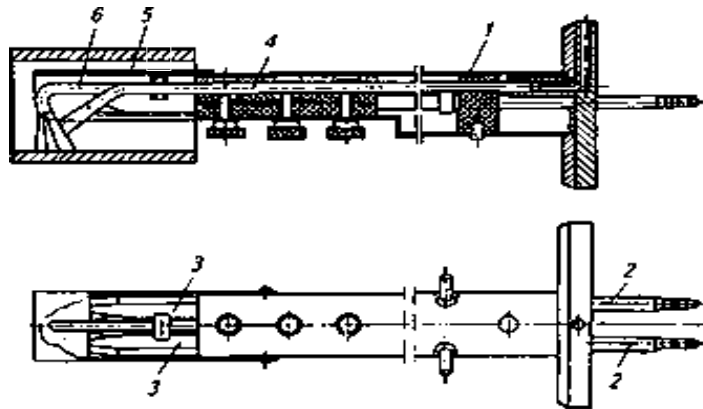


Рисунок 1.5 — Схема головки електрометалізатора, призначеної для несення покриттів на внутрішні поверхні:

- 1 — дистанційні втулки;
- 2,3 — втулки для електродного дроту;
- 4 — канали подачі основного повітря;
- 5 — захисний екран;
- 6 — додаткове повітряне сопло

Для електродугового напилення як електроди можуть використовуватись майже всі типи суцільних промислових дротів діаметром 1,0 ... 2,5 мм. Водночас до якості таких електродів висуваються певні вимоги, такі як: їх поверхня не повинна мати дефектів, слідів іржі чи жирових забруднень.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Важливим параметром є також пластичність електродного дроту, оскільки електроди мають бути достатньо гнучкими для стабільної роботи. У випадку надмірної жорсткості дроту застосовують його відпал у печі з обмеженим доступом повітря, що дозволяє зменшити утворення окалини на поверхні.

Починаючи з 1990 року в Україні налагоджено виробництво електродугових металізаторів (ЕДМ), призначених для отримання відновних зносостійких покриттів. Для напилення застосовують промислові дроти з міді, бронзи, алюмінію, ніхрому та сталі. У деяких випадках використовують пари різнорідних металевих дротів, що дає змогу формувати покриття зі спеціальними властивостями.

З метою покращення адгезійних характеристик покриттів наносять підшари з вольфрамових або ніхромових дротів. Крім того, за кордоном випускають спеціалізовані електродні дроти як суцільного, так і порошкового типу.

1.6. Функціональні властивості покриттів

Відомо, що одним із ключових чинників, які визначають зносостійкість матеріалів у парах тертя, є інтенсивність енергетичного впливу на контактну поверхню. Залежно від умов роботи розрізняють два основні типи тертя: зношування за наявності абразиву та без нього [12].

Абразивні частинки, які перебувають у зазорі спряження під дією навантаження, можуть по-різному взаємодіяти з поверхнею: вдавлюватися в неї, подрібнюватися, ковзати або перекочуватися, спричиняючи пружну чи пластичну деформацію. За значних навантажень механізми пошкодження поверхонь як закріпленими, так і незакріпленими абразивними частинками є подібними. Основними причинами руйнування покриттів у таких умовах

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

виступають контактна втома матеріалу, циклічне вдавлювання абразиву та процеси різання поверхні.

У більшості випадків пошкодження реальних деталей зумовлюється одночасною дією кількох механізмів взаємодії абразиву з поверхнею. При цьому швидкість абразивного зношування електродугових покриттів прямо залежить від їх когезійної міцності [13].

Граничне тертя суттєво відрізняється від інших видів тим, що навколишнє середовище виконує не лише роль мастильного та розділювального шару між контактуючими поверхнями, а й бере участь у структурних перетвореннях під час зношування. У процесі тертя відбуваються складні фізичні, механічні, хімічні та електрохімічні явища, внаслідок яких формуються продукти зношування зі структурою, що істотно відрізняється від структури основного металу пар тертя [14].

Під дією тертя інтенсивність дифузійних процесів може зростати у 10^5 – 10^9 разів, що спричиняє перерозподіл дифундуючих елементів. У результаті під поверхнею формується тонкий шар товщиною близько 10 мкм із зміненим хімічним та фазовим складом [15]. У цьому шарі можуть утворюватися дрібнодисперсні суміші компонентів вихідних матеріалів, а також нові фази – карбіди, нітриди, сульфіді, оксиди та тверді розчини взаємодіючих елементів. Саме вони забезпечують нові експлуатаційні властивості робочого шару.

Таким чином, у поверхневому шарі відбуваються процеси зміцнення або, навпаки, знеміцнення матеріалу. Це сприяє підвищенню зносостійкості доти, доки матеріал зберігає здатність до пластичної деформації. Після вичерпання цієї здатності починаються процеси руйнування. У зазначених фізико-хімічних процесах активну участь беруть кисень, азот, CO, CO₂, що містяться в повітрі, а також вуглеводні й інші компоненти мастильних матеріалів.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У зв'язку з цим важливим є дослідження умов виникнення вторинних структур на поверхнях тертя електродугових покриттів і визначення факторів, які сприяють їх утворенню. Це необхідно для створення нових порошкових дротів із таким складом шихти, який забезпечуватиме формування покриттів із високими трибологічними властивостями.

Газотермічні покриття широко використовують для захисту деталей двигунів, елементів енергетичного обладнання, печей та інших конструкцій від високотемпературного окиснення. Останнім часом для захисту нагрівних елементів котлів теплових електростанцій дедалі частіше застосовують електродугові покриття [16]. Екранні труби котлів ТЕС, що працюють на вугіллі, захищають покриттями, отриманими як надзвуковим газополуменевим напиленням, так і електродуговою металізацією із суцільних та порошкових дротів. Такі покриття характеризуються жаростійкістю за температур експлуатації 800 ... 900 °С.

Для захисту труб від високотемпературної корозії формують електродугові покриття з нікель- і залізовмісних порошкових дротів із підвищеним вмістом хрому. Під час експлуатації хром утворює на поверхні щільну оксидну плівку навіть за низької концентрації кисню в газовому потоці, що суттєво збільшує довговічність конструкцій із такими покриттями.

1.7. Основи плазмоелектролітного оксидування

Плазмоелектролітне оксидування (ПЕО), відоме в Німеччині як ANOF (Anodische Oxidation unter Funkenentladung), у США, Європі та Китаї – ASD (Anodic Spark Deposition), а у Великобританії – PEO (Plasma Electrolytic Oxidation), останнім часом активно розвивається як сучасна інтенсивна технологія поверхневої обробки металів. За своєю суттю цей метод є

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

близьким до традиційного анодування, однак не потребує застосування глибокого охолодження, що робить його більш екологічно безпечним.

На алюмінієвих, магнієвих, цирконієвих, титанових та інших вентильних металах, оксиди яких мають декілька поліморфних модифікацій, можливо формувати покриття із наперед заданими властивостями. Утворення високотемпературних модифікацій оксидів забезпечується завдяки підведенню до реакційної зони висококонцентрованої енергії.

Процес формування покриття відбувається в електричному полі, яке слугує джерелом енергії для перебігу плазмохімічних реакцій на поверхні робочого електрода. Зі зростанням напруги процес проходить через кілька характерних стадій:

I – фарадеївська область;

II – область іскріння;

III – область мікродугових розрядів (рисунок 1.6).

У фарадеївській області відбуваються електрохімічні процеси, характерні для анодування [12, 13]. Електричний пробій виникає внаслідок іонізації електронів та їх переходу із забороненої зони в зону провідності.

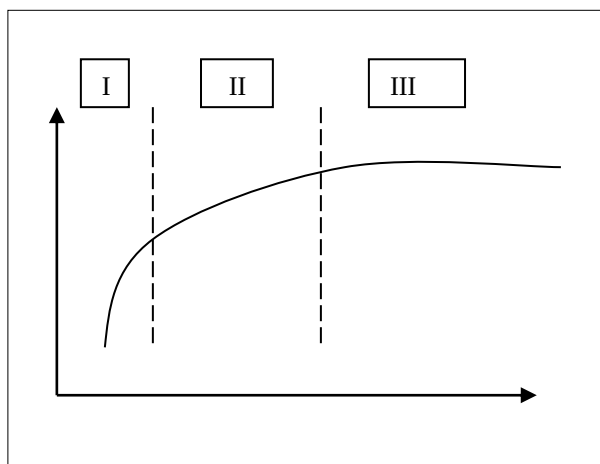


Рисунок 1.6 – Стадійність анодного процесу ПЕО

Цей процес також можуть активізувати електрони, що утворюються внаслідок електрохімічних реакцій на аноді. У каналі пробою температура різко підвищується, відбуваються процеси дисоціації та іонізації електроліту, внаслідок чого формується плазмовий згусток, у якому реалізуються плазмохімічні реакції синтезу оксидного покриття [17].

Встановлено, що присутність водню в технологічних середовищах, де здійснюється нанесення покриттів, позитивно впливає на їх характеристики та експлуатаційні властивості. Тому для забезпечення оптимального перебігу процесу необхідно створити умови для почергового проходження окиснювальних і відновлювальних реакцій на робочому електроді. Вміст високотемпературної фази оксиду в покритті визначається умовами його синтезу.

Метод ПЕО дозволяє формувати на деталях і конструкційних елементах зносо- та корозійностійкі оксидокерамічні діелектричні покриття товщиною до 200 мкм і твердістю до 20 ГПа. Обладнання для ПЕО працює від трифазної мережі напругою 380 В і частотою 50 Гц та забезпечує незалежне регулювання напруги на позитивній і негативній півхвилях струму.

До основних переваг ПЕО належать:

- а) можливість обробки деталей різних розмірів і складної конфігурації із забезпеченням рівномірної та якісної обробки всієї поверхні;
- б) простота реалізації процесу, що не потребує залучення висококваліфікованого персоналу;
- в) підвищення зносостійкості та корозійної стійкості завдяки формуванню складних твердорозчинних зон глибиною 100 ... 200 мкм;
- г) інтенсифікація процесу насичення на всіх етапах технологічного циклу;

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

д) збереження міцності матеріалу, його структури та підвищення пластичності за рахунок відносно невисокої температури процесу (750 ... 850 °C);

д) забезпечення високої якості поверхні, що дозволяє використовувати процес як завершальну технологічну операцію;

е) можливість формування необхідного структурно-фазового стану поверхневих шарів і регулювання ступеня зміцнення в широкому діапазоні (7 ... 14 ГПа) шляхом зміни температурно-часових та газодинамічних параметрів;

є) можливість обробки деталей довільної форми, у тому числі з отворами різного діаметра та довжини, із застосуванням серійних вакуумних електропечей і технічно чистого азоту.

Технологія ПЕО знаходить широке застосування у машинобудуванні, авіабудуванні, медицині, зокрема під час обробки хірургічного інструменту, а також у виробництві спеціальних скоб і штифтів для лікування переломів. Крім того, цей метод може використовуватись і в декоративних цілях, оскільки зміна режимів обробки дозволяє отримувати різні кольорові відтінки поверхні деталей.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Технологія пресування, обробки та напилення на спресовані деталі електрометалізаційного покриття

У даній роботі для порівняльних досліджень використовували втулки, виготовлені з різних порошкових матеріалів. Одна втулка була отримана з композиції ШХ15 + графіт + мідь, а інша – з композиції ШХ15 + графіт. Для проведення досліджень із втулок вирізали зразки.

Зразки, отримані з втулки складу ШХ15 + графіт + мідь, надалі позначали як зразок №1, тоді як зразки з втулки, виготовленої з порошку ШХ15 + графіт, позначали як зразок №2 (рисунок 2.1).

Порошкову суміш перемішували у змішувачі протягом чотирьох годин, після чого сталевий порошок пресували у прес-формі впродовж однієї хвилини.



Рисунок 2.1 – Спресовані деталі зі складу порошкової суміші:

- а) ШХ15 + графіт + мідь;
- б) ШХ 15+графіт

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після пресування заготовки поміщали в індукційну піч, де проводили спікання при температурі 1200 °С. Отримані втулки застосовуються у машинобудуванні, де в процесі експлуатації піддаються впливу різних видів корозії та інтенсивному зношуванню. Для підвищення їх довговічності було прийнято рішення наносити на поверхню захисні покриття. Захисна обробка втулок здійснювалась у два етапи: спочатку наносили електрометалізаційне покриття, після чого проводили синтез покриття методом ПЕО.

У процесі електрометалізації рідка фаза, що утворюється, замикає торці електродних дротів. У результаті виникає рейкотронний ефект, суть якого полягає в дії електродинамічної сили на провідник – у даному випадку на розплав, що коротко замикає електроди. Ця сила спрямована паралельно поверхням електродів, які плавляться. Під її дією розплав викидається із міжелектродного проміжку, після чого виникає пауза і цикл повторюється.

Частота викидів розплаву залежить від швидкості подачі електродних дротів. Зі збільшенням швидкості подавання зростає і частота викидання рідкого металу. Завдяки рейкотронному ефекту порції розплаву отримують додатковий імпульс, що збільшує початкову швидкість їх польоту та покращує диспергування металу. Під час нанесення покриттів із порошкових дротів було встановлено два механізми утворення крапель із розплаву – одинарний і множинний.

Покриття отримували шляхом розпилення суцільних дротів за допомогою електродугового металізатора з модифікованою розпилювальною системою, схематичне зображення якого представлено на рисунку 2.2. Живлення металізатора здійснювали постійним струмом із використанням зварювального випрямляча типу ВДУ-505. Для очищення стисненого повітря від твердих мастильних домішок застосовували фільтр 23 – 25 – 4 – 4ХЛ4.

Нанесення покриття на спресовані зразки виконували у такій послідовності:

а) знежирення поверхні;

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- б) дробоструменева обробка;
- в) напилення покриття;
- г) контроль якості нанесення;
- д) шліфування зразків.

Дробоструменеву обробку проводили за таких режимів:

- а) тиск стисненого повітря 0,5 ... 0,6 МПа;
- б) відстань між соплом і поверхнею становила 80 ... 120 мм.

Після дробоструменевої підготовки виконували напилення за такими параметрами:

- а) сила струму 100 А;
- б) напруга 32 В;
- в) відстань від сопла до поверхні напилення 100 ... 110 мм;
- г) тиск стисненого повітря 0,6 МПа.

Поверхню спресованої втулки напилювали електродами зі сплаву Д16, хімічний склад якого наведено в таблиці 2.1.

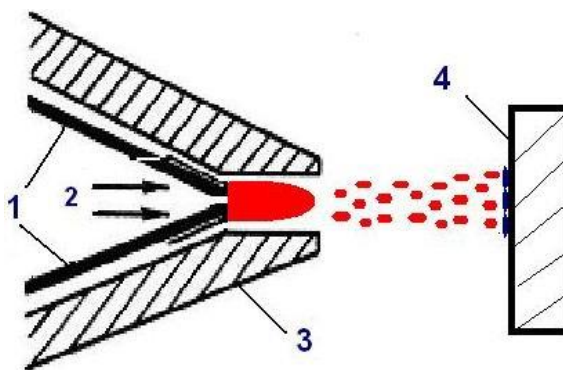


Рисунок 2.2 – Схема процесу електромателізаційного напилення покриття на підложку напилення :

- 1 – дроти;
- 2 – повітряний струмінь;
- 3 – корпус розпилювальної головки;
- 4 - підложка

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Таблиця 2.1 – Хімічний склад електроду для ПЕО після електро-металізаційного напилення спресованої деталі

Електрод	Cu	Mg	Zn	Si	Mn	Fe	Al
Д16	3,8 ... 3,9	1,2 ... 1,8	0,8	0,4 ... 0,5	0,3 ... 0,9	0,4 ... 0,5	Основа

2.2. Технологія нанесення другого шару покриття методом ПЕО

Синтез оксидокераміки на електрометалізаційне покриття проводили на установці для ПЕО (рисунок 2.3.)

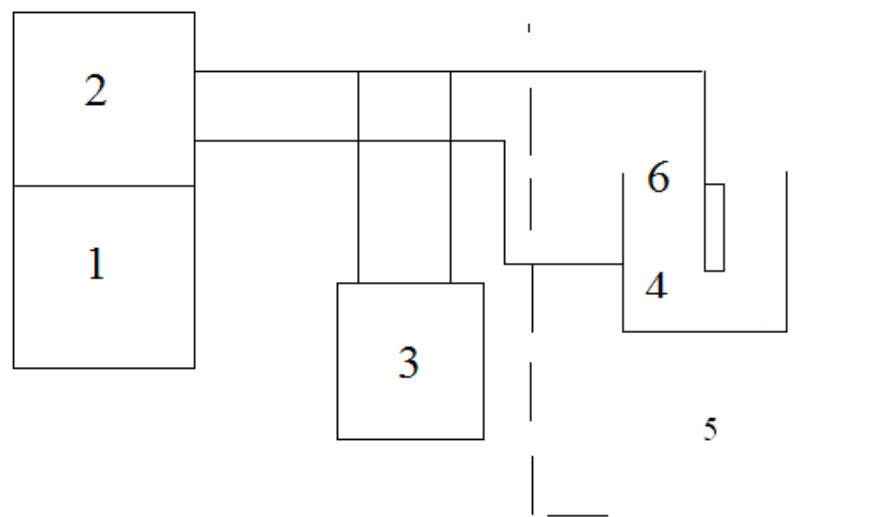


Рисунок 2.3 – Блок-схема установки для ПЕО:

- 1 – силовий блок;
- 2 – діодно-тиристорний блок для перетворення напруги;
- 3 – регулювальний і контрольний блок;
- 4 – електролітна ванна;
- 5 – система блокування;
- 6 – деталь

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Силова частина установки включає два регулятори напруги, а також два підвищувальні трансформатори. Діодно-тиристорний перетворювач складається з двох діодних мостів, тиристорних блоків, регулювального трансформатора та системи керування.

У результаті імпульсної подачі струму та постійної подачі напруги на зразок і електролітну ванну після пробою природної оксидної плівки навколо дослідного зразка утворюється плазма (рисунок 2.4), у якій відбуваються складні плазмохімічні реакції.

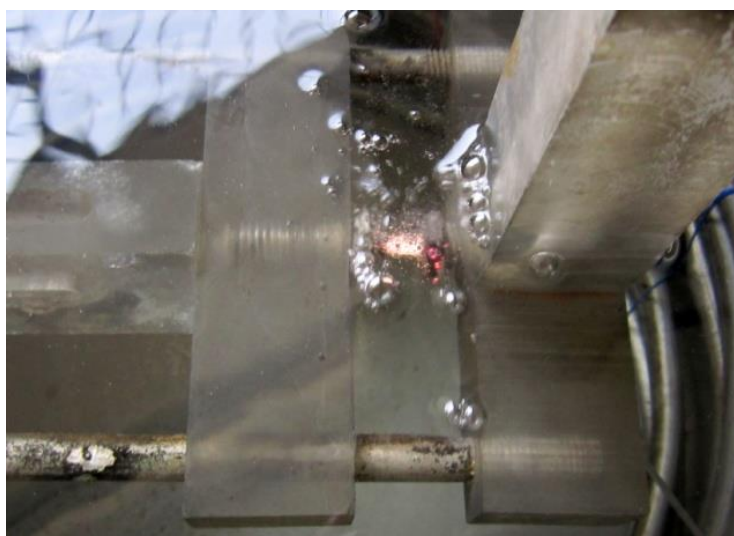


Рисунок 2.4 – Плазма, яка спостерігається навколо зразка в процесі ПЕО

Процес синтезу покриття проходить у кілька послідовних етапів:

- а) звичайне анодування при невеликих значеннях напруги;
- б) формування розрядного каналу;
- в) утворення газопарової бульбашки;
- г) згасання іскрового каналу та руйнування газопарової бульбашки.

Було запропоновано схему розподілу речовини та електричного заряду в парогазовій бульбашці, у межах якої може міститися певна кількість водню.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Для синтезу оксидокерамічного покриття електроліт готували на основі дистильованої води. До його складу входили 3 г/л КОН та 2 г/л рідкого скла.

У результаті проведення процесу було отримано покриття, зовнішній вигляд якого представлений на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Втулка після нанесення ПЕО-покриття

Анодно-іскрове оксидування виконували за таких режимів синтезу: густина струму $I_a/I_k = 20/20$ А/дм²; тривалість синтезу для зразка №1 становила $\tau = 80$ хв, а для зразка №2 $\tau = 150$ хв. Площа досліджуваних зразків відповідно дорівнювала 0,17 м² та 0,2 м².

2.3. Методика мікрааналізу

Металографічний аналіз виконували за допомогою металографічного мікроскопа МИМ-10 на мікрошліфах, підготовлених у лабораторіях кафедри матеріалознавства, використовуючи різні збільшення. Травник готували на основі плавикової кислоти.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Зразки вирізали з тих ділянок втулок, які становили найбільший дослідницький інтерес. Для забезпечення прямолінійності поверхні їх заторцьовували за допомогою абразивного круга або напилка.

Шліфування проводили з метою усунення рисок. Процес здійснювали вручну. Для попереднього (чорнового) шліфування використовували абразивний папір із зернистістю №120, 400, 600 та 800, а для чистового – №1000 і 2000.

Полірування також виконували вручну із застосуванням алмазних паст різної зернистості. Під час полірування зразок періодично повертали для забезпечення рівномірної обробки поверхні. Після завершення полірування шліфи ретельно промивали спиртом.

Для виявлення мікроструктури металу відполіровані шліфи піддавали травленню 0,5 ... 3 % спиртовим розчином плавикової кислоти HF. Поліровану поверхню занурювали в реактив приблизно на 5 ... 15 сек., після чого мікрошліф промивали водою та висушували фільтрувальним папером. Дослідження структури зразків проводили на мікроскопі МИМ-10.

Для металографічного аналізу було обрано зразки, анодовані протягом 80 та 150 хв., які після обробки промивали проточною та дистильованою водою. Характеристики ПЕО-покриттів порівнювали з параметрами звичайних анодних покриттів.

Мікроскопічні дослідження виконували у світлому полі при прямому та косому освітленні, у темному полі, в поляризованому світлі, а також із використанням методів фазового контрасту та інтерференції. Оптична система мікроскопа забезпечувала стандартні збільшення для візуального спостереження, фотографування на фотопластинки та виведення зображення на екран. Крім того, мікроскоп дозволяв здійснювати фотографування об'єктів на фотоплівку.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4. Методика визначення твердості та товщини комбінованих покриттів

Для дослідження мікротвердості покриттів на спресованих втулках використовували мікротвердомір ПМТ-3.

Визначення мікротвердості здійснювали методом випробування за відновленим відбитком, який є основним методом таких досліджень. Після прикладання та зняття навантаження, а також видалення індентора, вимірювали параметри залишкового відбитка.

Тривалість дії навантаження становила не менше 10 секунд. Для вимірювання мікротвердості використовували металографічні шліфи. Дослідження проводили як на поздовжніх, так і на поперечних шліфах покриттів.

Поверхня досліджуваних зразків була попередньо відшліфована та відполірована, а за необхідності – протравлена відповідним реактивом, який описано вище. Мікрошліф закріплювали на столику таким чином, щоб досліджувана поверхня була паралельною до площини столу та орієнтованою догори. Це забезпечувалося фіксацією нижньої частини зразка в пластиліні та вирівнюванням його положення за допомогою ручного преса.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1. Мікроструктура електromеталізаційного покриття та спресованої основи зразків

У мікроструктурі зразка № 1, вирізаного зі втулки, спресованої з порошків, склад яких описано в розділі 2, спостерігаються включення міді (червоні ділянки), графіту (чорні ділянки) та фериту (світлі ділянки) (рисунок 3.1 а).

Після електродугового напилення встановлено, що межа нанесеного електromеталізаційного покриття є рівною та чітко вираженою (рисунок 3.1 б). Це свідчить про шаруватість електromеталізаційного покриття з основою.



а)



б)

Рисунок 3.1 – Мікроструктура зразка № 1 до травлення:

а) спресована основа, $\times 100$;

б) область електromеталізаційного покриття, $\times 100$

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На мікрозображеннях, отриманих при більшому збільшенні, добре простежується рівна межа напиленого шару, яка повторює контури зерен основного металу (рисунок 3.2). При цьому графітові включення розподілені в основі зразка не рівномірно.



а)



б)

Рисунок 3.2 – Мікроструктура зразка № 1 після електрометалізаційного напилення до травлення за різних збільшень:

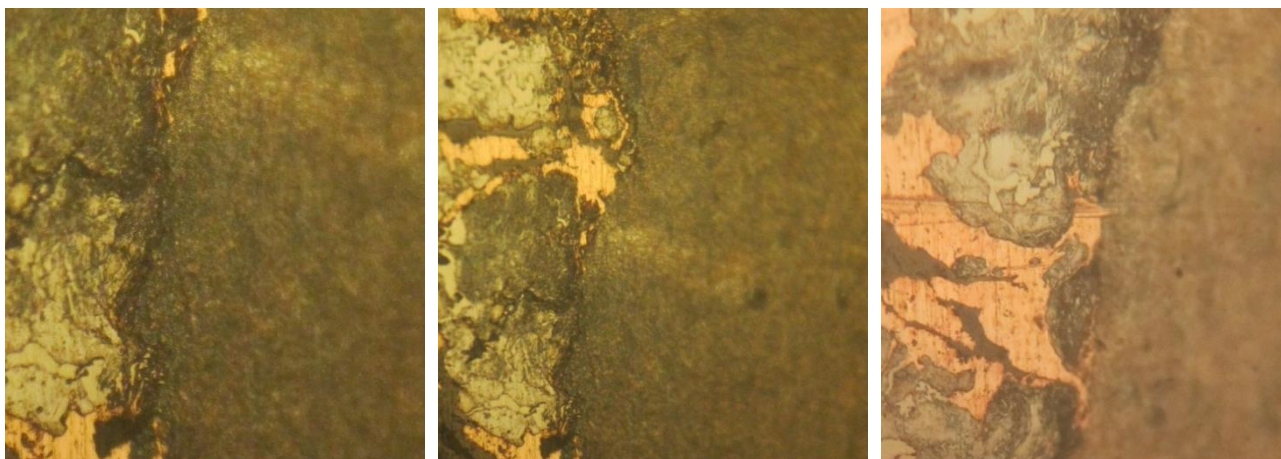
а) $\times 250$;

б) $\times 400$

Під час травлення мікрошліфа найбільш інтенсивному розчиненню піддаються межі зерен. Структура основного металу після обробки практично не змінилася, тоді як структура електрометалізаційного покриття стала темнішою та більш однорідною (рисунок 3.3). Після травлення межа між покриттям і основним металом зразка проявилася значно чіткіше.

Границя між основою зразка та покриттям прослідковується на всіх граничних фазах основи, незалежні від того чи в приповерхневій зоні міститься мідь чи ферит або перліт.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)

б)

в)

Рисунок 3.3 – Мікроструктура зразка № 1 після травлення:

а) $\times 100$;б) $\times 250$;в) $\times 400$

Структура покриття є однорідною, проте містить деякі домішки, які мають вигляд темних ділянок на мікрофотографіях.

У структурі зразка № 2, який вирізався зі спресованої втулки, виготовленої за другим режимом, спостерігаються незначні включення графіту (рисунок 3.4), при цьому сама структура є більш однорідною.



а)



б)

Рисунок 3.4 – Мікроструктура зразка:

а) основа зразка № 2, $\times 100$;б) снова зразка № 2 з електрометалізаційним покриттям, $\times 100$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

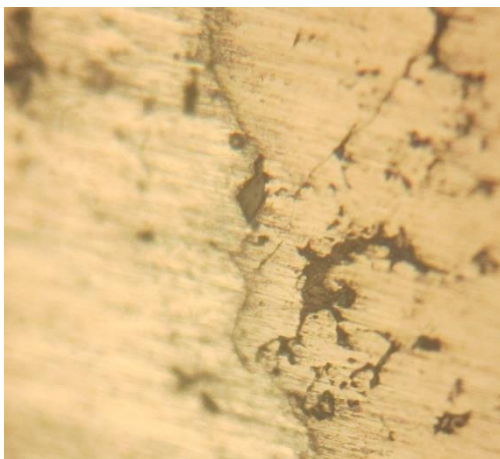
БР 2426.00.000 ПЗ

Арк.

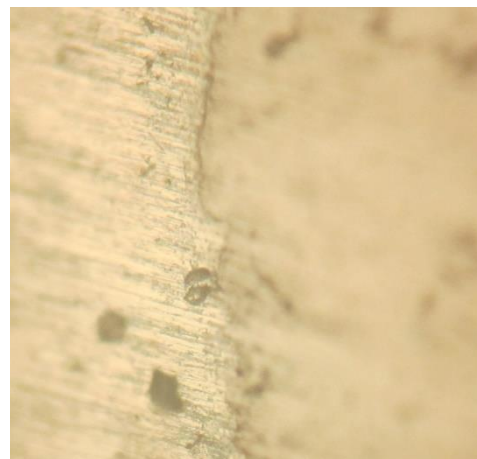
34

Границя розділу між покриттям та основою також є чіткою.

Перехідна зона між електрометалізаційним покриттям і основним металом має невелику ширину, що свідчить про недостатньо високий рівень адгезії покриття (рисунок 3.5).



а)



б)

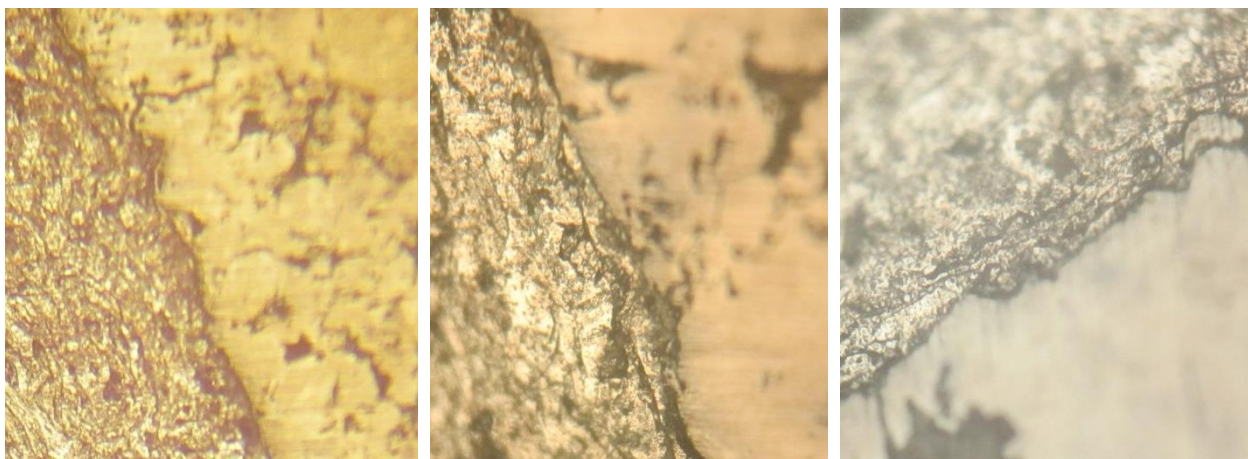
Рисунок 3.5 – Мікроструктура зразка після електрометалізаційного напилення:

а) $\times 250$;

б) $\times 400$

Після травлення зразка № 2 спостерігається структура електрометалізаційного покриття. Виявлено, що вона є ламелярною (рисунок 3.6). Також помітно, що напилений шар безпосередньо поблизу межі є дещо темнішим.

При більшому збільшенні добре проглядається мікроструктура електродугового покриття.



а)

б)

в)

Рисунок 3.6 – Мікроструктура зразка після травлення:

а) $\times 100$;

б) $\times 250$;

в) $\times 400$

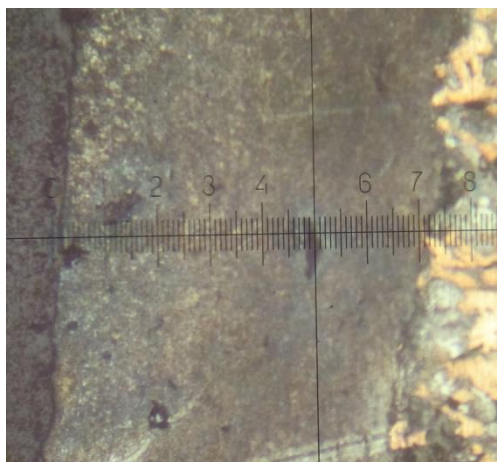
Напрямок лямелів відповідає ходу електродів при електродуговому нанесенні покриттів на спресовану поверхню. Пригранична зона між покриттям та основою зразка не має зміненої структури та є оплавленою.

3.2. Товщина напиленого покриття на зразках зі втулок, спресованих за різних режимів

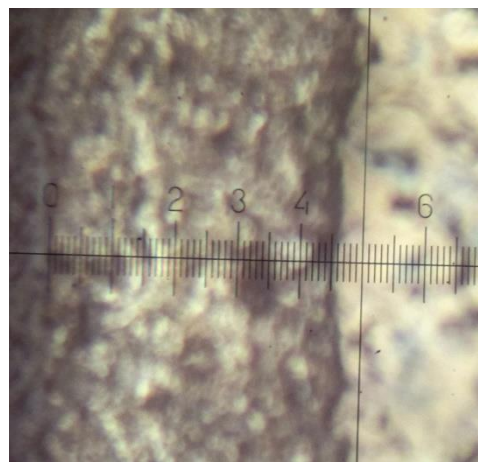
Однією з важливих характеристик покриття є його товщина. Визначення товщини електродугового напиленого шару проводили за допомогою металографічного мікроскопа МИМ-10. Значення товщини встановлювали як середнє арифметичне кількох вимірювань.

Товщину електрометалізаційного покриття для зразка №1 вимірювали у трьох різних точках. Отримані значення становили 83 мкм, 78 мкм та 86 мкм. Середня товщина покриття дорівнювала 82,8 мкм (рисунок 3.7).

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36



а)



б)

Рисунок 3.7 Товщина напиленого електрометалізаційного покриття:

а) зразка № 1, $\times 100$;

б) зразка № 2, $\times 100$

Аналогічним способом визначали товщину покриття зразка №2. У цьому випадку результати вимірювань становили 43 мкм, 49 мкм та 45 мкм, а середнє значення товщини – 45,6 мкм.

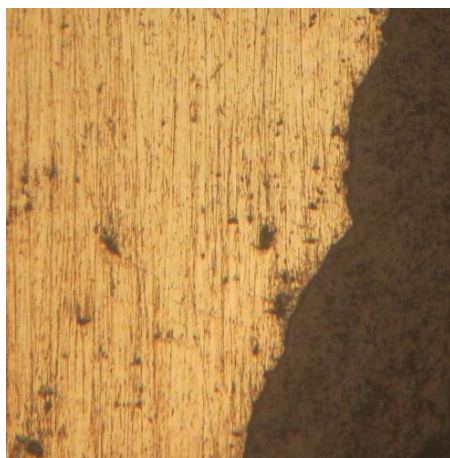
3.3. Мікроструктура ПЕО-покриття

Мікроструктура плазмоелектролітично окисдованих покриттів характеризується достатньою однорідністю та наявністю певної пористості (рисунок 3.8 а). Після травлення чіткіше проявляється межа між електрометалізаційним шаром і покриттям, сформованим у результаті плазмоелектролітичного оксидування.

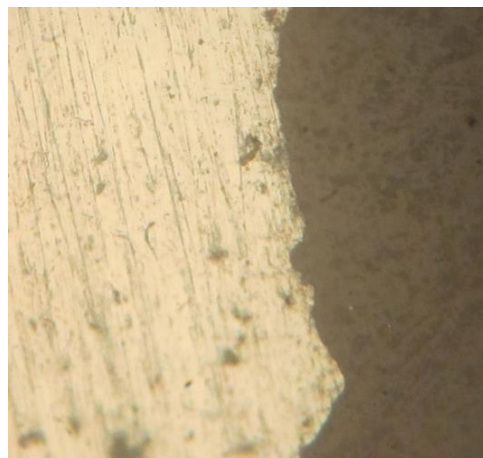
Після проведення травлення добре простежується границя розподілу між електродуговим і оксидокерамічним покриттями. Правий край електродугового шару має світліший відтінок порівняно з лівим, що пояснюється окиснювальними процесами, які відбуваються під час синтезу. Крім того, значне підвищення температури спричиняє структурні зміни в

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

напиленому покритті. Для оксидокерамічного шару характерна відсутність чітко виражених зерен.



а)



б)

Рисунок 3.8 – Мікроструктура оксидокерамічного покриття на напиленому електрометалізаційному шарі:

а) $\times 250$;

б) $\times 400$

Мікроструктура оксидокерамічного покриття відзначається високою однорідністю. Межа між електродуговим і плазмоелектролітним покриттями є чіткою та не зовсім рівно. Мікроструктурний аналіз показав, що структури таких покриттів абсолютно різняться.

Поверхня покриття має рельєфний та об'ємний вигляд, що є наслідком інтенсивних окиснювальних процесів, які відбуваються під час синтезу. Характер цих процесів залежить від сили струму, складу електроліту та тривалості синтезу. Також мікроструктура покриття характеризується відсутністю виражених зерен.

Після травлення межа між шарами покриття стає ще більш чіткою. На рисунках 3.9 та 3.10 представлені мікрозображення ПЕО-покриття на електрометалізаційному, виконані на мікрошліфах зразків № 1 та № 2. У

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

приповерхневій зоні покриття спостерігається світліший відтінок, тоді як крайова частина є значно темнішою. Це пояснюється тим, що на початковому етапі синтез відбувається повільно, а після електричного пробою його швидкість істотно зростає.

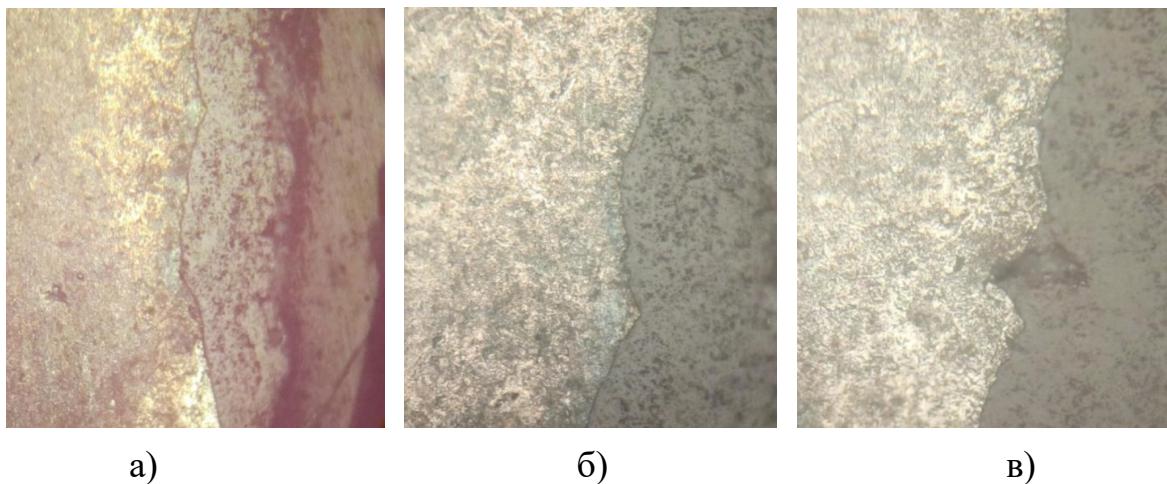


Рисунок 3.9 – Мікроструктура оксидокерамічного покриття на напиленому електрометалізаційному шарі після травлення (зразок № 1):

а) $\times 100$;

б) $\times 250$;

в) $\times 400$

Спостерігається ламелярна структура електромателізаційного покриття для двох зразків та керамічна (без зерен) з включеннями компонентів, яка характерна для оксидокераміки.

Очевидно, що включення в ПЕО-покритті містять компоненти електроліту. Саме такі включення і задають вихідна властивості таким покриттям. Мікроструктурний аналіз дає можливість оцінити межу розділу між двома покриттями, які в об'єднаному розумінні називають комбінованими. Межа розділу між двома покриттями має дещо хвилястий вигляд, що означає оплавлення поверхні електрометалізаційного покриття в процесі плазмоелектролітного оксидування.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

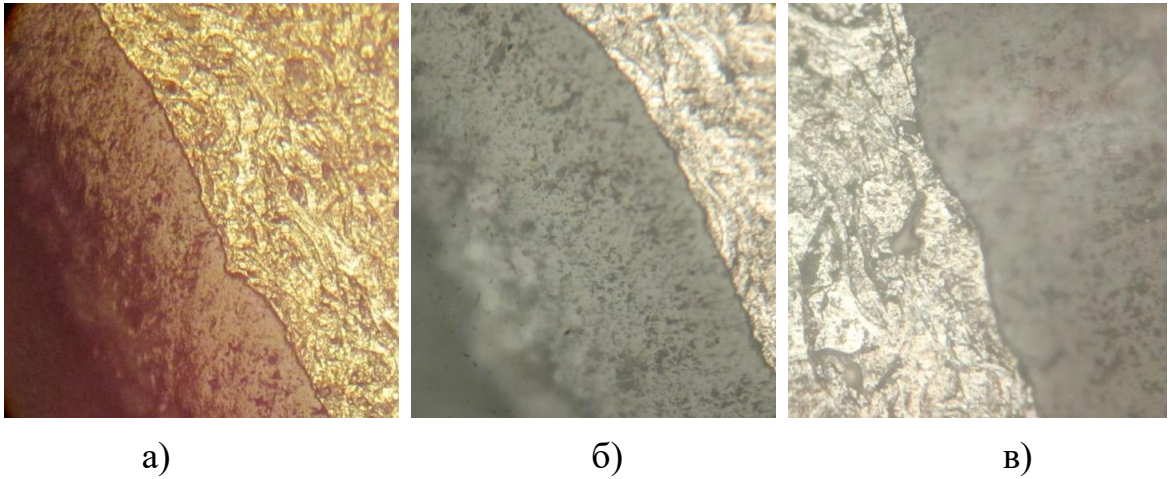


Рисунок 3.10 – Мікроструктура оксидокерамічного покриття на напиленому електрометалізаційному шарі після травлення (зразок № 2):

а) $\times 100$;

б) $\times 250$;

в) $\times 400$

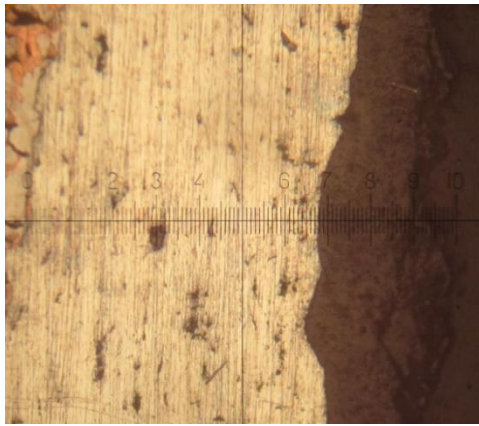
Проведений мікроструктурний аналіз не дає можливості оцінити приграничну область між покриттями, яка є дуже важливою для розуміння процесу ПЕО та ймовірного прогнозування залежності властивостей покриттів від робочих параметрів їх нанесення.

3.4. Встановлення товщини комбінованих захисних покриттів

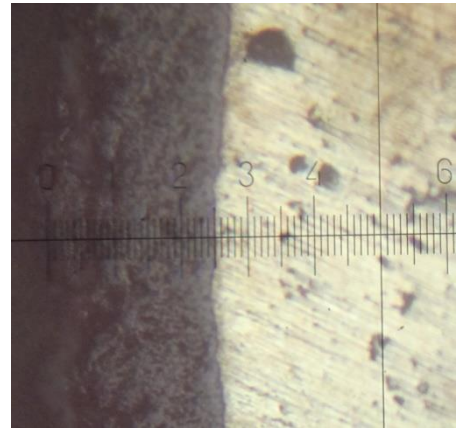
Дослідження товщини комбінованого покриття, утвореного на поверхнях спресованих втулок різного складу представлено на рисунках 3.11 та 3.12.

Результати проведених досліджень показали, що середня товщина електродугового покриття для зразка №1 становить 82,3 мкм, тоді як середня товщина сформованого оксидокерамічного шару дорівнює 25 мкм (рисунок 3.11). Таким чином, сумарна середня товщина комбінованого захисного покриття зразка №1 складає 107,3 мкм.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)

Рисунок 3.11 – Дослідження товщини комбінованого покриття (зразок № 1):

а) напиленого електрометалізаційного покриття, $\times 100$;

б) оксидокерамічного покриття, $\times 100$

Для зразка №2 середня товщина електродугового покриття становила 45,6 мкм, а товщина оксидокерамічного шару також дорівнювала 25 мкм (рисунок 3.12). Відповідно, загальна середня товщина комбінованого захисного покриття цього зразка становить 67,6 мкм.

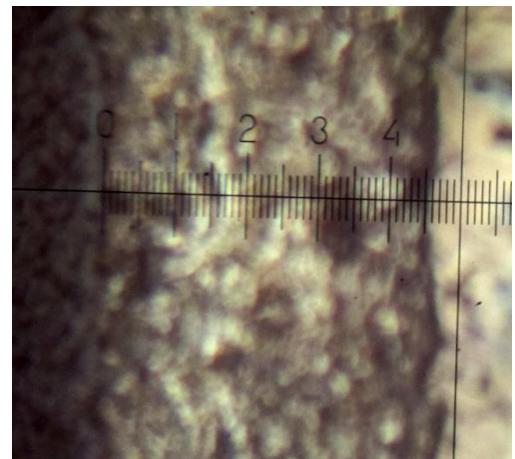
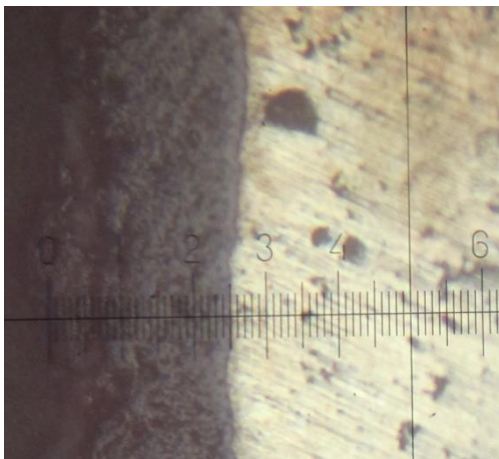


Рисунок 3.12 – Зображення товщини (зразок № 2):

а) оксидокерамічного покриття, $\times 100$;

б) напиленого електрометалізаційного покриття, $\times 100$

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Графічна залежність товщини покриттів від способу їх нанесення наведена на рисунку 3.13. Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що товщина електродугового шару є значно більшою порівняно з товщиною плазмоелектролітичного оксидокерамічного покриття.

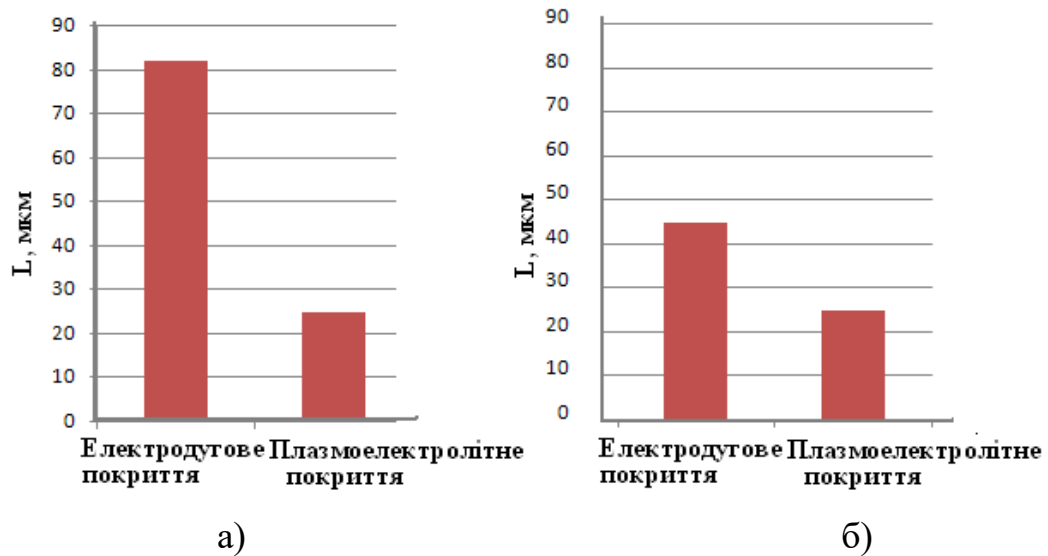


Рисунок 3.13 – Графічна залежність товщини покриття від методу нанесення:

а) зразок № 1;

б) зразок № 2

Це пояснюється особливостями механізму формування кожного із шарів. Під час електродугового напилення відбувається інтенсивне осадження розплавлених частинок металу на поверхню втулки, внаслідок чого формується порівняно товстий металевий шар. У процесі плазмоелектролітичного оксидування, навпаки, оксидокерамічне покриття утворюється переважно за рахунок електрохімічних та плазмохімічних реакцій у приповерхневому шарі, тому його товщина є меншою.

Порівняння результатів для двох досліджуваних зразків також показало, що склад матеріалу спресованої втулки суттєво впливає на

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

параметри сформованого покриття. Для зразка №1, який містив мідь у складі порошкової композиції, товщина електрометалізаційного покриття виявилась майже вдвічі більшою, ніж у зразка №2. Це може бути пов'язано з відмінностями у теплопровідності, електропровідності та структурних особливостях основного матеріалу, які впливають на умови формування покриття та процес закріплення розплавлених частинок на поверхні.

Крім того, товщина комбінованого покриття є важливим експлуатаційним параметром, оскільки вона безпосередньо впливає на зносостійкість, корозійну стійкість та довговічність деталі. Наявність електродугового шару забезпечує ефективний захист основного металу від механічного зношування, тоді як оксидокерамічний шар підвищує твердість поверхні та покращує її стійкість до корозійних процесів. Саме поєднання цих двох типів покриттів дозволяє отримати багат шарову захисну систему з покращеними функціональними характеристиками.

Отримані результати підтверджують доцільність використання комбінованих захисних покриттів для деталей машинобудування, які працюють в умовах інтенсивного тертя, зношування та впливу агресивних середовищ.

Отримані результати дають можливість зрозуміти необхідність підбору складу матеріалу для прогнозування товщини покриття, так як виявлено, що на цей параметр сильно впливає хімічний склад матеріалу підложки.

3.5. Мікротвердість комбінованих покриттів на спресованих підложках

Мікротвердість досліджуваних покриттів визначали за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3. Для підвищення точності результатів на кожному покритті виконували декілька вимірювань, після чого значення мікротвердості розраховували за формулою визначення мікротвердості. На

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

початковому етапі досліджень визначали мікротвердість основного металу втулок, а далі – електрометалізаційного та оксидокерамічного покриттів.

На рисунку 3.14 показано відбитки від індентора при дослідженнях, проведених на мікротвердість основи та покриття.

Для зразка №1 значення мікротвердості основного металу становили 858, 894 та 792 кг/мм². Середнє значення мікротвердості основного металу дорівнювало 848 кг/мм².

Після цього було проведено вимірювання мікротвердості електрометалізаційного покриття. Отримані результати становили 591,78; 455,5; 553,6 та 668,7 кг/мм². Середнє значення мікротвердості електродугового покриття склало 567,4 кг/мм².



а)



б)

Рисунок 3.14 – Відбитки індентора при визначенні мікротвердості:

а) на підложці та на електрометалізаційному покритті, $\times 100$;

б) на електрометалізаційному покритті, $\times 250$

Аналогічно визначали мікротвердість оксидокерамічного шару (рисунок 3.15). Значення мікротвердості для цього покриття становили 4256,1; 6358; 10510,2 та 20600 кг/мм². Середнє значення мікротвердості оксидокерамічного покриття дорівнювало 10431 кг/мм².

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44



Рисунок 3.15 – Відбитки індентора при визначенні мікротвердості ПЕО-покриття, $\times 250$

Отримані результати свідчать про суттєве підвищення мікротвердості після проведення плазмоелектролітичного оксидування. Якщо електрометалізаційний шар характеризується порівняно помірними значеннями твердості, то оксидокерамічне покриття має надзвичайно високі показники мікротвердості, що пояснюється формуванням твердих оксидних фаз у процесі синтезу.

Для зразка №2 спочатку також визначали мікротвердість основного металу (рисунок 3.16).

Отримані значення становили 473, 459 та 824 кг/мм², а середнє значення дорівнює 585 кг/мм².

Під час вимірювання мікротвердості електрометалізаційного покриття були отримані значення 840,7; 334,3 та 386,5 кг/мм². Середня мікротвердість електродугового покриття для цього зразка становила 520,5 кг/мм².

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

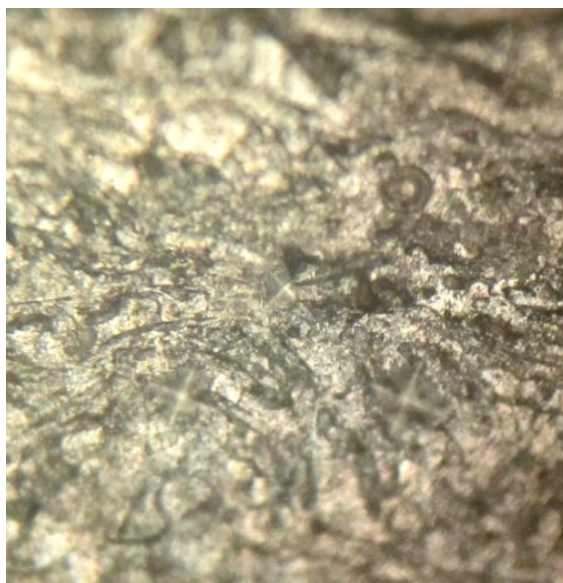


Рисунок 3.16 – Відбиток індентора при визначенні мікротвердості ПЕО-покриття, $\times 250$

Мікротвердість оксидокерамічного покриття визначалася аналогічним способом. Отримані значення становили 4256,1; 17024,8; 10510,2 та 5706,4 кг/мм². Середнє значення мікротвердості оксидокерамічного шару становить 9374,2 кг/мм².

Порівняння результатів для обох зразків показує, що після нанесення комбінованого захисного покриття спостерігається значне підвищення твердості поверхневого шару. Найвищі значення мікротвердості характерні саме для оксидокерамічних покриттів, отриманих методом плазмоелектролітичного оксидування. Це пояснюється утворенням високоміцних оксидних структур, які забезпечують підвищену зносостійкість і покращені експлуатаційні властивості поверхні.

Отримані результати також свідчать про вплив складу основного матеріалу на характеристики сформованих покриттів. Втулка, виготовлена з порошкової композиції ШХ15 + графіт + мідь, характеризувалася вищими показниками мікротвердості основного металу та комбінованого покриття порівняно із зразком, що містив лише ШХ15 і графіт. Це може бути

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

пов'язано з впливом міді на структуру матеріалу та особливості формування захисних шарів під час електродугового напилення і плазмоелектролітичного оксидування.

3.6. Співзалежність мікротвердості покриття з його товщини

Дослідження зміни твердості від товщини покриття представлено в таблиці 3. 1 для зразка № 1 та в таблиці 3.2 для зразка № 2.

Таблиця 3.1 – Залежність мікротвердості покриття від товщини зразка № 1

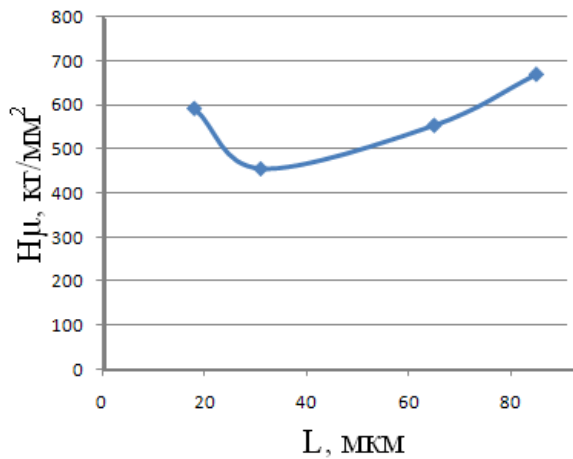
Товщина L ,мкм	18	31	65	85	91	98
Мікротвердість, Н _μ , кг/мм ²	592	456	554	669	20600	10510

На рисунку 3.17 а предсталено графічну залежність значень зміни мікротвердості по товщині електрометалізаційного покриття та на рисунку 3.17 б – по товщині ПЕО-покриття.

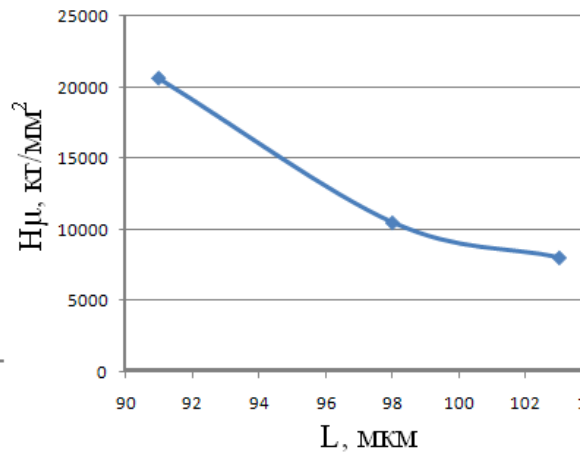
На початковій ділянці електрометалізаційного покриття мікротвердість є найбільшою і становить близько 592 кг/мм². Із подальшим збільшенням товщини покриття спостерігається певне зниження мікротвердості, однак надалі її значення знову починають зростати. Така зміна може пояснюватися неоднорідністю структури напиленого шару, особливостями формування окремих частинок розплаву та зміною ступеня ущільнення покриття по товщині.

Для оксидокерамічного шару характерне значно вище значення мікротвердості. Максимальна мікротвердість покриття досягається на товщині близько 91 мкм і становить 20600 кг/мм².

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47



а)



б)

Рисунок 3.17 – Графік зміни мікротвердості по товщині покриття (зразок № 1):

а) електрометалізаційного;

б) ПЕО-покриття

Після досягнення цього максимуму спостерігається поступове зниження мікротвердості. Імовірно, це пов'язано зі збільшенням пористості покриття, появою внутрішніх напружень та зміною фазового складу оксидокерамічного шару в процесі його росту.

Для другого зразка на початковій стадії електрометалізаційного покриття мікротвердість становила 841 кг/мм² (таблиця 3.2). Із збільшенням товщини покриття значення мікротвердості поступово зростало, що свідчить про формування більш щільної та зміцненої структури поверхневого шару (ПЕО-покриття), що спостерігається на рисунку 3.18.

Таблиця 3.2 – Залежність мікротвердості покриття № 2 від товщини

Товщина, мкм	10	26	36	52	58	64
Мікротвердість, Нμ, кг/мм²	841	334,4	387	4256	17025	10510

Максимальне значення мікротвердості оксидокерамічного покриття для цього зразка було зафіксовано на товщині 58 мкм і становило 17025 кг/мм². Подальше збільшення товщини супроводжувалося зменшенням мікротвердості покриття. Таке зниження може бути зумовлене розвитком мікропористості, локальними дефектами структури та нерівномірним перебігом плазмохімічних процесів під час синтезу.

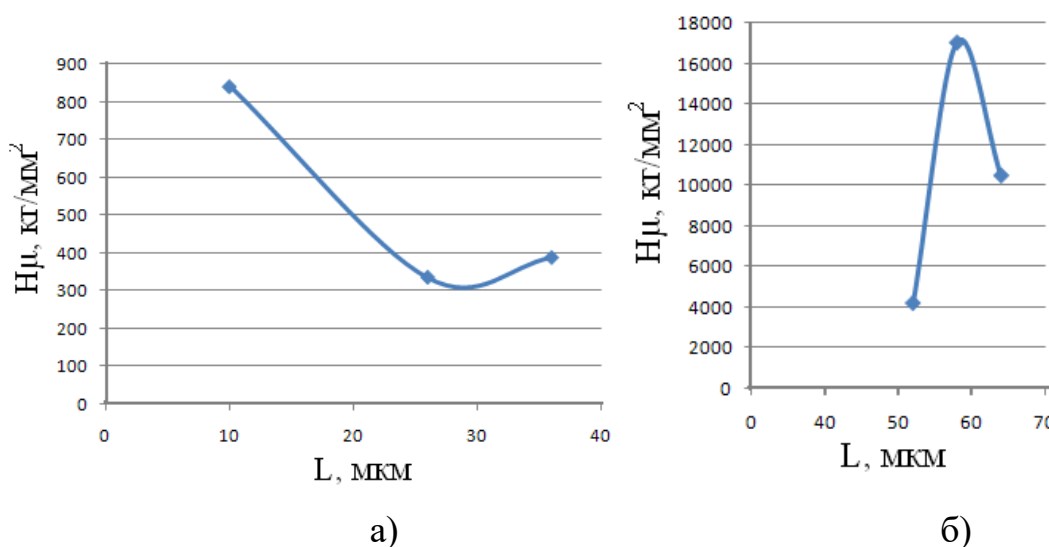


Рисунок 3.18 – Графік залежності мікротвердості покриття від його товщини (зразок № 2):

- а) електрометалізаційного покриття;
- б) ПЕО-покриття

Отримані результати свідчать про те, що мікротвердість комбінованих покриттів значною мірою залежить не лише від хімічного складу матеріалу, а й від товщини сформованого шару та умов його синтезу. Найвищі показники мікротвердості характерні саме для оксидокерамічних покриттів, що підтверджує ефективність плазмоелектролітичного оксидування як методу поверхневого зміцнення. Формування високоміцних оксидних фаз забезпечує суттєве підвищення зносостійкості та довговічності деталей, які працюють в умовах інтенсивного тертя й агресивних середовищ.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ВИСНОВКИ

У даній роботі проведено дослідження комбінованих захисних покриттів, сформованих методом електрометалізації та подальшого плазмоелектролітичного оксидування. У результаті виконаних експериментальних досліджень встановлено, що після нанесення електрометалізаційного покриття мікротвердість поверхневого шару дещо знижується. Це, ймовірно, пов'язано з хімічним складом покриття, основним компонентом якого є алюміній, що характеризується нижчою твердістю порівняно з основним матеріалом втулки.

Водночас після проведення плазмоелектролітичного оксидування мікротвердість поверхні значно зростає. Встановлено, що мікротвердість оксидокерамічного покриття перевищує мікротвердість основної матриці у 12 ... 16 разів, а порівняно з електрометалізаційним покриттям – майже у 18 разів. Таке суттєве підвищення твердості пояснюється формуванням високоміцних оксидних фаз у процесі синтезу покриття.

Дослідження також показали, що на товщину сформованих покриттів істотно впливає хімічний склад матеріалу спресованої втулки. Було встановлено, що електрометалізаційне покриття, нанесене на втулку, яка містить мідь, формується приблизно у два рази тоншим порівняно з покриттям на втулці без міді. Ймовірно, це зумовлено відмінностями у теплофізичних та електрофізичних властивостях матеріалів, які впливають на процес осадження розплавлених частинок.

Разом із тим встановлено, що товщина плазмоелектролітичного оксидокерамічного шару, сформованого в лужному електроліті, для обох типів втулок практично однакова. Це свідчить про те, що процес плазмоелектролітичного оксидування меншою мірою залежить від складу основного металу, ніж електродугове напилення.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Експериментально підтверджено, що хімічний склад основного металу впливає також і на мікротвердість сформованих покриттів. Так, мікротвердість електрометалізаційного покриття, нанесеного на втулку з вмістом міді, становить близько 567 кг/мм^2 , тоді як для покриття, нанесеного на втулку без міді, цей показник є дещо нижчим і становить приблизно 520 кг/мм^2 .

Ще більш помітна різниця спостерігається для плазмоелектролітичних покриттів. Мікротвердість оксидокерамічного шару, синтезованого на втулці з міддю, виявилась приблизно на 1057 кг/мм^2 вищою, ніж у покриття, сформованого на втулці без міді. Це може бути пов'язано з особливостями формування структури оксидного шару та впливом міді на перебіг плазмохімічних реакцій під час синтезу.

У процесі дослідження розподілу мікротвердості по товщині комбінованих покриттів встановлено, що вона є неоднорідною та змінюється залежно від глибини шару. Для електрометалізаційного покриття найменші значення мікротвердості спостерігаються у центральній частині шару. При наближенні до межі між електрометалізаційним та плазмоелектролітичним покриттями мікротвердість поступово зростає.

Для плазмоелектролітичного покриття характер зміни мікротвердості є дещо іншим. У зразка №1 мікротвердість по товщині поступово зменшується від максимального значення близько 20600 кг/мм^2 до 8700 кг/мм^2 . Це може пояснюватися збільшенням пористості та зміною фазового складу оксидокерамічного шару.

Для зразка №2 залежність має інший характер: на межі між електрометалізаційним та плазмоелектролітичним покриттями мікротвердість є мінімальною, після чого на відстані близько 58 мкм вона зростає до максимального значення, а далі знову зменшується. Подібний характер розподілу мікротвердості, ймовірно, пов'язаний з утворенням більш рихлого поверхневого шару в процесі синтезу оксидокерамічного покриття.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Отримані результати підтверджують ефективність застосування комбінованих захисних покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей машинобудування, які працюють в умовах інтенсивного тертя, зношування та впливу агресивних середовищ.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Степанчук А.М. Теорія і технологія пресування порошкових матеріалів / – К.: ЦУЛ, 2019. – 336.
2. Степанчук А.М. Матеріали для напилювання покриттів. – К.: ЦУЛ, 2019. – 236.
3. Satke W. Neuse Erkenntnisse uber Einflubgroben bein Lichtbogenspritzen // Zis-mitt. – 1987. – 29, № 9. – P.936-942.
4. Клапків М.Д. Моделювання синтезу оксидокерамічних покриттів у розрядних каналах системи „метал-електроліт” //Фіз.-хім. механіка матеріалів.-1999.-№2.-с.111-116.
5. Milewski W. Elektrometalizacja.—Warszawa :WNT, 1968. 250 s.
6. Kaczmar V.,Babiak Z., Szule T. Kompozytowe druty Ni-Al do natryskiwania lukowego// Powl. Ochr. – 1988. – 16, № 5-6. – S. 2-7.
7. V.S. Saji, Superhydrophobic surfaces and coatings by electrochemical anodic oxidation and plasma electrolytic oxidation, Adv. Colloid Interface Sci. 283 (2020), 102245.
8. О. М. Берднікова, Ю. М. Тюрін, О. В. Колісніченко, О. С. Кушнарєва, Є. В. Половецький, Є. П. Тітков, Л. Т. Єремєєва. Нанорозмірні структури детонаційних металокерамічних покриттів системи Ni–Cr–Fe–B–Si. Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii 2022, т. 20, № 1, с. 97–109.
9. Calderon Moreno, J.M.; Osiceanu, P.; Vasilescu, C.; Anastasescu, M.; Drob, S.I.; Popa, M. Obtaining, structural and corrosion characterization of anodized nanolayers on Ti-20Zr alloy surface. Surf. Coat. Technol. 2013, 235, 792–802.
10. Rai, P.; Mehrotra, S.; Priya, S.; Gnansounou, E.; Sharma, S.K. Recent advances in the sustainable design and applications of biodegradable polymers. Bioresour. Technol. 2021, 325, 124739.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

11. Жаротривкість електродугових покриттів з порошкового дроту системи FeCrBAl / В.І. Похмурський, М.М. Студент, Б. Форманек та ін. // Там же. – 2003.-№6. – с.61-65.

12. Клапків М.Д., Никифорович Г.М., Посувайло В.М. Спектральний аналіз електролітної плазми в умовах синтезу оксиду алюмінію // Фіз.-хім. механіка матеріалів.—1994.-№ 3.—С. 70-81.

13. Kuat Kombayev, Fuad Khoshnaw, Yernat Kozhakhmetov, Gulnur Tleuzhanova, Bagdat Azamatov, Yerkezhan Tabiyeva (2025). Microplasma Sprayed Tantalum Coatings on Ti Grade 5 Extra-Low Interstitials: Investigation of Thickness and Porosity Control. *Coatings*, 15, 464. doi: [10.3390/coatings15040464](https://doi.org/10.3390/coatings15040464)

14. K.L. Choy (2003). Chemical vapour deposition of coatings. *Progress in Materials Science*, 48, 57-170. doi: [10.1016/S0079-6425\(01\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(01)00009-3).

15. Xiaopeng Lu, Carsten Blawert, Mikhail L. Zheludkevich, Karl Ulrich Kainer. Insights into plasma electrolytic oxidation treatment with particle addition. *Corrosion Science*. Vol 101, (2015), P. 201-207.

16. Стан електролітної плазми в процесі синтезу оксидокерамічних покриттів на магнієвій основі [Електронний ресурс] / В. М. Посувайло, Н. Ю. Імбірович, М. Д. Клапків, С. І. Остап'юк, Ю. М. Коваль // Наукові нотатки. - 2013. - Вип. 42. - С. 208-215. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2013_42_35

17. Klapkiv M.D., Povstyana N.Yu., Nykyforchyn H.M. Production of conversion oxide-ceramic coatings on zirconium and titanium alloys // *Materials Science* this link is disabled, 2006, 42(2), pp. 277–286.

					БР 2426.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		