

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет транспорту та механічної інженерії
(повне найменування факультету)

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки
(повна найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА РЕСУРСУ РОБОТИ ДЕТАЛЕЙ
КОНСТРУКЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З ВІДХОДІВ
ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА**

спеціальність 131 Прикладна механіка
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Прикладна механіка»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІМм-21

Гончар Андрій Васильович

(підпис)

Керівник:

д.т.н., професор

Повстяной Олександр Юрійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» _____ 2025 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *транспорту та механічної інженерії*

Кафедра *прикладної механіки та мехатроніки*

Ступінь вищої освіти: *магістр*

Галузь знань: *13 Механічна інженерія*

Спеціальність: *131 Прикладна механіка*

Освітня програма: *«Прикладна механіка»*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Р. Г. Редько

« ___ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ДРУГОГО (МАГІСТЕРСЬКОГО) РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Гончара Андрія Васильовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Підвищення експлуатаційних властивостей та ресурсу*

роботи деталей конструкційного призначення з відходів промислового виробництва

Керівник роботи: *д.т.н., професор Повстяной Олександр Юрійович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «14» червня 2025 року №391/01-07

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: «1» грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: *вступки з порошку сталі ШХ15 (відходи промислового виробництва)*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Обґрунтування вибору методу нанесення захисного покриття

2. Розробка нового захисного покриття у лабораторних умовах.

3. Моделювання процесу напилення з використанням комп'ютерно-інформаційних технологій

4. Фізико-механічні властивості плазмоелектролітно окисованих електродугових покриттів

5. Перелік графічного матеріалу :

графічний матеріал виконано у вигляді презентації, яка складається з 10 слайдів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1</i>	<i>Повстяной О.Ю.</i>		
<i>Розділ 2</i>	<i>Повстяной О.Ю.</i>		
<i>Розділ 3</i>	<i>Повстяной О.Ю.</i>		
<i>Розділ 4</i>	<i>Повстяной О.Ю.</i>		
<i>Нормоконтроль</i>			
<i>Показник запозичень тексту</i>			
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Полінкевич Р.М.</i>		

7. Дата видачі завдання 14.06.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

N з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз проблеми за темою роботи та постановка задач</i>	<i>01.09.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
2	<i>Аналіз і вибір напрямків дослідження</i>	<i>10.09.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
3	<i>Теоретичне дослідження та практична реалізація</i>	<i>20.09.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
4	<i>Опис засобів розробки об'єкта проєктування</i>	<i>01.10.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
5	<i>Загальні висновки та рекомендації</i>	<i>20.10.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
6	<i>Оформлення роботи</i>	<i>10.11.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
7	<i>Оформлення презентації</i>	<i>20.11.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
8	<i>Здача чистового варіанту кваліфікаційної роботи на кафедру</i>	<i>01.12.2025 р.</i>	<i>виконав</i>

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Гончар А. В.
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис)

Повстяной О. Ю.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Гончар А. В. Підвищення експлуатаційних властивостей та ресурсу роботи деталей конструкційного призначення з відходів промислового виробництва. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел.

Кваліфікаційна робота присвячена теоретичним питанням та експериментальним дослідженням щодо процесів підвищення експлуатаційних властивостей та ресурсу роботи деталей конструкційного призначення з відходів промислового виробництва методом нанесення комбінованого захисного покриття з використанням комп'ютерно-імітаційного моделювання. Нанесення комбінованого захисного покриття, а саме електрометалізаційного покриття із подальшим окисдуванням надало можливість захистити конструкційного призначення з відходів промислового виробництва від спрацювання та підвищити їхню довговічність практично до безкінечності (реверсивно-поступальне тертя).

Ключові слова: покриття, окисдування, електродугове покриття, плазма, імітаційне моделювання.

ABSTRACT

Gonchar A. Improving the operational properties and service life of structural parts made from industrial waste. Manuscript.

Master's qualification work OP «Applied Mechanics» specialty 131 Applied Mechanics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

Master's qualification work consists of an introduction, 4 chapters, conclusions, list of sources used.

The qualification work is devoted to theoretical issues and experimental research on the processes of improving the operational properties and service life of structural parts made from industrial waste by applying a combined protective coating using computer simulation modeling. Applying a combined protective coating, namely an electrometallization coating with subsequent oxidation, made it possible to protect structural parts made from industrial waste from wear and increase their durability almost to infinity (reverse-transitional friction).

Keywords: coating, oxidation, electric arc coating, plasma, simulation modeling.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МЕТОДУ НАНЕСЕННЯ ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ НА ДЕТАЛЯХ КОНСТРУКЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З ПОРОШКІВ, ЯКІ ОТРИМАНІ З ВІДХОДІВ ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА.....	9
1	
Суть методу ПЕО.....	14
1 1.3 Перспективні технології одержання композиційного порошку.....	17
X 1.4 Експлуатаційні характеристики захисних покриттів.....	22
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА НОВОГО ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ У ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ.....	24
a 2.1 Фізичні параметри електродугового напилення.....	24
к 2.2 Електрофізичні характеристики процесу ПЕО.....	33
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НАПИЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНО-ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	41
р 3.1 Комп'ютерне моделювання.....	41
3.2 Комп'ютерне моделювання за допомогою програмного забезпечення JavaScript.....	45
т 3.3 Моделювання захисного електрометалізаційного та ПЕО покриття...	48
РОЗДІЛ 4 ФІЗИКО–МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛАЗМОЕЛЕКТРОЛІТНО ОКСИДОВАНИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ ЗІ СПЛАВУ Д16 НА СТАЛІ.....	54
4.1 Визначення товщини комбінованих захисних покриттів.....	54
e 4.2 Встановлення мікротвердості захисних покриттів.....	58
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	65
ДОДАТКИ.....	67

ВСТУП

Актуальність теми. Однією з основних причин зниження довговічності деталей конструкційного призначення та обмеження їх експлуатаційного ресурсу в машинобудуванні є інтенсивний знос робочих поверхонь. У сучасних умовах важливим напрямом підвищення ресурсу машин і механізмів є удосконалення економічно ефективних технологій відновлення та захисту деталей із застосуванням доступних і маловартісних матеріалів за умови забезпечення високих показників надійності та довговічності відремонтованих виробів. У зв'язку з цим актуальним є впровадження комбінованих захисних покриттів, здатних істотно підвищити зносостійкість деталей в умовах реверсивного тертя.

Застосування електрометалізаційних покриттів у поєднанні з подальшим плазмоелектролітним окисдуванням створює передумови для ефективного захисту деталей типу втулок від інтенсивного спрацювання та значного збільшення їх експлуатаційного ресурсу за умов реверсивно-поступального руху. Впровадження зазначених технологій у найбільш навантажених вузлах і механізмах машин дозволяє суттєво подовжити напрацювання обладнання до ремонту або відмови, що обумовлює практичну значущість даного напрямку досліджень.

Мета і задачі дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є теоретико-експериментальне дослідження процесів нанесення комбінованих захисних покриттів з метою підвищення експлуатаційних властивостей та ресурсу роботи деталей конструкційного призначення з використанням методів комп'ютерно-імітаційного моделювання.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз сучасних методів захисту поверхонь деталей конструкційного призначення, виготовлених із порошків відходів промислового виробництва, та дослідити технологічні процеси нанесення покриттів, що відповідають сучасним експлуатаційним вимогам.

2. Здійснити комп'ютерно-імітаційне моделювання процесу нанесення захисних покриттів з можливістю визначення основних технологічних параметрів, зокрема часу напилення, товщини шару та рівня пористості.

3. Розробити сучасне зносо- та корозійностійке комбіноване покриття для деталей конструкційного призначення з використанням відходів промислового виробництва.

4. Провести комплексне теоретичне та експериментальне дослідження процесу виготовлення конкурентоспроможних порошкових деталей типу втулок і всебічно оцінити їх експлуатаційні властивості.

Об'єкт і предмет дослідження.

Об'єктом дослідження є порошкові втулки зі сталі ШХ15 з нанесеними захисними покриттями різного типу.

Предметом дослідження є електрофізичні, технологічні та експлуатаційні характеристики процесів електрометалізації та плазмоелектролітного оксидування з використанням елементів комп'ютерно-імітаційного моделювання.

Методи дослідження. Дослідження електрофізичних характеристик процесу синтезу оксидних комбінованих покриттів виконувалися у науковій спеціалізованій лабораторії кафедри матеріалознавства ЛНТУ. Аналіз мікроструктури покриттів проводили за допомогою металографічного

мікроскопа, а визначення мікротвердості — із застосуванням мікротвердоміра ПМТ-3.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розроблено та реалізовано методику нанесення електродугових і плазмоелектролітно оксидованих покриттів на деталі конструкційного призначення.

2. Досліджено експлуатаційні властивості комбінованих захисних покриттів, нанесених на порошкові втулки, синтезовані за різних технологічних режимів.

3. Здійснено комп'ютерне моделювання процесу напилення захисних покриттів на втулки та виконано верифікацію результатів експериментальних досліджень із використанням сучасного програмного забезпечення.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації процесів захисту деталей конструкційного призначення, що експлуатуються в агресивних середовищах та зазнають інтенсивного зносу внаслідок тертя. Застосування розроблених комбінованих покриттів дозволяє у декілька разів підвищити зносостійкість деталей і, відповідно, істотно збільшити ресурс роботи обладнання.

Особистий внесок магістранта. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації, викладені в магістерській роботі, отримані автором самостійно. Магістрант сформулював мету та задачі дослідження, виконав повний комплекс теоретичних і експериментальних робіт, пов'язаних з аналізом мікроструктури та експлуатаційних властивостей комбінованих захисних покриттів, нанесених на порошкові втулки за різних режимів синтезу.

РОЗДІЛ 1

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МЕТОДУ НАНЕСЕННЯ ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ НА ДЕТАЛІ КОНСТРУКЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З ПОРОШКІВ, ОТРИМАНИХ З ВІДХОДІВ ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

Упродовж останніх років, у зв'язку з розробленням та впровадженням нових порошкових матеріалів, спостерігається зростання інтересу до технологій плазмового напилення захисних покриттів. Зазначені технології характеризуються високою продуктивністю, універсальністю застосування, можливістю ефективної автоматизації процесу, а також практично відсутніми обмеженнями щодо геометричних розмірів поверхонь, що підлягають обробці. Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділяють нанесенню композиційних керамічних, металокерамічних, біметалевих та інших синтетичних покриттів, які забезпечують комплексне підвищення експлуатаційних характеристик деталей.

Якщо на попередніх етапах розвитку технологій захисних покриттів основний акцент робився на створенні високопродуктивного обладнання та вдосконаленні технологічних режимів напилення, то на сучасному етапі визначального значення набуває розроблення нових порошкових матеріалів. Саме властивості вихідних порошкових композицій значною мірою визначають функціональні характеристики захисних покриттів та їх ефективність при експлуатації вузлів і деталей машин та механізмів.

Водночас методи та технологічні процеси порошкової металургії створюють широкі можливості для раціонального використання відходів промислового виробництва, зокрема металевої стружки, металобрухту та обрізків. Після відповідної термічної та механічної обробки такі відходи можуть бути перетворені у порошки з заданими фізико-хімічними та технологічними властивостями. Отримані порошкові матеріали доцільно використовувати для виготовлення композиційних матеріалів триботехнічного та конструкційного призначення. Зокрема, утилізація шліфувальних відходів підшипникового

виробництва дає змогу одержувати порошки високолегованої підшипникової сталі ШХ15.

У Луцькому національному технічному університеті протягом тривалого часу проводяться комплексні теоретичні та експериментальні дослідження, спрямовані на поліпшення фізико-механічних і технологічних характеристик порошків сталі ШХ15, отриманих шляхом утилізації шліфувальних шламів. Результати цих досліджень створюють науково-технологічне підґрунтя для подальшого застосування зазначених порошків у процесах напилення захисних покриттів.

Особливого значення в цьому контексті набуває нанесення захисних покриттів на деталі різного конструкційного призначення, що дозволяє суттєво підвищити їх зносостійкість та експлуатаційну надійність. Одним із перспективних напрямів удосконалення таких покриттів є використання порошкових композицій, у складі яких раціонально поєднуються компоненти різної фізико-хімічної природи, зокрема метали, оксиди, бориди, карбіди та інші сполуки. Таке поєднання забезпечує формування покриттів з покращеними механічними, триботехнічними та корозійними властивостями.

1.1 Характеристика електрометалізаційного напилення

Електрометалізаційне напилення, яке також відоме як електродугове напилення, є одним із поширених методів формування металевих покриттів на поверхнях як металевої, так і неметалевої природи. Фізична суть процесу полягає у плавленні електродного матеріалу електричною дугою з подальшим диспергуванням розплавленого металу струменем стисненого газу, найчастіше повітря. Утворені дрібнодисперсні частинки металу транспортуються до поверхні, що попередньо підготовлена, та з великою швидкістю осаджуються на ній у рідкому або пластично-деформівному стані. У момент удару частинки зазнають інтенсивної пластичної деформації, внаслідок чого відбувається їх адгезійне зчеплення з основою та формування суцільного покриття.

Електродугове напилення використовується протягом тривалого часу, насамперед для отримання антикорозійних покриттів на основі цинку та алюмінію, а також для нанесення зносостійких і відновлювальних шарів на деталі машин та механізмів. Технологічний процес реалізується із застосуванням електрометалізаторів, у яких здійснюється безперервна подача електродних дротів у зону горіння електричної дуги, плавлення матеріалу під дією дугового розряду, подрібнення металевого розплаву в сопловій частині апарата та подальше викидання розплавлених частинок у напрямку напилюваної поверхні.

Широке промислове застосування електродугової металізації зумовлене рядом суттєвих переваг порівняно з іншими методами газотермічного напилення, такими як газополуменеве, плазмове чи детонаційне. До основних переваг належать відносно висока продуктивність процесу та знижені енергетичні витрати, конструктивна простота й мобільність обладнання, а також можливість нанесення покриттів практично на будь-які тверді матеріали, зокрема метали, деревину, кераміку, скло, бетон і полімери. Важливою особливістю електродугового напилення є також незначне теплове навантаження на основу, що дозволяє уникнути структурних змін матеріалу деталі та її термічного деформування.

Крім того, електрометалізація забезпечує формування покриттів із широким спектром фізико-механічних та функціональних властивостей, зокрема антикорозійних, зносостійких, фрикційних, декоративних, антикавітаційних та інших спеціалізованих типів. Завдяки цьому електродугове напилення широко застосовується для захисту елементів будівельних конструкцій, трубопроводів і резервуарів, а також для відновлення деталей машин, що працюють у вузлах тертя. Типовими об'єктами електрометалізації є шийки колінчастих валів двигунів, деталі компресорів і насосів, плунжери, штоки, гладкі вали, гальмівні диски та барабани, а також робочі поверхні обладнання різного технологічного призначення.

Електродуговий металізатор є технічним пристроєм, призначеним для формування металевих покриттів на твердих поверхнях шляхом реалізації процесів електродугового плавлення та газодинамічного перенесення

розплавленого матеріалу. Конструктивна схема електрометалізатора, що використовується для нанесення покриттів на металеві й неметалеві основи, наведена на рисунку 1.1.

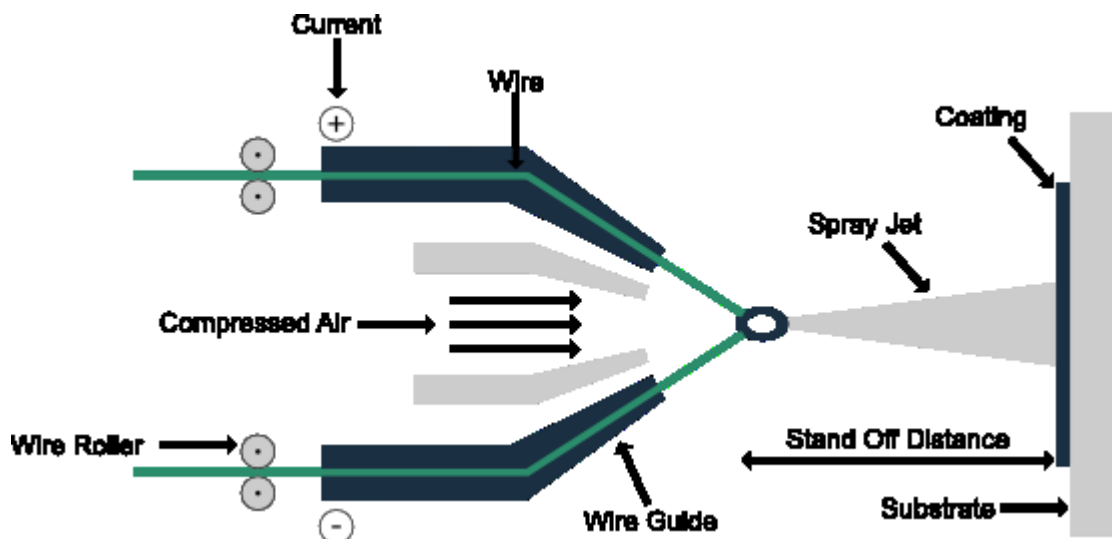


Рисунок 1.1 – Схема електрометалізатора

1.2 Суть методу плазмоелектролітного оксидування

На сучасному етапі розвитку інженерії поверхні метод плазмоелектролітного оксидування (ПЕО) розглядається як один із найбільш прогресивних та перспективних способів формування захисних шарів на поверхні металів і сплавів. Покриття, отримані методом ПЕО, характеризуються поєднанням високих експлуатаційних властивостей, серед яких підвищена корозійна та зносостійкість, термостабільність і твердість. Фізико-хімічні характеристики сформованих покриттів визначаються складом електроліту, а також електричними та часовими режимами процесу оксидування.

Важливим напрямом розвитку методу ПЕО є розроблення та використання нових електролітних систем, що забезпечують розширення функціональних можливостей захисних покриттів за рахунок поєднання антикорозійних властивостей із високою твердістю та термічною стійкістю. Для реалізації керованого синтезу поверхневих шарів заданого складу при

плазмоелектролітному оксидуванні необхідно обґрунтовано підходити до вибору складу електроліту та режимів обробки. При цьому важливим є врахування змін форм існування аніонних комплексів у розчині залежно від значення рН як у об'ємі електроліту, так і в локальній приелектродній зоні.

Встановлено, що фізико-хімічні та експлуатаційні властивості покриттів, які формуються на металах і сплавах за умов виникнення плазмових мікророзрядів на поверхні анода, суттєво відрізняються від характеристик традиційних анодних оксидних плівок. Умови для виникнення плазмових мікророзрядів реалізуються після досягнення та перевищення критичного потенціалу поляризації, внаслідок чого на поверхні анода формуються багат шарові структури на основі оксидів елементів металевої матриці та компонентів електроліту (рис.1.2).

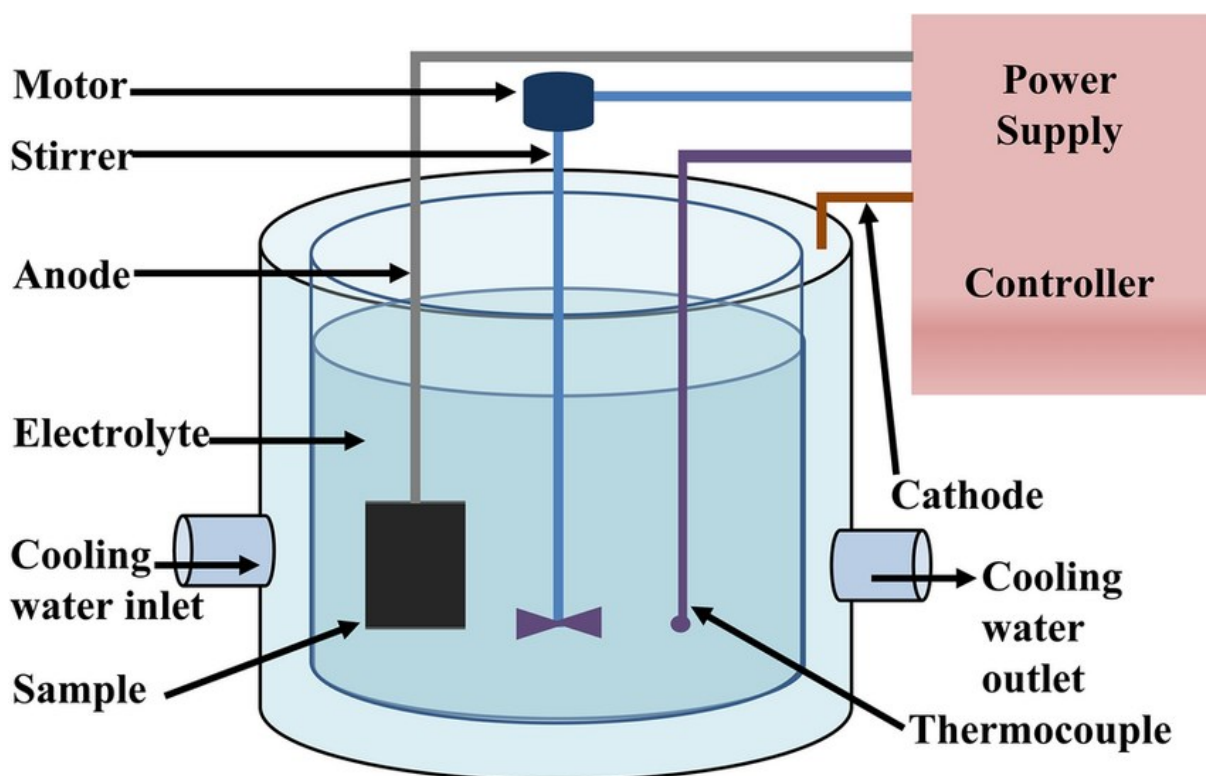


Рисунок 1.2 – Суть методу плазмоелектролітного оксидування

Метод плазмоелектролітного оксидування широко застосовується як у фундаментальних дослідженнях, так і в промисловій практиці для отримання багатофункціональних оксидних покриттів на вентилях металів та їх сплавах. На відміну від класичного анодування, процес ПЕО здійснюється за підвищених значень напруги та густини струму. За таких умов у каналах електричного пробоя реалізуються екстремальні параметри процесу, зокрема локальні температури до 10 000 К, тиск до 10^2 МПа та високі значення напруженості електричного поля (порядку 10^6 – 10^7 В/см). Сукупна дія цих факторів сприяє інтенсивному електрохімічному та плазмово-термічному синтезу за участю матеріалу анода і компонентів електроліту.

Плазмові реакції, що супроводжують процес ПЕО, пов'язані з перенесенням електронів через межу розподілу «електрод-електроліт» і реалізуються при проходженні струмів високої густини в умовах анодної, катодної або анодно-катодної поляризації. Раціональним підбором складу електроліту та режимів електролізу можливо формувати покриття з наперед заданими функціональними властивостями, зокрема такими, що за твердістю та зносостійкістю є порівнюваними з корундом або карбідом вольфраму.

Характерною особливістю плазмоелектролітного оксидування є активна участь поверхневих мікророзрядів у процесі синтезу покриття, що суттєво впливає на формування його фазового складу та мікроструктури. Завдяки цьому властивості ПЕО-покриттів можуть ефективно регулюватися шляхом зміни складу електроліту та параметрів процесу, що забезпечує значне покращення експлуатаційних характеристик порівняно зі звичайними анодними плівками.

Значна увага в дослідженнях методу ПЕО приділяється механізмам формування покриттів та аналізу плазмово-термічних і електрохімічних процесів на межі розподілу «електрод-електроліт». На початковому етапі відбувається дисоціація сольових компонентів електроліту з подальшою дифузією іонів до поверхні оксидованого металу. Надалі реалізуються хімічні та електрохімічні реакції, що приводять до утворення оксидного або керамічного шару покриття. При цьому важливим є забезпечення умов формування покриттів

з регламентованою пористістю, шорсткістю та заданими функціональними властивостями.

До основних переваг методу плазмоелектролітного оксидування порівняно з традиційним анодуванням належать екологічна безпечність та неагресивність електролітів, відсутність потреби у складній попередній підготовці поверхні, можливість отримання товстих покриттів завтовшки до 400 мкм без застосування екологічно шкідливого обладнання, а також висока мікротвердість покриттів, що може досягати 2500 кг/мм².

1.3 Перспективні технології одержання композиційного порошку

До захисних покриттів, що застосовуються для деталей конструкційного призначення, висувається низка обов'язкових вимог. Зокрема, такі покриття повинні бути суцільними та непроникними, характеризуватися високою адгезійною міцністю з основним матеріалом, підвищеною твердістю і зносостійкістю, а також забезпечувати рівномірний розподіл по всій поверхні деталі. Виконання зазначених вимог є необхідною умовою для забезпечення надійної та довготривалої експлуатації деталей у складних умовах навантаження і тертя.

Відповідно до сучасних тенденцій розвитку матеріалознавства та інженерії поверхні, спрямованих на створення високоякісних композиційних матеріалів і покриттів із комплексом покращених фізико-механічних властивостей, особливої актуальності набуває розроблення нових типів порошкових матеріалів. Саме характеристики вихідних порошків значною мірою визначають структуру, фазовий склад і функціональні властивості сформованих композиційних покриттів.

На сьогодні відомо декілька технологічних підходів до одержання композиційних порошків, у тому числі порошків із плакованою оболонкою. Такі порошкові матеріали дозволяють поєднувати у межах однієї частинки властивості різних компонентів, що створює передумови для формування покриттів із заданими експлуатаційними характеристиками. Водночас кожен із

відомих способів плакування порошків має як переваги, так і певні обмеження, які необхідно враховувати при виборі технології.

Зокрема, поверхневе електролітичне осадження металів (рис. 1.3) характеризується обмеженою універсальністю, оскільки не забезпечує безпосереднього захисту неелектропровідних порошків. У таких випадках виникає необхідність попередньої металізації порошкових частинок альтернативними методами. Крім того, електролітичні способи практично не дозволяють здійснювати плакування порошків твердими неметалевими сполуками, такими як карбіди, нітриди або бориди, що суттєво звужує сферу їх застосування.

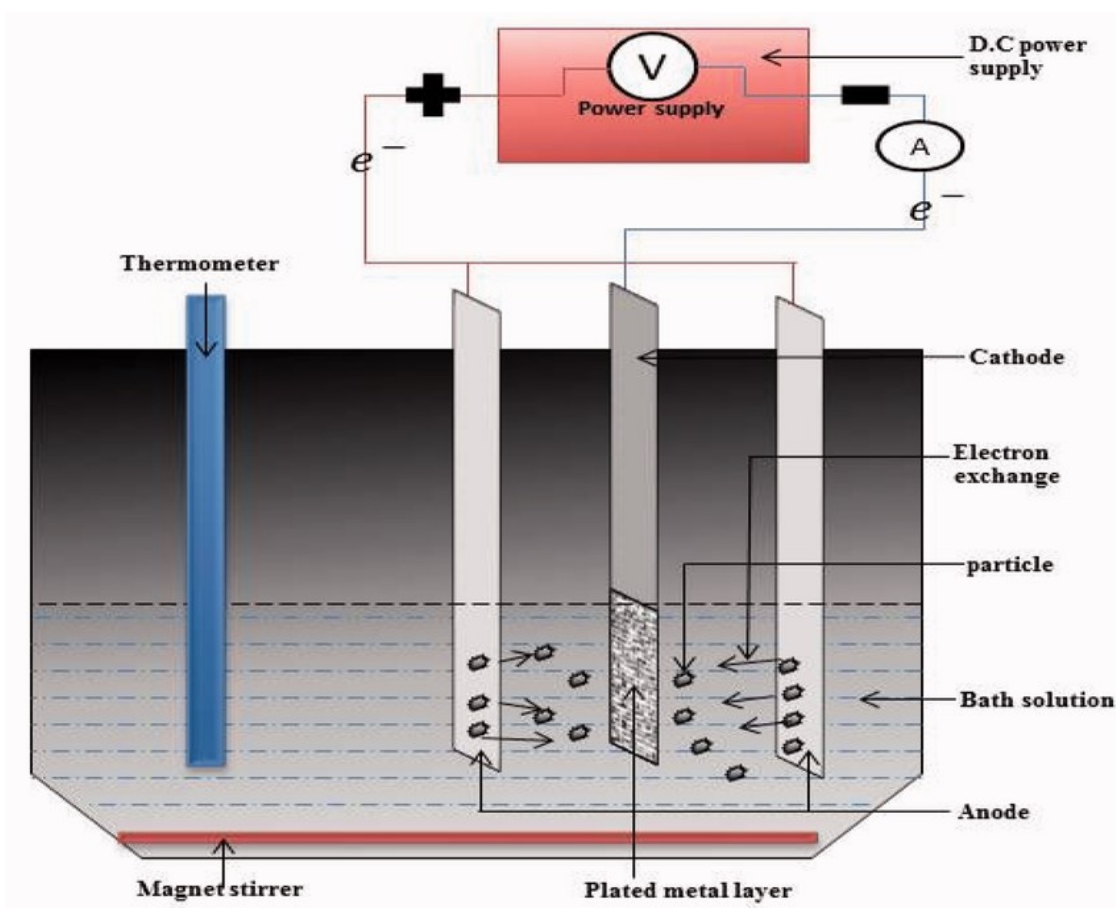


Рисунок 1.3 – Схема процесу поверхневого електролітичного осадження металів

Електролітичні та хімічні покриття традиційно використовуються переважно для відновлення та зміцнення поверхонь деталей шляхом хромування, залізнення, нікелювання, а також для забезпечення корозійного захисту й поліпшення зовнішнього вигляду виробів. Проте для створення багатофункціональних композиційних порошоків із регульованим складом і властивостями такі методи є недостатньо ефективними, що зумовлює необхідність пошуку та впровадження альтернативних, більш універсальних технологій одержання композиційних порошкових матеріалів.

Хімічна металізація порошоків дозволяє формувати одно- і багатокомпонентні шари на різних порошкових матеріалах (рис. 1.4). Недоліком цього способу є необхідність промивання і сушіння порошоків.

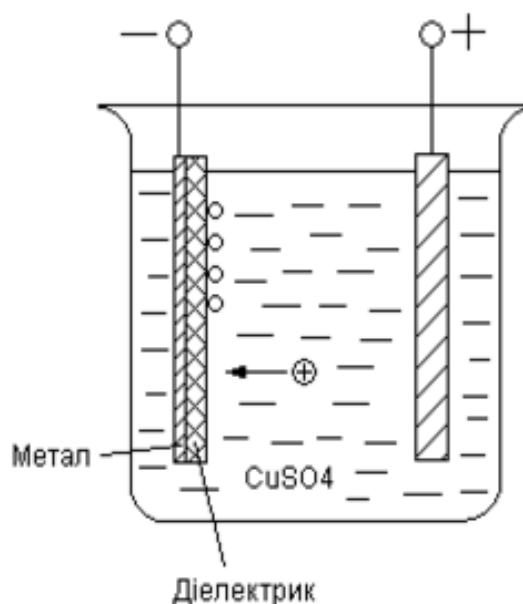


Рисунок 1.4 – Схема хімічної металізації

Серед сучасних вакуумних технологій конденсації металевих плівок особливе місце займає метод іонно-плазмового розпилення металів в умовах дугового розряду (рис. 1.5). Даний метод розглядається як один із найбільш перспективних підходів до плакування порошкових матеріалів, оскільки завдяки своїм фізико-технологічним можливостям він забезпечує формування рівномірної металевої оболонки на поверхні частинок за високих швидкостей осадження та з часткою металевого конденсату до 25 %.

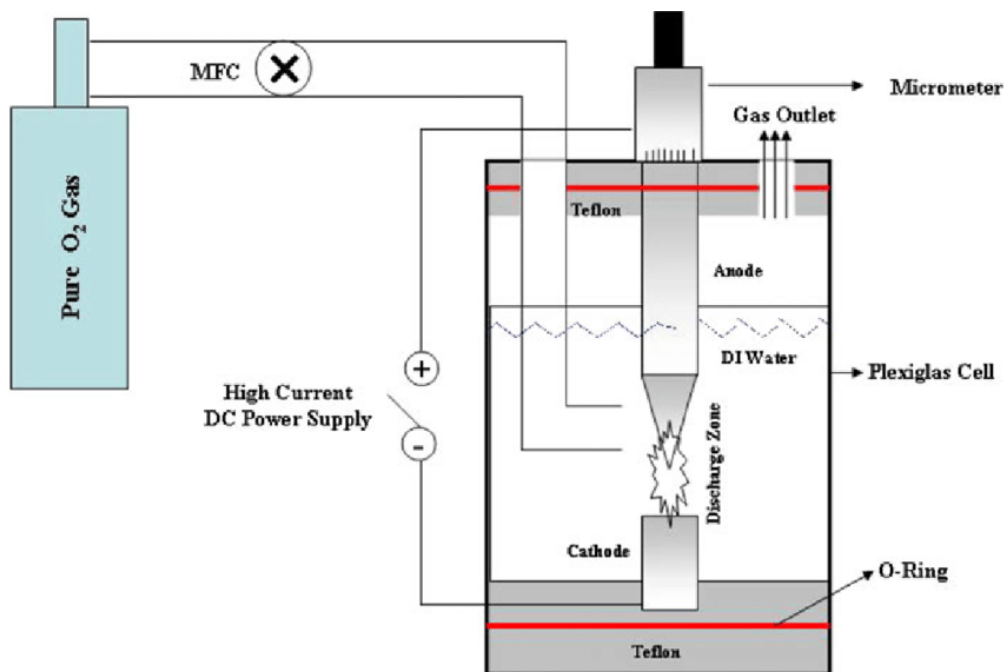


Рисунок 1.5 – Схема установки іонно-плазмового напилення

Реактивний (хімічний) різновид іонно-плазмового напилення забезпечує можливість синтезу оксидних, нітридних та інших сполук і за своїми технологічними можливостями є співставним із реактивним катодним напиленням. Застосування даного підходу дозволяє формувати функціональні покриття з керованим фазовим складом і структурою безпосередньо в процесі конденсації.

Крім того, у процесах вакуумно-дугового плакування передбачена можливість переміщення та інтенсивного перемішування порошкових матеріалів за допомогою спеціальних вібраційних пристроїв. Це сприяє підвищенню рівномірності осадження конденсату на поверхні частинок і забезпечує формування суцільної та однорідної плакованої оболонки.

У зв'язку з викладеним, дослідження, спрямовані на вдосконалення та оптимізацію технологічних режимів вакуумно-конденсаційного осадження плівок на порошкові суміші, є актуальними. Такі дослідження орієнтовані на створення високоякісних плакованих порошкових матеріалів, придатних для подальшого використання в різних технологічних процесах, зокрема для газотермічного напилення захисних покриттів.

Використання іонно-плазмового розпилення дозволяє отримувати композиційні порошки зі складною структурою, зокрема керамічні композиції з різними типами зв'язок, а також реалізовувати пошарове осадження різних металів з формуванням багатошарових оболонок. Такий підхід суттєво розширює можливості керування складом, структурою та властивостями композиційних порошкових матеріалів.

Водночас до обмежувальних чинників методу іонно-плазмового плакування в окремих технологічних режимах слід віднести підвищену температуру поверхні частинок у процесі конденсації. За таких умов можливе інтенсивне злипання порошкових частинок між собою з утворенням агломератів, що негативно впливає на дисперсність та технологічні властивості отриманого порошку.

Оскільки методи вакуумного конденсаційного напилення мають значну кількість спільних фізико-технологічних особливостей, доцільним є розгляд узагальненої схеми процесу вакуумного осадження покриттів, наведеної на рисунку 1.6.

Головна перевага – його простота та можливість отримання виключно чистих плівок. Проте є і недоліки – важкість напилення тугоплавких матеріалів і неможливість відтворення хімічного складу випаровуваної речовини. Це пояснюється тим, що при високій температурі хімічні сполуки диссоціюють, а складові конденсуються на підкладці саме роздільно. Є вірогідність того, що нова комбінація атомів на підкладці не відповідатиме структурі початкової молекули.

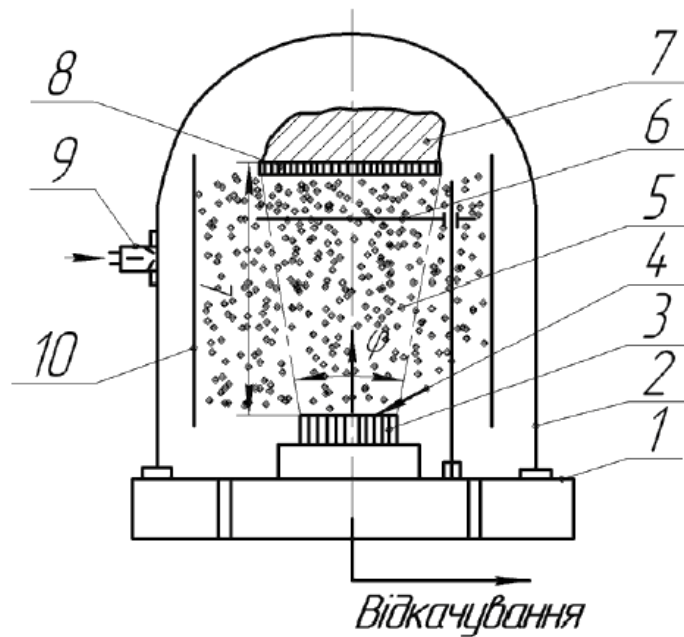


Рисунок 1.6 – Схема процесу вакуумного напилювання покриттів:

1 – плита; 2 – камера; 3 – матеріал, що розпилюється; 4 – підведення енергії; 5 – потік частинок; 6 – заслінка; 7 – напилюваний виріб; 8 – нове покриття; 9 – наповнювач робочого газу; 10 – екран.

1.4 Експлуатаційні характеристики захисних покриттів

У межах даної кваліфікаційної роботи комбіновані захисні покриття нанесено на втулки, виготовлені з порошкових матеріалів різного складу, зокрема з залізного порошку та з порошкової суміші Fe + ШХ15. Аналіз умов їх експлуатації показав, що зазначені деталі функціонують переважно в режимі тертя. З огляду на це, доцільним є застосування захисних покриттів, спрямованих на зниження інтенсивності зношування та підвищення довговічності втулок.

Використання комбінованого покриття як способу захисту робочих поверхонь дозволяє суттєво зменшити швидкість спрацювання матеріалу та значно подовжити термін експлуатації втулок. За умов реверсивно-поступального тертя та раціонального вибору складу і технології нанесення покриття забезпечується істотне підвищення зносостійкості деталей, що в окремих випадках дозволяє практично необмежено продовжити їх ресурс.

Перша з досліджуваних втулок використовується у швидкозмінному патроні для протяжок, який встановлений на горизонтально-протяжному верстаті моделі 7Б55 (рис. 1.7) та позначена позицією 5 (рис. 1.8). У процесі експлуатації даного вузла втулка зазнає інтенсивного тертя, оскільки під час кожного встановлення та зняття протяжки відбувається безпосередній контакт внутрішньої поверхні втулки із зовнішньою поверхнею інструмента. Внаслідок багаторазового повторення таких циклів відбувається поступове зношування робочої поверхні втулки.



Рисунок 1.7 – Загальний вид горизонтально-протяжного верстату моделі 7Б55

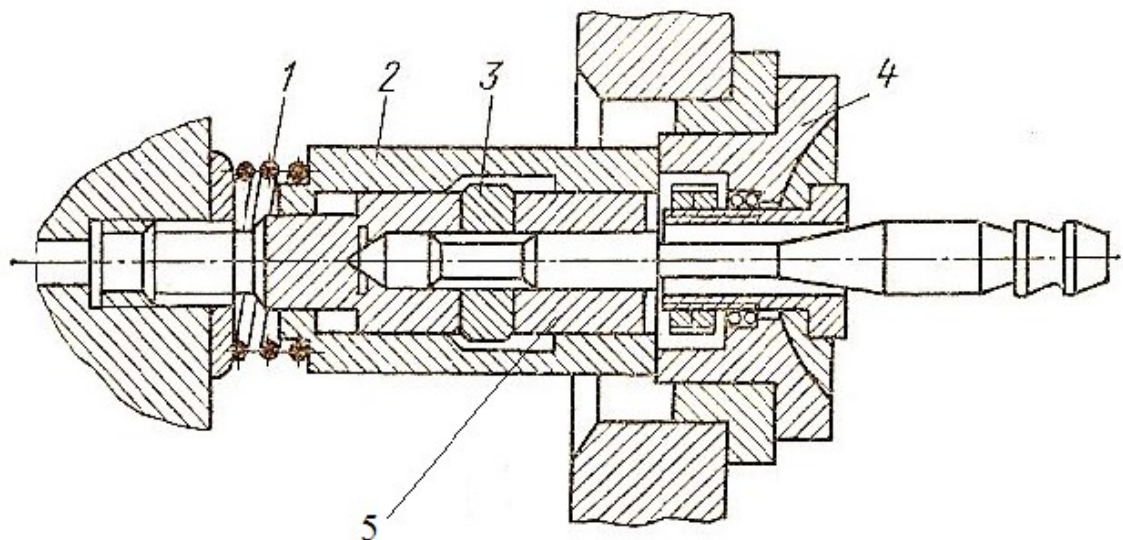


Рисунок 1.8 – Швидкозмінний патрон для протяжок

Друга втулка встановлена в коробці подач токарно-гвинторізного верстата моделі 1А62 (рис. 1.9). В механізмі представленому на рисунку 1.10 втулка під поз. 5 служить посадочним місцем під зубчасте колесо і встановлюється на вал. Ця втулка працює саме на зношування. Так як і в першому випадку, для підвищення експлуатаційних характеристик, а саме зносостійкості втулки та збільшення міжремонтного періоду вузла, ми будемо наносити на неї комбіноване захисне покриття.



Рисунок 1.9 – Загальний вид токарно-гвинторізного верстата моделі 1А62

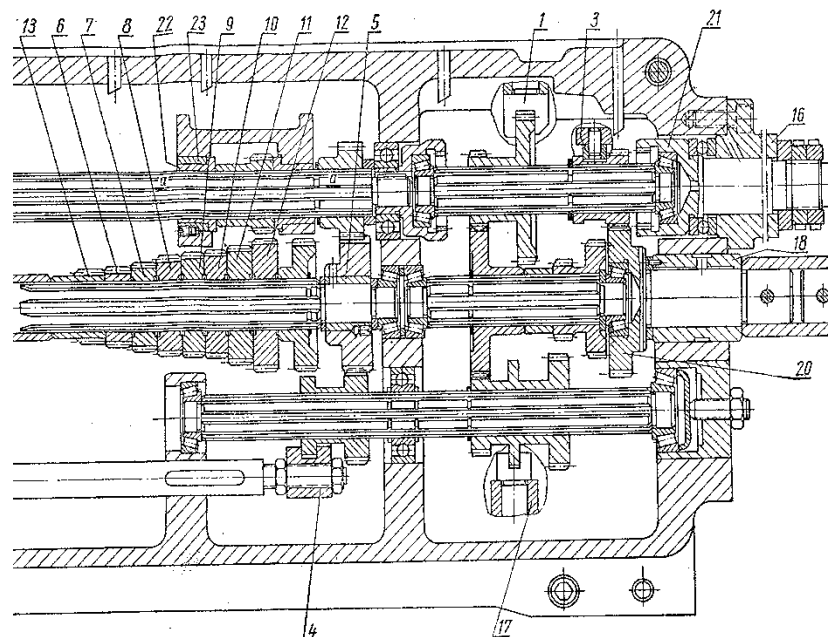


Рисунок 1.10 – Коробка подач токарно-гвинторізного верстата моделі 1А62

З метою зниження інтенсивності зношування та збільшення терміну експлуатації швидкозмінного патрона в роботі запропоновано захист зазначеної втулки шляхом нанесення комбінованого захисного покриття. Застосування такого підходу дозволяє підвищити експлуатаційну надійність вузла та забезпечити стабільність його функціонування в умовах тривалої роботи.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА НОВОГО ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ У ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ

2.1 Фізичні параметри електродугового напилення

Формування захисного покриття здійснювали методом електродугового напилення шляхом розпилення суцільного електродного дроту з використанням електродугового металізатора з модифікованою розпилювальною системою (рис. 2.1). Особливістю застосованої конструкції є локалізація електричної дуги безпосередньо в каналі розпилювальної головки, що забезпечує інтенсивне плавлення електродного матеріалу та ефективне диспергування розплаву.

За рахунок оптимізованих газодинамічних умов у зоні дугового розряду досягається формування дрібнодисперсного потоку металевих частинок, які транспортуються до поверхні напилюваної деталі у рідкому або пластично-деформівному стані. Висока швидкість частинок та їх інтенсивна пластична деформація при зіткненні з основою сприяють утворенню щільного покриття з підвищеною адгезійною міцністю та однорідною мікроструктурою.

Застосування модифікованої розпилювальної системи дозволяє зменшити середній розмір напилюваних частинок, стабілізувати процес напилення та підвищити відтворюваність фізико-механічних характеристик сформованого електродугового покриття, що є особливо важливим при лабораторному відпрацюванні нових композицій захисних шарів.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд методом електродугового напилення

Для живлення електродугового металізатора постійним струмом використовували зварювальний випрямляч типу ВДУ-505. Очищення стисненого повітря від твердих домішок, вологи та мінеральних мастил здійснювали за допомогою фільтра-вологовідділювача типу 23-25-4-4ХЛ4, що забезпечувало стабільність газодинамічних умов у процесі напилення.

Технологічний процес нанесення електродугового покриття на зразки включав послідовне виконання таких операцій: знежирення поверхні зразків; дробоструменеву обробку; електродугове напилення покриття; контроль якості напиленого шару; фінішне шліфування зразків.

Дробоструменеву обробку проводили з метою формування розвиненої мікрорельєфної поверхні та підвищення адгезійної міцності покриття. Режими дробоструменевої обробки становили:

1. Тиск стисненого повітря – 0,5...0,6 МПа.
2. Відстань між соплом і оброблюваною поверхнею – 80...120 мм.

Після підготовки поверхні здійснювали електродугове напилення покриття за такими режимами: сила струму – 100 А; напруга – 32 В; відстань від сопла до напилюваної поверхні – 100...110 мм; тиск стисненого повітря – 0,6 МПа.

У межах даного наукового дослідження було проаналізовано чотири експериментальні зразки. Для цього попередньо виготовляли та протравлювали мікрошліфи відповідно до методики, наведеної у розділі 2.5. Травлення мікрошліфів здійснювали з використанням травника – 0,5...3 % спиртового розчину плавикової кислоти HF, що забезпечувало чітке виявлення структурних складових покриття та зони контакту з основним матеріалом.

На початковому етапі досліджень наведено загальний вигляд зразка №1 після нанесення комбінованого захисного покриття (рис. 2.2). Зразки №2 та №3 мають аналогічний зовнішній вигляд, однак відрізняються товщиною сформованих покриттів і режимами плазмоелектролітного оксидування. У зв'язку з цим у роботі представлено одну характерну фотографію, яка ілюструє загальні особливості зовнішнього вигляду покриттів.

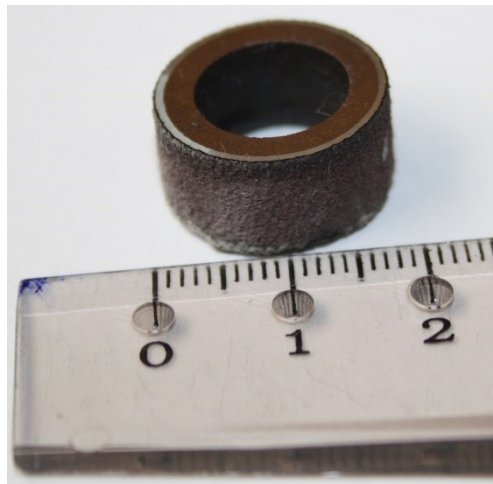


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд зразка №1 після нанесення комбінованого покриття

При дослідженні мікроструктури зразка №1, який спресований і спечений із порошку сталі ШХ15, виявлено значну кількість графітових і мідних включень та заліза (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Мікроструктура зразка №1 при збільшенні $\times 100$

На рисунку 2.3 у верхній частині мікрошліфа спостерігається основний метал, нижче темно-сірим кольором відображено шар електродугового покриття, а ще нижче — плазмоелектролітно оксидований шар.

Межа розділу між основним металом і електродуговим покриттям є чітко окресленою, однак характеризується певною нерівномірністю, що зумовлено особливостями формування напиленого шару.

З метою порівняльного аналізу змін мікроструктури зразка до та після травлення на рисунку 2.4 наведено мікроструктуру нетравленої області зразка №1. Порівняння мікроструктур електродугового покриття в нетравленому та протравленому станах свідчить не лише про відмінності у кольоровому контрасті, але й про суттєві структурні зміни. Так, у нетравленій області електродугове покриття має світліше забарвлення, тоді як після травлення спостерігається темніший тон і чітко виявлення структурних складових.

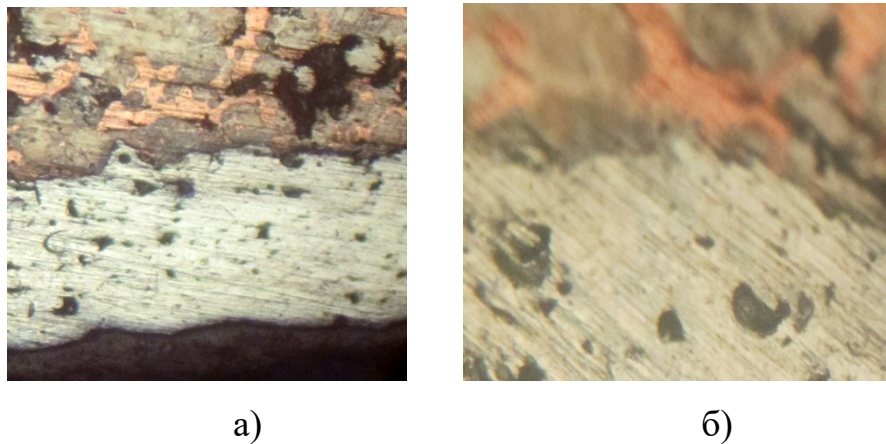


Рисунок 2.4 – Мікроструктура нетравлених областей зразка №1 при збільшенні: а) $\times 100$; б) $\times 250$

У протравленій області стає можливим ідентифікувати характерну мікроструктуру покриття, зокрема форму та розміри зерен, а також особливості їх взаємного розташування.

Мікроструктури травлених ділянок зразка при збільшеннях $\times 250$ та $\times 400$ наведено на рисунку 2.5, що дозволяє детально проаналізувати структурну будову електродугового покриття та зони його взаємодії з основним матеріалом.



а)

б)

Рисунок 2.5 – Мікроструктура травленої області зразка №1: а) $\times 250$;
б) $\times 400$

Аналіз мікроструктури, наведеної на рисунку 2.5, свідчить про незначну товщину перехідної зони між основним металом і напиленим покриттям, що дозволяє зробити висновок про достатньо високу адгезійну міцність електродугового покриття до матеріалу основи. Порівняльний аналіз мікроструктур, представлених на рисунках 2.3 та 2.4, показав наявність графітових включень у структурі основного металу, які мають хаотичний характер розподілу.

У процесі травлення мікрошліфів найбільш інтенсивно проявляється руйнування по межах зерен, що є характерною особливістю застосованого травника. При цьому структура основного металу зразків істотних змін не зазнала, тоді як мікроструктура напиленого електрометалізаційного шару стала більш однорідною та набула темнішого контрасту. Зазначена закономірність є характерною для трьох досліджуваних зразків.

Наступний досліджуваний зразок – порошкова залізна втулка (зразок №4) – відрізняється від попередніх зразків не лише зовнішнім виглядом і складом матеріалу, але й особливостями мікроструктури покриття та режимами плазмоелектролітного оксидування.

Для дослідження цього зразка було виготовлено та протравлено мікрошліф відповідно до відповідної методики. Травлення зразка №4, як і для попередніх

зразків, здійснювали з використанням 0,5...3 % спиртового розчину плавикової кислоти HF.

На рисунку 2.6 наведено загальний вигляд зразка №4. Отримані результати дозволяють провести подальший порівняльний аналіз структурних особливостей покриттів, сформованих за різних технологічних режимів, та оцінити їх вплив на експлуатаційні характеристики порошкових втулок.

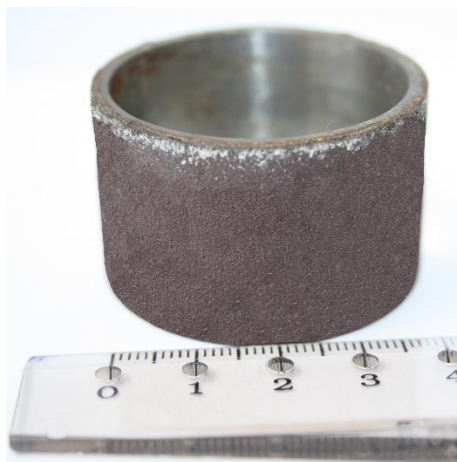
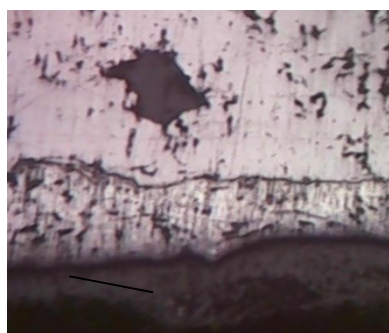


Рисунок 2.6 – Загальний вигляд зразка №4

На рисунку 2.7 видно добре мікроструктуру нетравленої області зразка №4 при збільшенні $\times 100$.



а)



б)

Рисунок 2.7 – Мікроструктура зразка №4: а) $\times 150$ нетравлена область;
б) $\times 150$ травлена область

На рисунку 2.7, б чітко простежується мікроструктура основного металу, а також межа розподілу між матеріалом основи та електрометалізаційним покриттям. У структурі основного металу виявлено графітові включення, які мають хаотичний характер розподілу. Водночас видно, що в даному випадку протравленню піддався переважно лише основний метал втулки.

Зазначена особливість обумовлена застосуванням на початковому етапі травлення недостатньо активного травника, що не забезпечив повного виявлення мікроструктурних складових електрометалізаційного шару. Отримані результати свідчать про необхідність коригування концентрації та режимів травлення для забезпечення більш інформативного металографічного аналізу напиленого покриття.

На рисунку 2.8 добре видно межу покриттів. У цьому місці електрометалізаційне покриття було нанесене рівномірно. Межа покриття з основою невелика. В цьому місці спостерігаємо добрі адгезійні властивості електродугового покриття з основою.

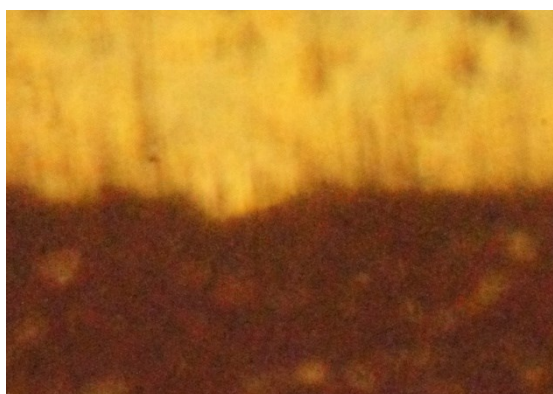


Рисунок 2.8 – Мікроструктура травленої області зразка №4 $\times 150$

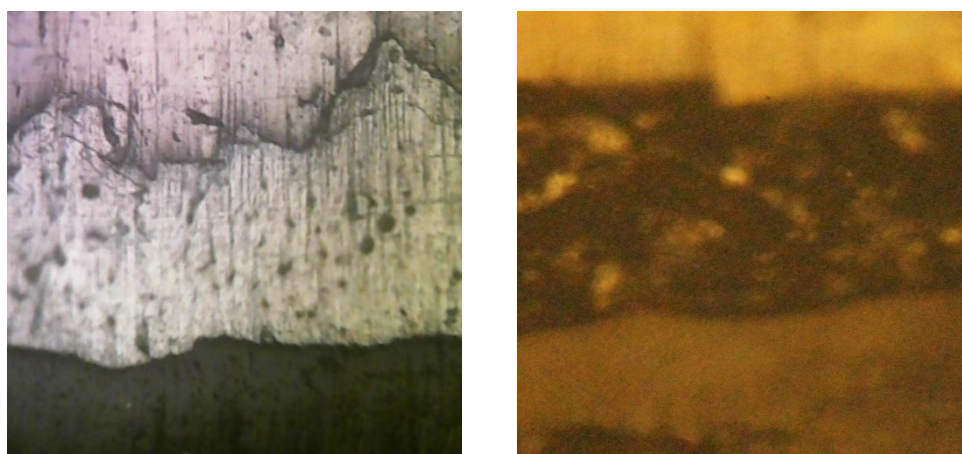


Рисунок 2.9 – Структура зразка №4: а) $\times 250$ нетравлений; б) $\times 250$ травлений

На рисунку 2.9, а видно межу розподілу основного металу та, звісно, електрометалізаційного покриття. Коли зразок був протравлений, то видно відразу структуру електродугового покриття. Також видно, що напилений шар став темніший і можна побачити зерна металу. Межа розподілу покриттів - криволінійна, що говорить про нерівності нанесеного покриття.

2.2 Електрофізичні характеристики процесу плазмоелектролітного оксидування

Для реалізації процесу плазмоелектролітного оксидування (ПЕО) спресовану втулку з попередньо нанесеним електродуговим покриттям закріплювали у спеціальному технологічному пристосуванні. Поверхні втулки, що не були вкриті сплавом Д16, ізолювали від контакту з електролітом, оскільки оксидування заліза в умовах ПЕО є недопустимим. Це обумовлено тим, що формування оксидокерамічних покриттів можливе лише на вентильних металах, тоді як окиснення заліза призводить до порушення стабільності процесу та погіршення умов синтезу оксидокерамічного шару.

До основних електрофізичних параметрів процесу плазмоелектролітного оксидування належать анодна напруга U_a , катодна напруга U_k , густини анодного та катодного струмів I_a і I_k , тривалість імпульсів та їх частота, а також загальна тривалість процесу τ , хв.

Сукупність зазначених параметрів визначає умови виникнення плазмових мікророзрядів, інтенсивність електрохімічних і плазмово-термічних реакцій, а також структурно-фазові характеристики сформованого ПЕО-покриття.

У даному дослідженні синтез оксидокерамічного шару здійснювали за співвідношенням густин катодного та анодного струмів $I_k/I_a=1$, що забезпечувало симетричний електричний режим та стабільний перебіг процесу ПЕО. Аналіз вольт-амперних характеристик за таких умов дозволяє оцінити стадії формування покриття, момент виникнення мікророзрядів та динаміку електрофізичних параметрів упродовж усього циклу обробки.

Загальний вигляд лабораторної установки для плазмоелектролітного оксидування, що використовувалася у даній роботі, наведено на рисунку 2.10.



Рисунок 2.10 – Загальний вигляд установки для ПЕО

Електричні параметри синтезу оксидокерамічних покриттів (ОКП), як правило, підбирають експериментальним шляхом без достатнього теоретичного обґрунтування. Водночас саме значення густини струму та прикладеної напруги визначають характер і інтенсивність електричних розрядів, температурні умови в приповерхневій зоні сплаву, а також істотно впливають на структуру й функціональні властивості сформованого покриття.

Процес плазмоелектролітного оксидування описується вольт-амперними характеристиками, до яких належать анодний і катодний струми, а також анодна та катодна напруги. При нанесенні ОКП задають відповідні режими, що включають густини струмів на аноді й катоді та величини анодної і катодної напруг. На початковому етапі визначають площу поверхні, яка підлягає оксидуванню, після чого, залежно від необхідної товщини покриття, встановлюють тривалість процесу.

У даній кваліфікаційній роботі ОКП формували на зразках, які відрізнялися між собою як товщиною покриття, так і режимами перебігу процесу ПЕО. Зокрема, покриття різної товщини отримували за співвідношень густин катодного та анодного струмів $I_k/I_a=1$ та $I_k/I_a=1,5$, при цьому для кожного співвідношення було виготовлено по два зразки.

Процес плазмоелектролітного оксидування здійснювали в електроліті такого складу: 3 г/л КОН, 2 г/л рідкого скла, решта — вода. Густина струму приймали рівною $i=20$ А/дм² для трьох зразків та $i=7,5$ А/дм² для одного зразка.

У ході процесу ПЕО спостерігаються характерні зміни вольт-амперних характеристик. Для аналізу динаміки електрофізичних параметрів наведено графіки зміни анодної та катодної напруг у часі, які фіксувалися під час формування оксидокерамічного покриття.

Формування ПЕО-покриття на деформівному алюмінієвому сплаві відбувається у два основні етапи. На першому етапі реалізується електрохімічне утворення первинної оксидної плівки. За анодної напруги до 100 В на поверхні анода протікає переважно реакція анодного росту оксиду, при цьому перенапряга утворення оксиду є меншою за напругу розкладу електроліту. Після досягнення критичного значення напруги відбувається інжекція електронів в оксидний шар, що супроводжується виділенням кисню на аноді.

Другий етап характеризується формуванням іскрового розрядного каналу в системі «метал-оксид-електроліт». За подальшого підвищення напруги відбувається електронний пробій каналу, внаслідок чого в зоні розряду різко зростає температура, проходять процеси дисоціації та іонізації електроліту, а також формується плазмовий осередок. У цьому осередку інтенсивно протікають плазмохімічні реакції синтезу оксидного шару.

Синтез оксидокерамічного покриття на спресованій втулці з порошку сталі ШХ15, на яку попередньо було нанесено електрометалізаційне покриття зі сплаву Д16, здійснювали протягом 120 хв у гальваностатичному анодно-катодному режимі за співвідношенням густин струмів $I_k/I_a=20$ А/дм².

Аналіз вольт-амперних характеристик для зразка №1 показує, що різкий стрибок напруги на початковому етапі синтезу зумовлений інтенсивними процесами пробією первинної оксидної плівки та приповерхневого шару сплаву. У цей момент частинки електроліту проникають у поверхню зразка, де в результаті електрохімічних і плазмохімічних реакцій відбувається утворення оксидів. За участю електроліту та електричного струму ці оксиди формують оксидокерамічне покриття на сплаві Д16, забезпечуючи зміну його

функціональних властивостей. Пробій реалізується внаслідок інжекції електронів із забороненої зони в зону провідності під дією сильного електричного поля.

На аноді спостерігається різке зростання напруги впродовж перших хвилин процесу. Так, протягом перших трьох хвилин напруга зростає найбільш інтенсивно, а в подальшому – повільніше, досягаючи за перші 10 хв значень у межах 140-154 В. Така поведінка напруги пов'язана з активними процесами пробою та формування розрядних каналів. Починаючи приблизно з 10-ї хвилини і до завершення процесу синтезу напруга стабілізується, що свідчить про встановлення стаціонарного режиму та стабільний перебіг процесу плазмоелектролітного оксидування (рис. 2.11).

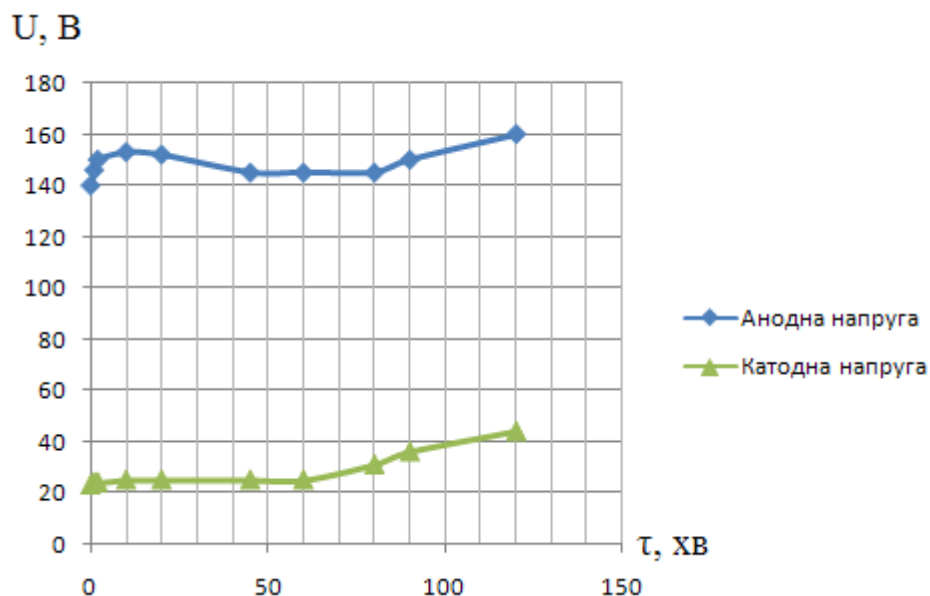


Рисунок 2.11 – Графік залежності анодної і катодної напруг від часу синтезу на втулці №1 з нанесеним покриттям зі сплаву Д16 (густина струму $I_k/I_a=1$)

Напруга на аноді і катоді, що була зафіксована у різні проміжки часу представлена в таблиці 2.1 (для зразка №1) та у таблиці 2.2 (для зразку №2).

Таблиця 2.1 – Напруга на аноді і катоді під час синтезу ОКП на зразку №1

U_a , В	140	146	130	150	155	152	145	145	150	160
U_k , В	23	24	24	25	25	25	25	31	36	44
τ , хв	0	1	2	10	20	45	60	80	90	120

Зразок №2 окисдований при густині струму $i = 7,5 \text{ А/дм}^2$ при співвідношенні густини струмів $I_k/I_a=1$.

Напруга на аноді звісно зростає на протязі п'яти хвилин, а далі сповільнюється. Так триває протягом двадцяти хвилин протікання процесу окисдування (рис. 2.12).

Різке зростання напруги пов'язане із активними процесами. Це обумовлено пробиванням струмом окисдної плівки та основного матеріалу сплаву. Тут напруга на аноді зростає від 80 до 165 В.

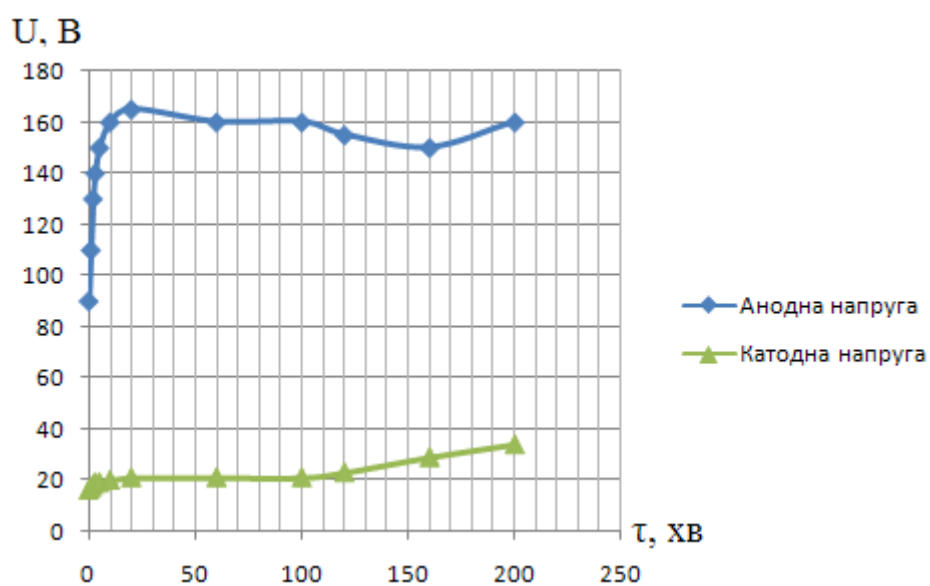


Рисунок 2.12 – Графік залежності анодної і катодної напруг від часу синтезу на зразку №2 з нанесеним покриттям зі сплаву Д16 (густина струму $I_k/I_a=1$)

Таблиця 2.2 – Напруга на аноді і катоді на зразку №2 під час синтезу

$U_a, \text{ В}$	80	110	130	140	150	160	165	160	160	155	150	165
$U_k, \text{ В}$	16	17	18	19	19	20	21	21	22	23	29	34
$\tau, \text{ хв}$	0	1	2	3	5	10	20	60	100	120	60	200

В період з двадцятої хвилини до завершення процесу синтезу напруга стабілізується – це про стабільність процесу синтезу (рис. 2.12).

Синтез ПЕО-покриття зразка №3 тривав протягом 40 хвилин. Впродовж 2-15-ти хв у даному процесі спостерігаємо зростання напруги на аноді зі 130 до 142В. Це активні процеси, що спричинені пробиванням струмом оксидної плівки. В період з 15-ої хвилини напруга стабілізується. Це говорить про стабільність процесу синтезу (рисунок 2.14).

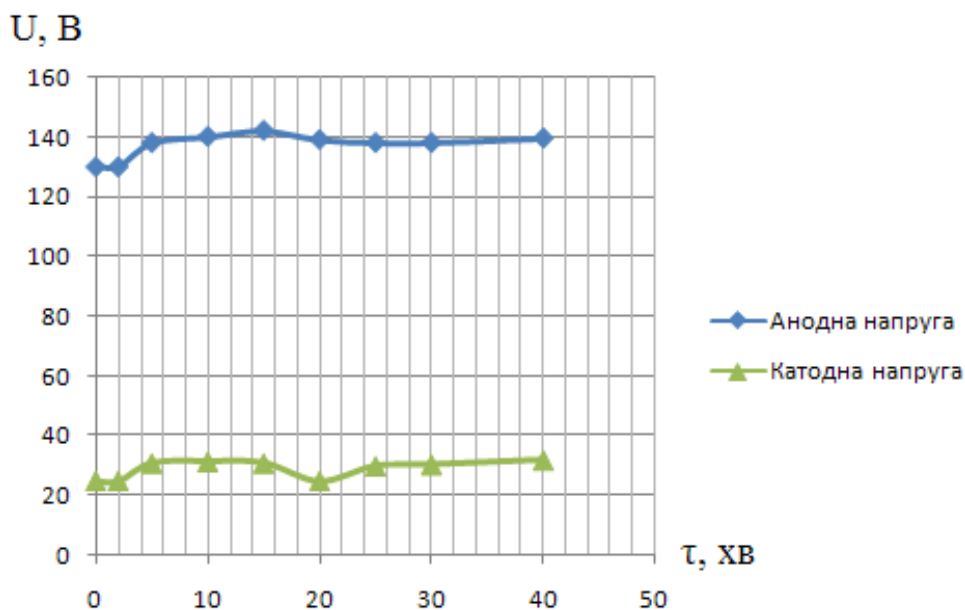


Рисунок 2.14 – Графік залежності анодної і катодної напруг від часу синтезу на зразку №3 з нанесеним покриттям зі сплаву Д16 (густина струму $I_k/I_a=1,5$)

Таблиця 2.3 – Значення анодної і катодної напруг та відповідних струмів на досліджуваних зразках від режимів ПЕО

Номер зразка	Склад електроліту, г/л			I_a/I_k А/дм ²	τ , хв	U_a , В	U_k , В	I_a , В	I_k , В
	КОН	Рідке скло	H ₂ O						
1	3	2	решта	20/20	120	160-140	44-23	1,6-1,4	1,5-1,4
2*	3	2		7,5/7,5	200	165-80	34-16	2,8-2,5	2,5
3	3	3	решта	15/10	40	142-130	32-25	2,1-1,4	2,25-2
4	2	2		15/10	50	150-134	37-35	2-1,4	2,2-2,1

* - ПЕО-покриття нанесено за два проходи.

Напруга на аноді швидко зростає впродовж перших п'яти хв процесу оксидування зразка №4 (рис. 2.15). В інтервалі часу з п'ятої до завершення процесу синтезу напруга завжди стабілізується. Це говорить про стабільність процесу нашого синтезу.

Таблиця 2.4 – Напруга на аноді і катоді під час синтезу ОКП на зразку №4

U_a , В	134	140	150	150	145	140
U_k , В	35	35	36	37	36	37
τ , хв	0	1	5	20	30	50

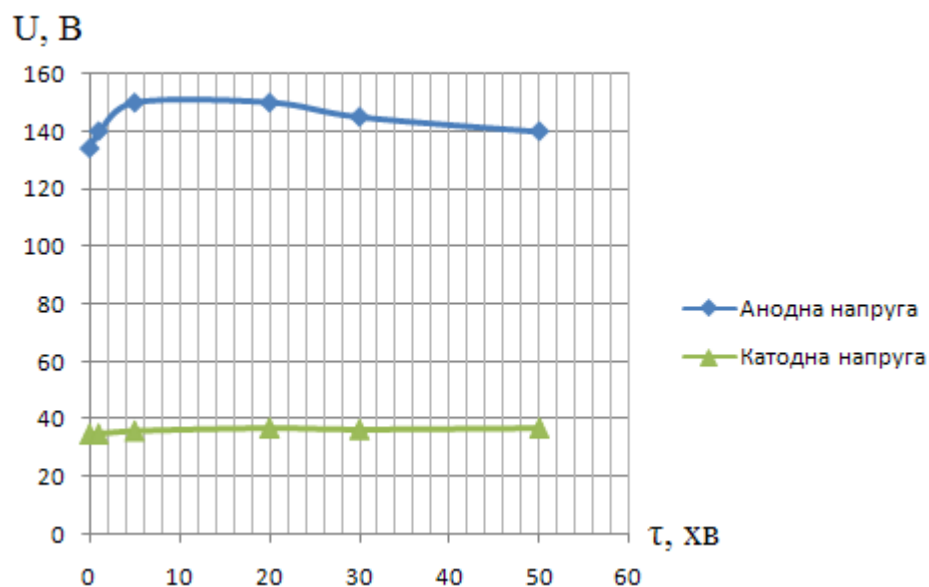


Рисунок 2.15 – Графік залежності анодної і катодної напруг на зразку №4 з нанесеним покриттям зі сплаву Д16 (густини струму $I_k/I_a=1,5$)

Співвідношення густини струмів, склад електроліту, а також інтервал зміни анодної і катодної напруг та струмів приведені в таблиці 2.3. Зразок 2* - це покриття у два проходи. Тривалість процесу утворення ОКП склало 200 хв.

Коливання напруги на катоді спричинене фізико-хімічними процесами. Напруга на катоді суттєвого значення не має, бо процес синтезу проходить лише на аноді.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НАПИЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНО-ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

3.1 Комп'ютерне моделювання

Комп'ютерне моделювання є методом розв'язування задач аналізу та синтезу складних систем, що базується на використанні їх комп'ютерних моделей. Сутність цього підходу полягає в отриманні якісних і кількісних результатів шляхом дослідження моделі, яка адекватно відображає властивості реального об'єкта або процесу. Якісні результати, отримані в процесі комп'ютерного моделювання, дають змогу виявити та пояснити раніше невідомі характеристики складної системи, зокрема її структуру, динаміку розвитку, стійкість і цілісність. Кількісні результати, як правило, мають прогнозний характер або слугують для інтерпретації минулих значень параметрів, що описують поведінку системи.

Комп'ютерне моделювання як самостійний напрям наукових досліджень отримало назву обчислювального експерименту. Обчислювальний експеримент являє собою методологію дослідження, засновану на аналізі математичної або інформаційної моделі з використанням логіко-математичних алгоритмів та засобів обчислювальної техніки. Порівняно з натурним експериментом, комп'ютерне моделювання має низку суттєвих переваг. По-перше, відсутня необхідність проведення досліджень на реальних фізичних, економічних або технічних об'єктах, що істотно знижує матеріальні та часові витрати. Масштаби експериментів можуть варіюватися довільно, а також забезпечується можливість багаторазового повторення дослідів із поступовою зміною вхідних параметрів.

По-друге, у низці галузей науки проведення натурних експериментів є небезпечним або принципово неможливим, зокрема в екології, ядерній фізиці чи астрофізиці.

По-третє, процес побудови математичної моделі та її подальшого дослідження сприяє глибшому розумінню фізичної суті явищ і характеристик

досліджуваного об'єкта, що дозволяє виявити ключові фактори та взаємозв'язки між ними.

Предметом комп'ютерного моделювання можуть бути різноманітні об'єкти та процеси, зокрема економічна діяльність підприємств і фінансових установ, інформаційно-обчислювальні мережі, технологічні процеси, а також будь-які реальні системи та явища. Незалежно від конкретної сфери застосування, комп'ютерне моделювання часто виступає центральною складовою системного аналізу — сукупності методологічних підходів, спрямованих на підготовку та обґрунтування управлінських, технічних або організаційних рішень.

Комп'ютерна модель складної системи повинна якомога повніше відображати основні фактори, взаємозв'язки, критерії та обмеження, що характеризують реальну ситуацію. Водночас вона має бути достатньо універсальною для опису широкого класу однотипних об'єктів і водночас достатньо простою, щоб забезпечити ефективне проведення досліджень із мінімальними обчислювальними витратами.

На даному етапі кваліфікаційної роботи було проаналізовано проблему напилення захисних покриттів на деталі, після чого прийнято рішення щодо розроблення програмного забезпечення, призначеного для моделювання процесу нанесення покриття. Використання такого підходу дозволяє істотно скоротити час обчислень, зменшити вплив людського чинника та, відповідно, мінімізувати ймовірність виникнення похибок.

У зв'язку з цим доцільним є застосування сучасних комп'ютерно-інформаційних технологій, особливо при дослідженні складних процесів і систем або при проектуванні нових технічних об'єктів. Комп'ютерна модель, як правило, є більш доступною та зручною для дослідження, ніж реальний об'єкт, що дозволяє оперативно змінювати параметри та аналізувати наслідки таких змін.

Проведення обчислювального експерименту із використанням комп'ютерно-інформаційних технологій має низку переваг порівняно з натурним експериментом, зокрема:

- відсутність потреби у складному лабораторному обладнанні;
- суттєве скорочення часових витрат на проведення досліджень;
- можливість вільного керування параметрами моделі та їх довільної зміни;
- можливість виконання досліджень у випадках, коли натурний експеримент є неможливим через віддаленість об'єкта, значну тривалість процесу або ризик виникнення необоротних змін у досліджуваній системі.

Таким чином, під моделюванням розуміють процес створення моделей та подальше дослідження об'єктів і процесів шляхом їх формалізованого опису й аналізу, що є одним із ключових інструментів сучасних наукових і прикладних досліджень.

В кваліфікаційній роботі запропоновано узагальнену класифікацію моделей за такими критеріями: за способом подання, за призначенням і за його станом (рис. 3.1).

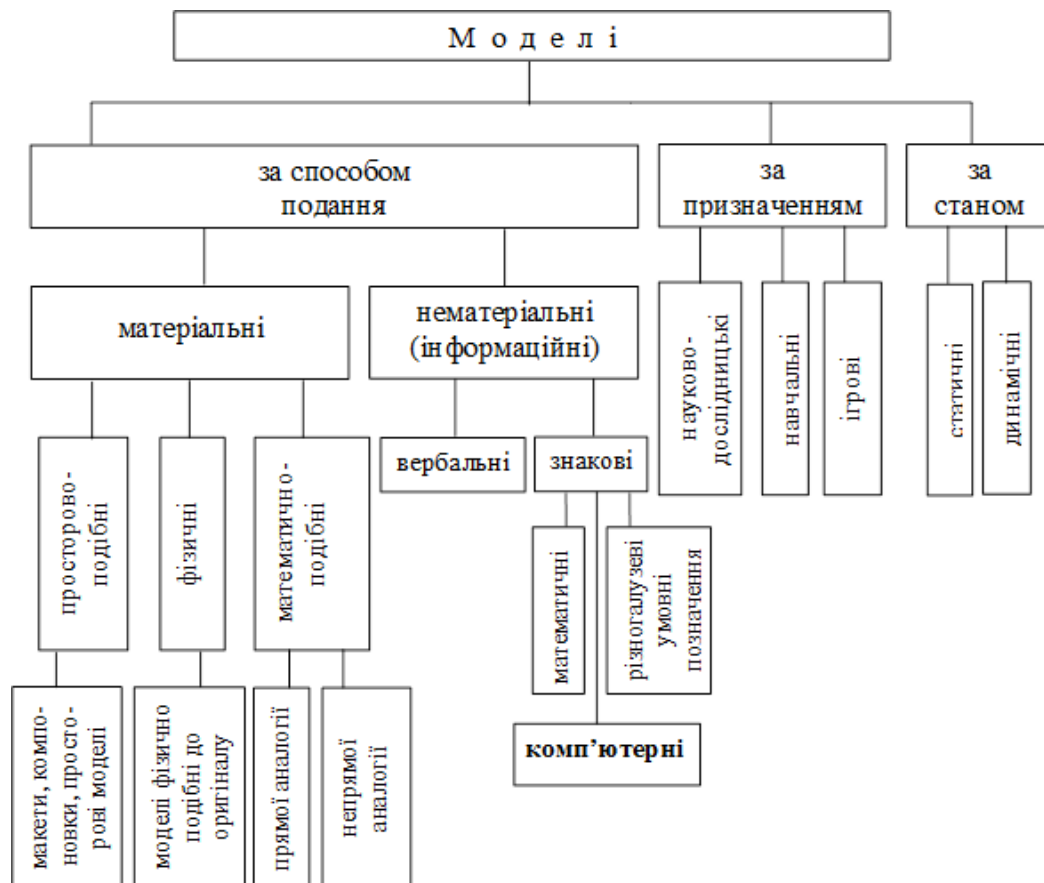


Рисунок 3.1 – Класифікація моделей

Інформаційна модель являє собою впорядковану сукупність відомостей, що описують властивості та поточний стан об'єкта дослідження, а також його взаємодію з зовнішнім середовищем. Така модель слугує основою для формалізованого подання об'єкта з метою подальшого аналізу та обробки інформації.

Математична модель визначається як система математичних залежностей, рівнянь і співвідношень, які відображають взаємозв'язки між параметрами об'єкта або процесу. Вона забезпечує заміну реального об'єкта чи явища їх формалізованим описом, що дозволяє досліджувати поведінку системи за допомогою аналітичних або чисельних методів.

Комп'ютерна модель є інформаційною та, водночас, математичною моделлю, реалізованою із застосуванням програмно-апаратних засобів обчислювальної техніки. Така модель забезпечує можливість проведення чисельних експериментів, автоматизованої обробки даних і візуалізації результатів дослідження.

Під моделюванням у науковому розумінні прийнято вважати опосередкований метод дослідження об'єктів і процесів шляхом побудови, аналізу та вивчення їх аналогів – моделей.

Метод моделювання виконує низку гносеологічних функцій, зокрема демонстраційну, евристичну, трансляційну, апроксимаційну, екстраполяційно-прогностичну, а також функцію відображення об'єктивної дійсності. Сукупність зазначених функцій у їх діалектичній єдності визначає роль моделювання як одного з базових інструментів наукового пізнання.

Процес комп'ютерного моделювання реалізується поетапно та включає такі основні стадії:

1. Збір і аналіз інформації про об'єкт дослідження, формулювання гіпотез і проведення предмодельного аналізу.
2. Проєктування структури моделі та визначення складу окремих підмоделей.

3. Побудова специфікацій моделі, розроблення, налагодження й інтеграція підмоделей у єдину систему, а також ідентифікація параметрів моделі за необхідності.

4. Дослідження моделі шляхом вибору методів аналізу та розроблення алгоритмів і програм моделювання.

5. Оцінювання адекватності, стійкості та чутливості моделі до зміни вхідних параметрів.

6. Аналіз ефективності застосованих засобів моделювання та оцінка витрачених ресурсів.

7. Інтерпретація й аналіз результатів моделювання з установленням причинно-наслідкових зв'язків у досліджуваній системі.

8. Формування звітної документації та підготовка проєктних або прикладних рішень.

9. Уточнення та модифікація моделі з урахуванням отриманих результатів і повторне звернення до досліджуваного об'єкта на основі нових знань.

3.2 Комп'ютерне моделювання з використанням програмного забезпечення на основі JavaScript

Сучасні комп'ютерно-інформаційні технології створюють широкі можливості для підвищення ефективності організації навчального та виробничого процесів, а також для забезпечення високої результативності інженерних досліджень. На сьогодні існує значна кількість комп'ютерно-імітаційних систем і програмних ресурсів, однак далеко не всі з них здатні виконувати повноцінні інженерні розрахунки, необхідні для аналізу та оптимізації технологічних процесів.

Однією з основних причин порівняно низького ресурсу машин і механізмів у машинобудуванні є інтенсивний знос деталей. В умовах сучасного виробництва ключовим напрямом підвищення довговічності деталей є вдосконалення економічно доцільних технологічних процесів їх відновлення у поєднанні з використанням доступних і недорогих матеріалів за умови

забезпечення високої надійності відремонтованих виробів. Реалізація цього підходу часто обмежується недостатнім використанням сучасних методів ремонту та відновлення деталей. Найбільш перспективними у цьому контексті є технології електрометалізаційного відновлення та плазмоелектролітного оксидування. З огляду на це в роботі прийнято рішення об'єднати зазначені методи в межах єдиного програмного комплексу та автоматизувати процеси їх моделювання.

Під час розроблення програмного продукту було обрано мову програмування високого рівня JavaScript, яка характеризується гнучкістю, динамічністю та широкими можливостями інтеграції з веб-технологіями. JavaScript є інтерпретованою мовою програмування з підтримкою об'єктно-орієнтованої парадигми, що забезпечує зручність реалізації алгоритмів комп'ютерного моделювання та взаємодії з користувачем.

На стороні клієнта JavaScript є однією з найбільш поширених мов програмування. Програмний код може бути безпосередньо вбудований у HTML-документ або підключений до нього, після чого інтерпретується веб-браузером. Такий підхід дозволяє створювати не статичні веб-сторінки, а інтерактивні програмні модулі, які забезпечують взаємодію з користувачем, керування елементами браузера та динамічне формування HTML-контенту.

Застосування JavaScript на стороні клієнта має низку переваг порівняно з традиційними серверними сценаріями. Зокрема, забезпечується миттєвий зворотний зв'язок із користувачем без необхідності перезавантаження сторінки, що підвищує зручність і швидкість роботи з програмою. Крім того, зростає рівень інтерактивності, оскільки можна реалізовувати інтерфейси, які реагують на дії користувача за допомогою миші або клавіатури.

Використання JavaScript також дає змогу створювати більш функціонально насичені інтерфейси, зокрема з елементами перетягування, повзунками та іншими інтерактивними компонентами, що забезпечує зручну візуалізацію результатів комп'ютерного моделювання та ефективну взаємодію користувача з програмним комплексом (рис. 3.2).

```

1
2 function quickSort(items, left, right) {
3     var index = 0;
4     if (items.length > 1) {
5         left = typeof left !== 'number' ? 0 : left;
6         right = typeof right !== 'number' ? items.length-1 : right;
7         index = partition(items, left, right);
8         if (left < index-1) {
9             quickSort(items, left, index - 1);
10        }
11        if (index < right) {
12            quickSort(items, index, right);
13        }
14    }
15    return items;
16 }
17 // first call
18 var result = quickSort(items);

```

Рисунок 3.2 – Інтерфейс процес написання програми у JavaScript

З метою компенсації нестрогої типізації та обмежених механізмів оброблення помилок, що зумовлені відсутністю етапу компіляції в інтерпретованих мовах програмування, а також для забезпечення належної якості програмного продукту, необхідним є дотримання принципів суворої структурної організації програмного коду. Такий підхід дозволяє підвищити надійність, керованість і відтворюваність результатів обчислень.

Розроблені у межах даної кваліфікаційної роботи програмні засоби реалізують запропоновані математичні моделі та методи й забезпечують розв'язання прикладних задач, пов'язаних із моделюванням фазових переходів з підвищеною точністю. Крім того, програмний комплекс дозволяє виконувати умовну параметричну оптимізацію швидкісних режимів наплавлення відносно заданих технологічних параметрів. Реалізована методика візуалізації та збереження результатів чисельних експериментів забезпечує отримання детальної інформації про фізико-технічні та числові параметри розрахунків, що є важливим для подальшого аналізу та інтерпретації результатів.

На сьогодні існує значна кількість електронних систем і програмних ресурсів, однак далеко не всі з них придатні для виконання повноцінних

інженерних розрахунків, особливо у сфері моделювання складних фізико-технологічних процесів.

У процесі розроблення програмного забезпечення було обрано мову програмування високого рівня JavaScript, що зумовлено її універсальністю, широкими можливостями інтеграції та підтримкою сучасних програмних бібліотек. На сучасному етапі розвитку програмних технологій існує велика кількість модулів і бібліотек, які дозволяють ефективно реалізовувати різноманітні прикладні задачі, зокрема у сфері чисельного моделювання, оптимізації та візуалізації інженерних розрахунків.

3.3 Моделювання захисного електрометалізаційного та ПЕО-покриття

Розроблене програмне забезпечення призначене для моделювання процесів формування захисних покриттів методами електродугового напилення та плазмоелектролітного оксидування і має розширені функціональні можливості, що забезпечують виконання інженерних розрахунків та аналіз результатів.

До основних функціональних можливостей програми належать:

- виконання статичних розрахунків основних технологічних параметрів процесу, зокрема часу напилення, товщини сформованого шару та пористості покриття за заданих умов;
- використання вбудованих баз даних матеріалів і технологічних параметрів, необхідних для проведення розрахунків та перевірки їх коректності;
- візуалізація результатів моделювання у вигляді графіків, табличних даних та тривимірної моделі деталі з нанесеним покриттям.

Комп'ютерна програма забезпечує наочне відображення результатів розрахунків із використанням кольорових графічних зображень, що значно спрощує інтерпретацію отриманих даних і порівняльний аналіз різних режимів напилення.

У межах даної роботи здійснюється розроблення програмного комплексу, спрямованого на дослідження проблем захисних покриттів та порівняльний аналіз двох технологій їх формування – електрометалізаційного напилення та плазмоелектролітного оксидування. Програма поєднує в собі чисельні методи розрахунку з розвиненими засобами візуалізації, що дозволяє комплексно оцінювати вплив технологічних параметрів на характеристики покриттів.

Для відтворення та порівняння захисних покриттів, сформованих методами ПЕО та електрометалізаційного напилення, у програмі задаються вихідні геометричні параметри деталі, а саме внутрішній діаметр, зовнішній діаметр та висота виробу. Крім того, вводяться технологічні характеристики, що безпосередньо пов'язані з процесами напилення, зокрема:

- продуктивність напилення;
- товщина дефектного шару;
- інтенсивність зношування поверхні;
- густина матеріалу;
- швидкість обертання деталі;
- швидкість переміщення металізатора відносно напилюваної поверхні.

На основі введених параметрів програмний комплекс виконує розрахунок режимів нанесення покриття та забезпечує їх візуалізацію, що представлено на рисунку 3.3.

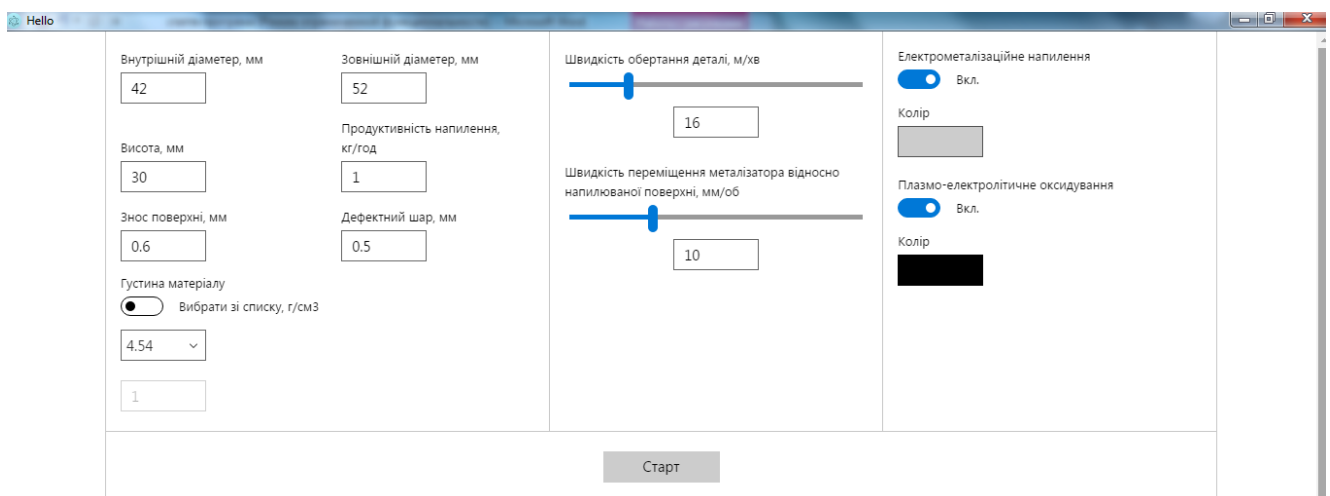


Рисунок 3.3 – Інтерфейс програми «Комп'ютерно-імітаційне моделювання напилення захисних покриттів на деталі конструкційного призначення»

Нам необхідно за допомогою програми напилити поверхню втулки і отримати розміри $d = 50 \pm 0,08$ мм; $L = 30$ мм; сталь 25ХГ; знос поверхні – $z_{\pi} = 0,6$ мм (рис. 3.4 та рис. 3.5).

Таблиця 3.1 – Вхідні параметри для програми

Діаметр деталі, які необхідно отримати	d	50 ± 0.08 мм
Діаметр деталі після обробки поверхні під напилення	d_{π}	48,4 мм
Розмір даного елемента заготовки	$d_{н}$	52 мм
Довжина деталі	L	30 мм
Знос поверхні	z_{π}	0,6 мм
Припуск на механічну обробку попередньої	$z_{мп}$	0.2 мм
Дефектний шар	$C_{д}$	0.5 мм
Припуск на механічну обробку		0.5 мм
Кількість обертів за хвилину	n	100 об/хв.
Переміщення металізатора відносно напилюваної поверхні	S	10 мм/об
Припуск під напилення	Z_0	1.8 мм

В нашому випадку $t_0 = 3,2$ хв.

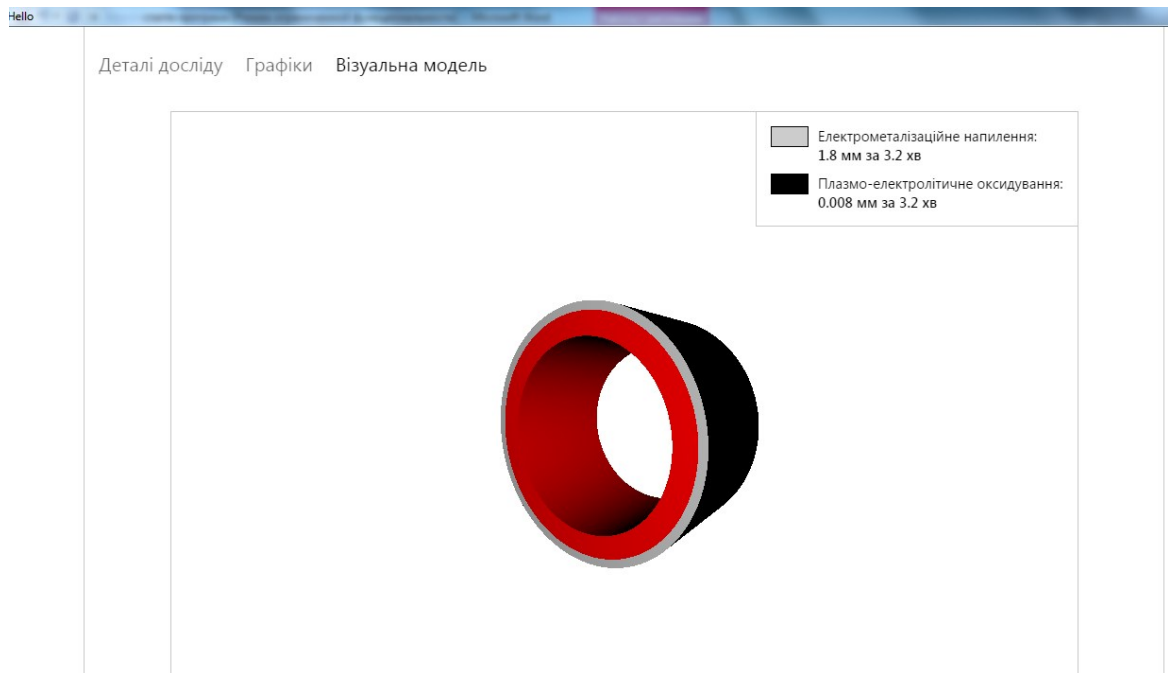


Рисунок 3.4 – Зображення моделі деталі після наплення

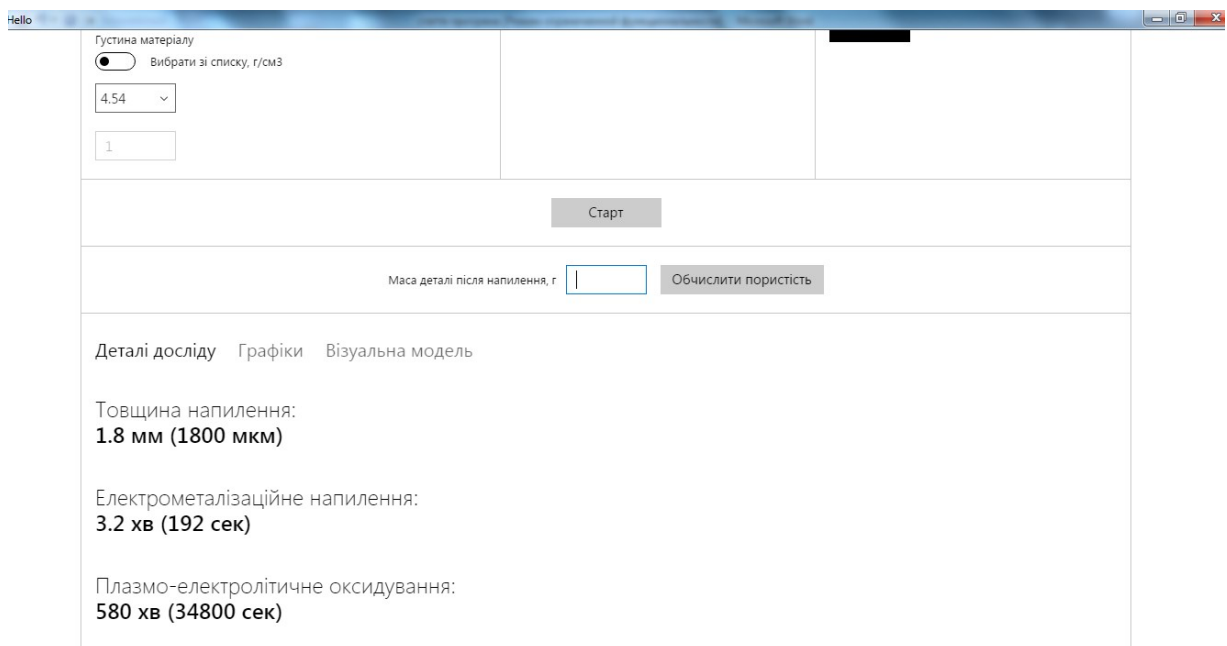


Рисунок 3.5 – Порівняння двох методів наплення протягом певного часу

Програма порівнює два методи і показує за який відрізок часу буде зроблена відповідна товщина наплення електрометалізаційним методом або ПЕО методом.

Ми тут бачимо і вирішуємо, який час нас влаштовує. Можна використовувати два методи – електрометалізаційний служитиме своєрідною

підложкою для ПЕО метода. Це дає більшу мікротвердість деталі, корозійну стійкість та довговічність.

Таблиця 3.2 – Порівняння електрометалізаційного та ПЕО методів наплення по часу

Методи наплення	Товщина наплення, мм	Час наплення, хв
Електрометалізаційний метод	1,8	3,2
ПЕО метод	1,8	588
Електрометалізаційний метод	2	3,2
ПЕО метод	2	675
Електрометалізаційний метод	2,2	3,2
ПЕО метод	2,2	716
Електрометалізаційний метод	2,6	3,3
ПЕО метод	2,6	873
Електрометалізаційний метод	2,7	3,3
ПЕО метод	2,7	907

Електричні параметри синтезу оксидокерамічних покриттів, як правило, підбирають експериментальним шляхом без достатнього теоретичного обґрунтування. Водночас саме густина струму та прикладена напруга визначають характер і інтенсивність електричних розрядів, температурні умови в приповерхневій зоні сплаву, а також істотно впливають на структурні та функціональні характеристики сформованого покриття.

У ході багаторазових експериментальних досліджень, було встановлено узагальнену закономірність росту оксидокерамічного шару, яка використовується в розробленому програмному забезпеченні. Зокрема, встановлено, що за середніх технологічних режимів плазмоелектролітного оксидування швидкість нарощування захисного оксидованого покриття становить приблизно 1-5 мкм за хвилину процесу.

До основних електрофізичних параметрів процесу плазмоелектролітного оксидування належать анодна напруга U_a , катодна напруга U_k , густини анодного та катодного струмів I_a і I_k , тривалість імпульсів і їх частота, а також загальна тривалість процесу τ , хв.

Сукупність зазначених параметрів визначає умови формування мікророзрядів, інтенсивність плазмохімічних реакцій та кінцеві властивості оксидокерамічного покриття (рис. 3.6).

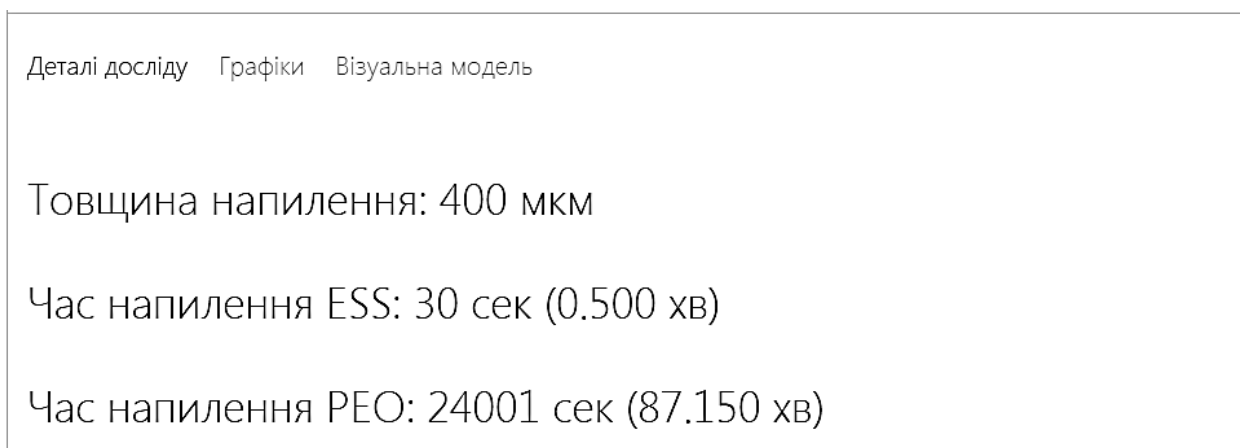


Рисунок 3.6 – Порівняння двох методів напилення

Зі збільшенням дистанції напилювання спостерігається тенденція до зростання пористості сформованого покриття. Це зумовлено не лише зниженням температури частинок у момент їх зіткнення з поверхнею основи, але й зменшенням швидкості їхнього руху, що безпосередньо впливає на характер пластичної деформації частинок і умови формування шару. Сукупна дія зазначених факторів визначає підвищення пористості напилених матеріалів за великих дистанцій напилювання.

Водночас за малих відстаней напилювання, які відповідають утворенню більш щільних покриттів із низькою пористістю, можливе виникнення негативних явищ, зокрема перегріву та термічної деформації основи. Крім того, напилення на надто малих дистанціях може ускладнювати отримання рівномірної та гладкої поверхні покриття внаслідок локального перегріву й нерівномірного осадження матеріалу.

Зі зростанням дистанції напилювання збільшується кількість пор у покритті, зокрема відкрита пористість. Найбільш щільними та такими, що характеризуються мінімальною відкритою пористістю, є покриття, сформовані методом дротового напилення. У таких покриттях більшість пор ізольована від зовнішнього середовища, тобто пористість має переважно закритий характер (рис. 3.7).

Під час нанесення порошкових матеріалів зменшення витрати напилюваного порошку та зниження швидкості переміщення напилювального пальника сприяють певному підвищенню щільності покриття за рахунок покращення умов осадження частинок і їх ущільнення.

Крім того, покриття, сформовані за підвищеної температури основи, характеризуються кращим зчепленням частинок між собою та нижчим рівнем пористості. Це пояснюється інтенсифікацією дифузійних і пластичних процесів у приповерхневій зоні, що сприяє утворенню більш щільної та однорідної структури напиленого шару.

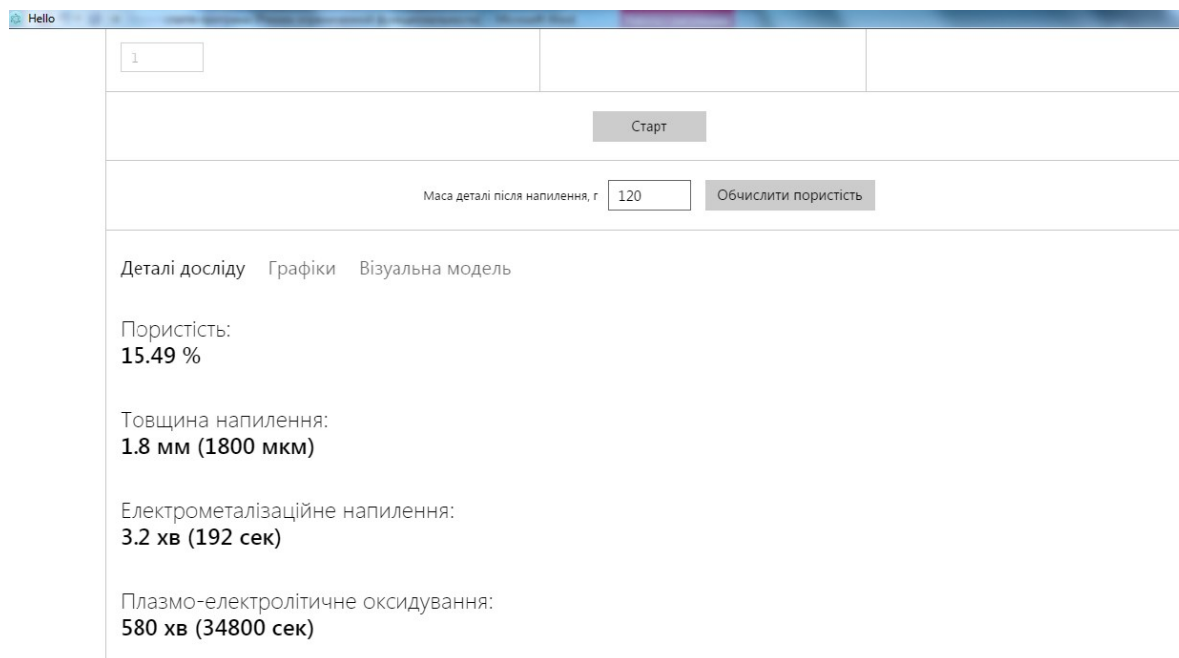
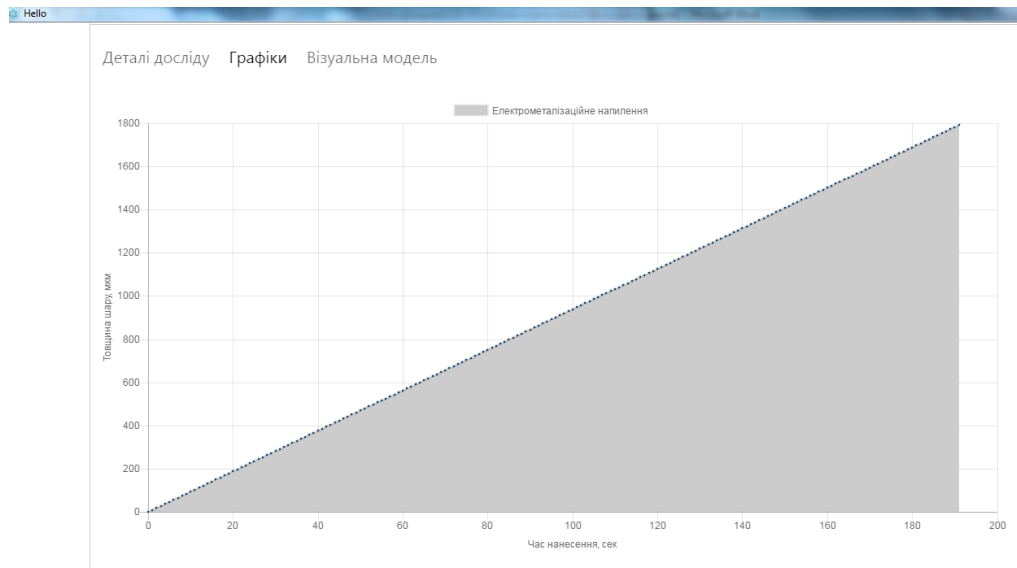
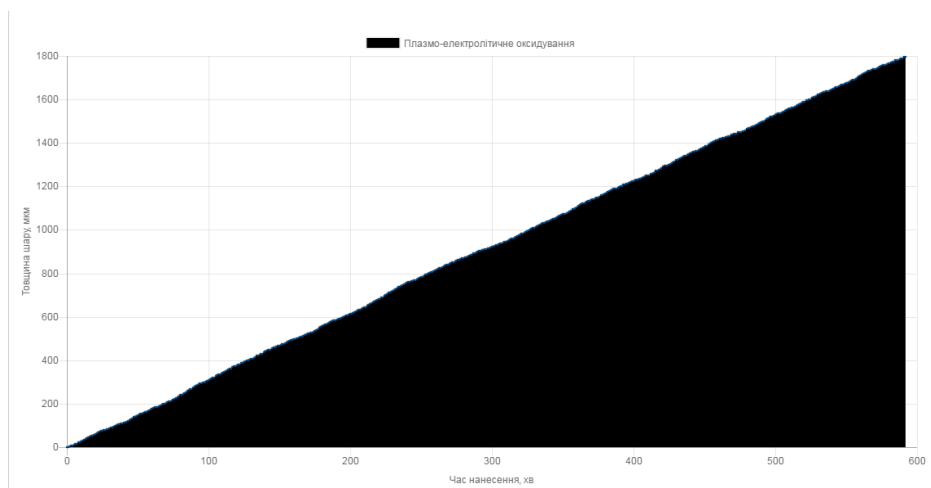


Рисунок 3.7 – Показ в інтерфейсі програми вихідних показників – пористість, товщина напилення, час напилення

Якість покриттів і властивості в значній мірі залежать від тиску розпилювального газу і дистанції напилювання. На рисунках 3.8 можемо спостерігати нарощування захисного шару в той чи інший відрізок часу.



а)



б)

Рисунок 3.8 – Графіки залежності товщини шару від часу у електрометалізаційному а) та ПЕО б)

РОЗДІЛ 4

ФІЗИКО–МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛАЗМОЕЛЕКТРОЛІТНО ОКСИДОВАНИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ ЗІ СПЛАВУ Д16 НА СТАЛІ

4.1 Визначення товщини комбінованих захисних покриттів

Комбіноване захисне покриття, яке утворене напиленням електрометалізаційним шаром і плазмоелектролітним оксидокерамічним шаром можна досліджувати на товщину шару. Товщину кожного з цих покриттів визначали шляхом промірів у трьох місцях, а потім ще визначенням середнього значення товщини для кожного з покриттів. Шляхом додавання середньої товщини електродугового та ПЕО-покриття було знайдено середню товщину нашого комбінованого захисного покриття. Товщину кожного покриття визначали на металографічному мікроскопі за допомогою шкали лінійки.

1) Товщина електродугового покриття: $(35 + 31 + 33) / 3 = 33$ мкм.

2) Товщина плазмоелектролітно оксидованого покриття: $(7 + 11 + 8) / 3 = 8,6$ мкм.

3) Товщини комбінованого захисного покриття рівне $33 + 8,6 = 41,6$ мкм.

Для зразка №1 товщина комбінованого захисного покриття становить 41,6 мкм.

Для зразка №2 товщина комбінованого захисного покриття становить 62,7 мкм.

Графічна залежність товщини покриття від методу нанесення для зразків №1 та №2 зображена на рисунку 4.1.

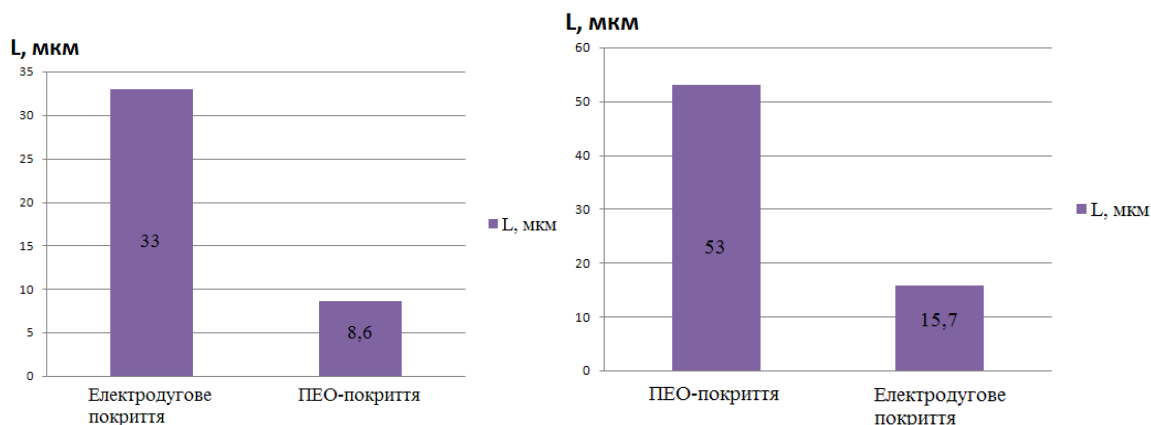


Рисунок 4.1 – Графічна залежність товщини покриття від методу нанесення:

а) зразок №1; б) зразок №2

Для зразка №3 визначимо товщину комбінованого захисного покриття в наступній послідовності.

1) Товщина електродугового покриття – $(54 + 52 + 52) / 3 = 49$ мкм.

2) Товщина ПЕО-покриття – $(14 + 17 + 13) / 3 = 14,7$ мкм.

3) Товщини комбінованого захисного покриття – $49 + 14,7 = 63,7$ мкм.

Для зразка №3 товщина комбінованого захисного покриття становить 63,7 мкм.

Для зразка №4 визначаємо товщину комбінованого захисного покриття в такій послідовності.

1) Товщина електродугового покриття – $(18 + 21 + 22) / 3 = 20,3$ мкм.

2) Товщина ПЕО-покриття – $(15 + 9 + 13) / 3 = 12,3$ мкм.

3) Товщини комбінованого захисного покриття – $20,3 + 12,3 = 32,6$ мкм.

Для зразка №4 товщина комбінованого захисного покриття становить 32,6 мкм.

Графічні залежності товщини покриття від методу нанесення для зразків №3 та №4 зображена на рисунку 4.2.

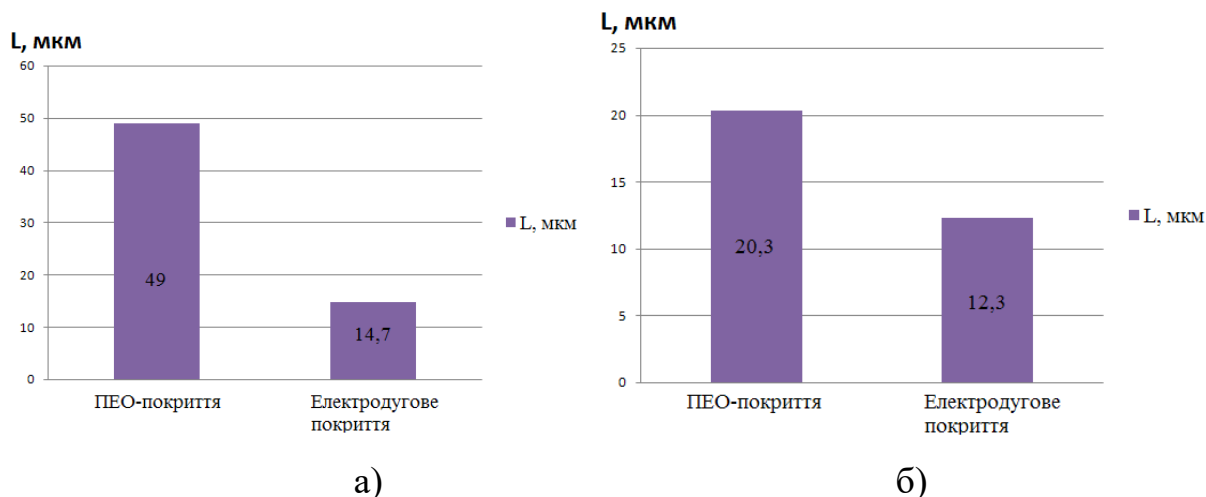


Рисунок 4.2 – Графічна залежність товщини покриття від методу нанесення:
а) зразок №3; б) зразок №4

4.2 Встановлення мікротвердості захисних покриттів

Встановлення мікротвердості зразка №1.

Для визначення мікротвердості був використаний мікротвердомір ПМТ-3. Визначали мікротвердість основного металу, електродугового та плазмоелектролітно окисованого покриттів – робилося по три уколи у кожній області.

Після уколів залишалися відбитки від індентора. Вимірювали діагональ відбитка та підставляли у відповідну формулу. Так знаходили мікротвердість кожного з зразків.

Найбільша мікротвердість оксидокерамічного покриття спостерігається у зразка №2 ($H_{\mu}=8305 \text{ кг/мм}^2$), а електродугового покриття – у зразка №4 ($H_{\mu}=1526 \text{ кг/мм}^2$).

Для того, щоб побачити як змінюється мікротвердість покриття від його товщини покажемо графіки залежності мікротвердості від товщини покриття (рис 4.3 та 4.4).

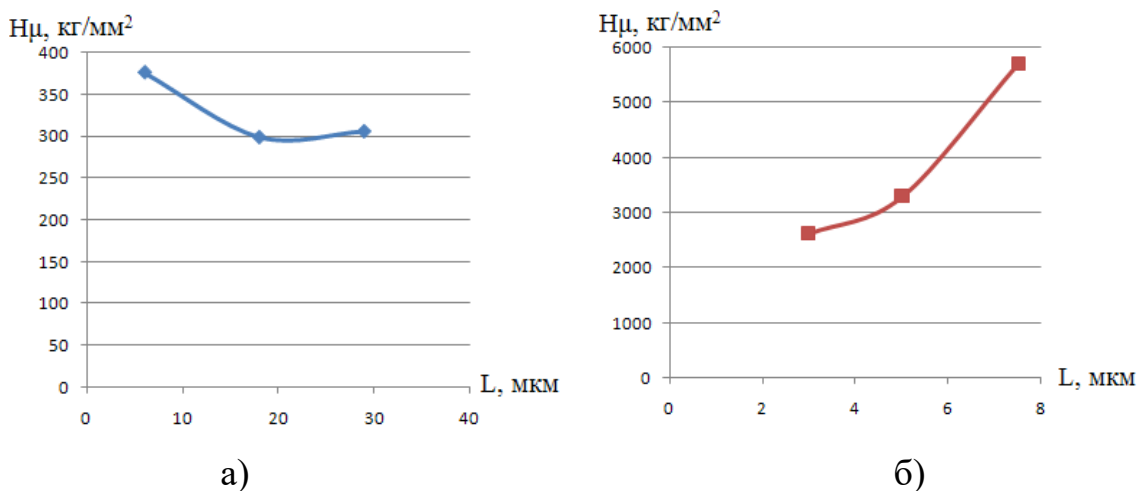


Рисунок 4.3 – Графік залежності мікротвердості від товщини покриття зразка №1: а) електродугове покриття; б) ПЕО-покриття

Зразок №1 - з ростом товщини електродугового покриття мікротвердість до середини покриття спадає, а потім стрімко зростає. Мікротвердість ПЕО-покриття зразка №1 зростає з ростом товщини. Це пов'язано з фізико-хімічними процесами, що відбуваються у процесі напилення електродугового покриття та синтезу ОКП.

Зразок №2 - з ростом товщини електродугового покриття мікротвердість покриття зростає як до середини покриття так і до межі з ПЕО-покриттям, а потім стрімко зростає. Це пов'язано з реакціями окислення, що проходять при синтезі ОКП.

Мікротвердість ПЕО-покриття зразка №2 спочатку спадає до середини покриття, а потім стрімко зростає. Така зміна мікротвердості окисдованого покриття пов'язана з різними фізико-хімічними процесами, що відбуваються у процесі напилення електродугового та синтезу ПЕО-покриття (рис. 4.4).

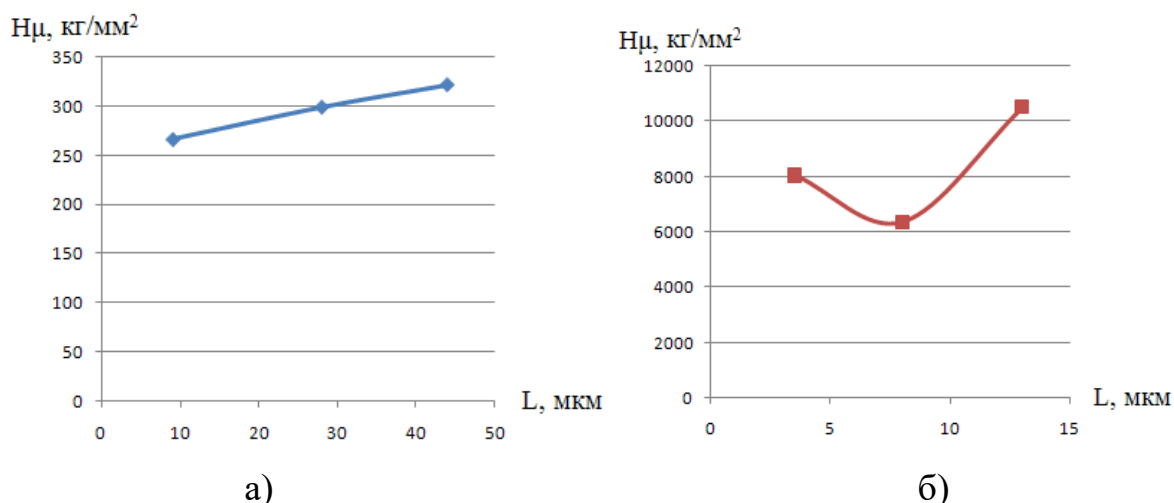


Рисунок 4.4 – Графік залежності мікротвердості від товщини покриття зразка №2: а) електродугове покриття; б) ПЕО-покриття

Фактичні значення мікротвердості покриттів при різних товщинах приведені в таблицях 4.1 і 4.2 для зразків №1 та №2 (рис. 4.5).

Таблиця 4.1 – Залежність мікротвердості покриття від товщини зразка №1

Електродугове покриття			
Товщина L , мкм	6	18	29
Мікротвердість, H_c , кг/мм ²	376	299	306
ПЕО-покриття			
Товщина L , мкм	3	5	7,5
Мікротвердість, H_c , кг/мм ²	2627,5	3296	5706

Таблиця 4.2 – Залежність мікротвердості покриття від товщини зразка №2

Електродугове покриття			
Товщина L , мкм	9	28	44
Мікротвердість, H_c , кг/мм ²	266	299	321,9
ПЕО-покриття			
Товщина L , мкм	3,5	8	13
Мікротвердість, H_c , кг/мм ²	8046,9	6358	10510,2

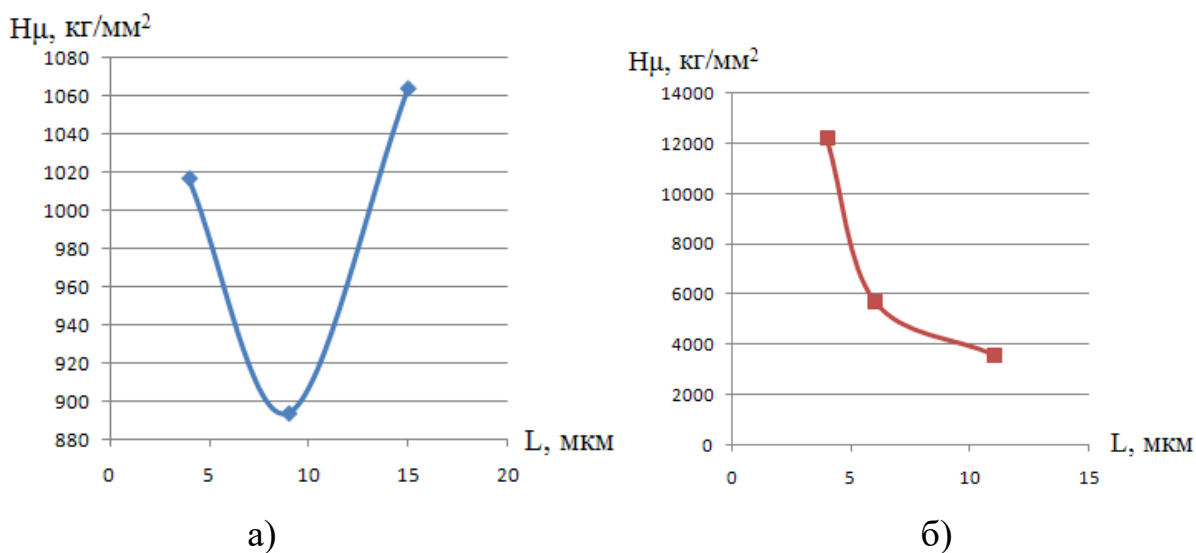


Рисунок 4.5 – Графік залежності мікротвердості від товщини покриття зразка №4: а) електродугове покриття; б) ПЕО-покриття

Узагальнені графіки зміни мікротвердості приведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Середнє значення мікротвердості зразків

Зразок	Покриття		
	Основний метал	Електродугове покриття	ПЕО-покриття
№1	592,8	327	3876,5
№2	653,3	295,6	8305
№3	736,3	613,6	4616
№4	991,6	1526,6	7157

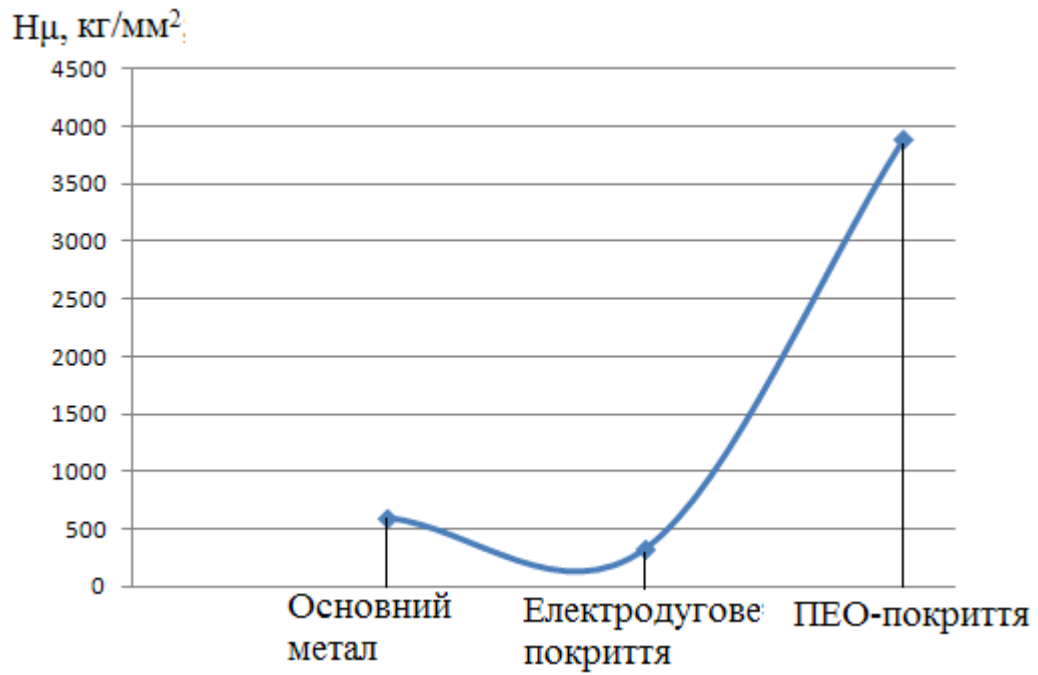


Рисунок 4.6 – Графік зміни мікротвердості в залежності від методу нанесення покриття зразка №1

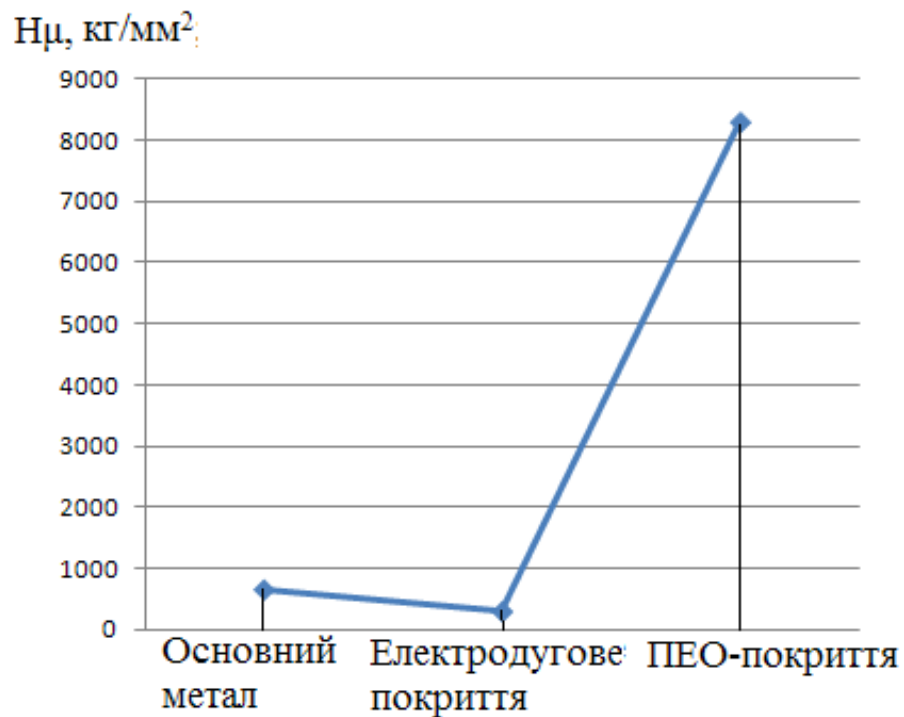


Рисунок 4.7 – Графік зміни мікротвердості в залежності від методу нанесення покриття зразка №2

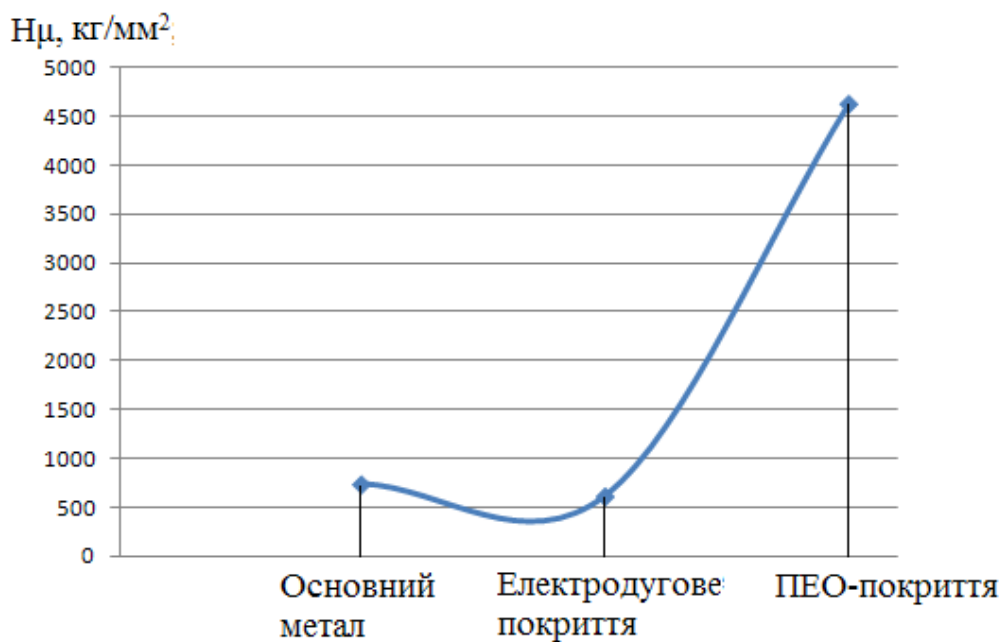


Рисунок 4.8 – Графік зміни мікротвердості в залежності від методу нанесення покриття зразка №3

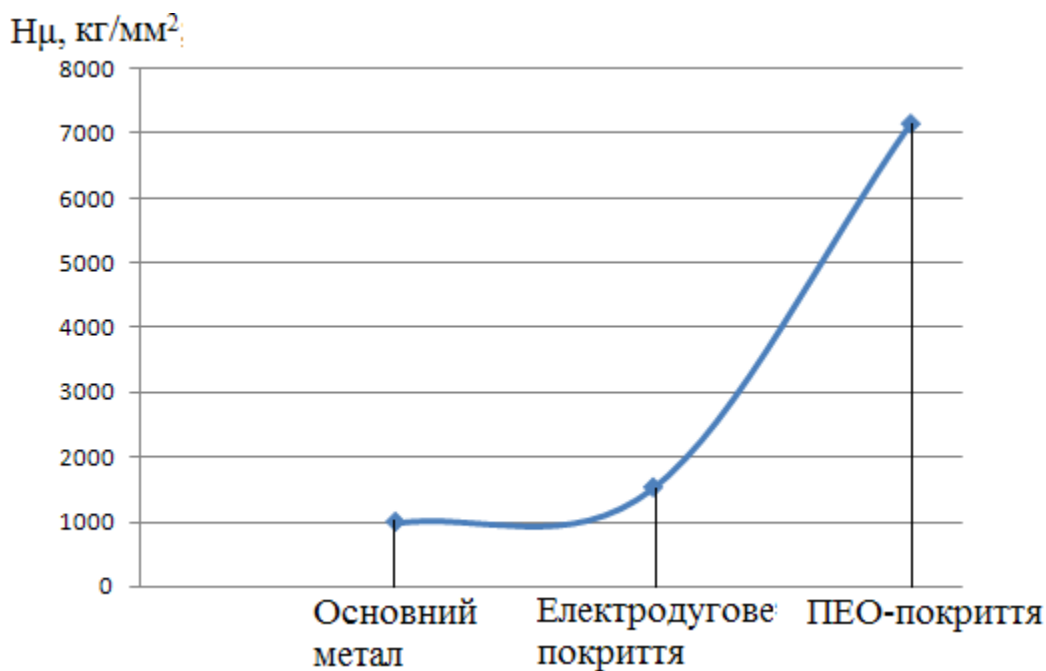


Рисунок 4.9 – Графік зміни мікротвердості в залежності від методу нанесення покриття зразка №4

На графіках зміни мікротвердості на зразках №1, №2 та №3 мікротвердість спочатку спадає на електродуговому покритті, після цього починає дуже стрімко зростати переходячи на ПЕО-покриття.

Серед найпрогресивніших та найпродуктивніших прикладних програм для обробки та аналізу металографічних зображень є Avizo®. Для перевірки наших зразків на достовірність отриманих результатів застосуємо методику цього програмного забезпечення (рис. 4.10).

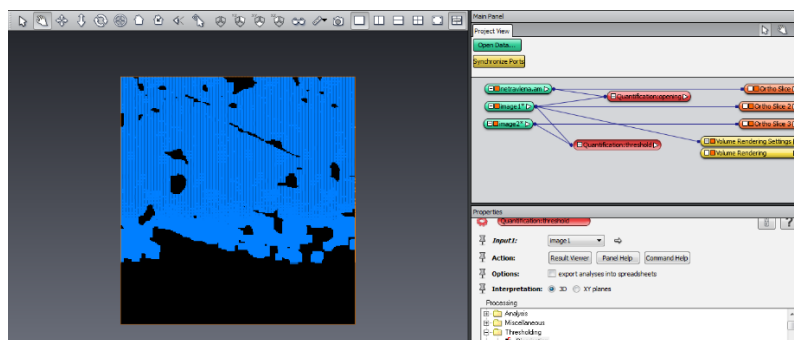


Рисунок 4.10 – Нетравлений зразок – зріз втулки з покриттям

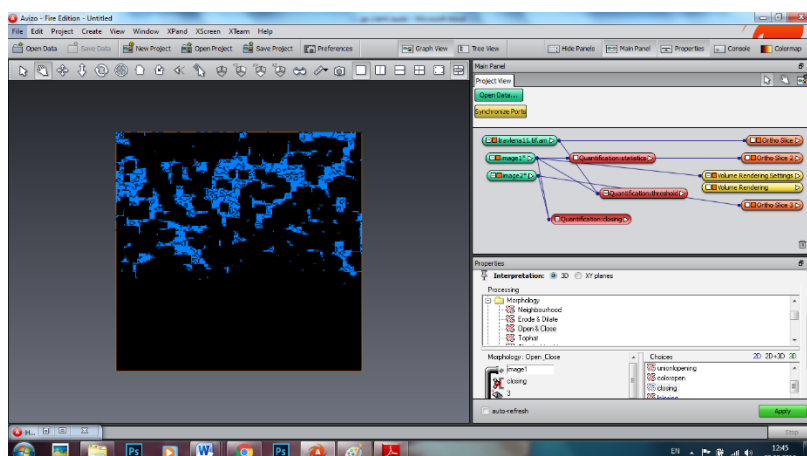


Рисунок 4.11 – Травлений зразок – зріз втулки з покриттям

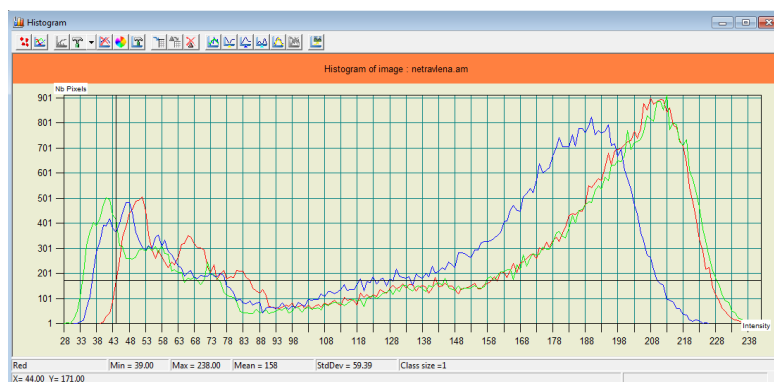


Рисунок 4.12 – Узагальнена гістограма зміни мікротвердості втулок №1 - №4, які виготовлені з порошку сталі ШХ15

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі виконано комплекс теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на розроблення та застосування комбінованих захисних покриттів для деталей конструкційного призначення – втулок, що експлуатуються в умовах реверсивно-поступального тертя.

У ході виконання роботи було набуто та узагальнене знання з технологій електродугової металізації та плазмоелектролітного оксидування, а також досліджено вплив електрофізичних параметрів синтезу на формування та властивості оксидокерамічних покриттів.

На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Проведено аналіз науково-технічної літератури та інформаційних ресурсів, присвячених сучасним методам захисту і відновлення деталей машин, зокрема технологіям електродугової металізації та плазмоелектролітного оксидування, що дозволило обґрунтувати доцільність застосування комбінованих покриттів.

2. Визначено товщину сформованих захисних покриттів і мікротвердість відновлених порошкових втулок, що дало змогу оцінити ефективність використаних технологічних режимів.

3. Досліджено вплив електрофізичних характеристик процесу плазмоелектролітного оксидування на експлуатаційні властивості покриттів, зокрема на їх мікроструктуру та мікротвердість.

4. Розроблено комп'ютерну програму **«Комп'ютерно-імітаційне моделювання для наплення захисних покриттів на деталь»**, яка забезпечує виконання статичних інженерних розрахунків, зокрема визначення часу наплення, товщини покриття та його пористості за заданих технологічних умов.

У результаті експериментальних досліджень встановлено такі основні характеристики комбінованих захисних покриттів – найбільша товщина комбінованого захисного покриття зафіксована на зразку №3 та становить 63,7 мкм.

Максимальне значення мікротвердості основного металу, що дорівнює $H_{\mu}=991,6\text{кг/мм}^2$, спостерігається на зразку №4.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування комбінованих захисних покриттів, сформованих шляхом електродугової металізації з подальшим плазмоелектролітним оксидуванням, для підвищення зносостійкості та довговічності деталей, що працюють у складних умовах тертя.

Розроблений програмний інструмент може бути використаний для подальшої оптимізації технологічних режимів нанесення покриттів та впровадження результатів досліджень у практику машинобудування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Оптимізація властивостей багатошарових поруватих проникних матеріалів / Повстяной О. Ю., Рудь В. Д., Імбірович Н. Ю., Гальчук Т. Н., Четвержук Т. І., Смаль М. В., Дзюбинський А. В. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2020. Том 56. №4. С. 88-92
2. Кваліфікаційна робота: методичні вказівки до оформлення кваліфікаційних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів вищої освіти всіх освітніх програм денної та заочної форм навчання / уклад. Н.В. Ковальчук, Ю.Г. Фесіна, І.Л.Заблоцька Луцьк : ЛНТУ, 2023. 46 с.
3. Інноваційні підходи в підготовці магістрів з прикладної механіки : навч. посіб. / Т. Є. Божко, Б. П. Валецький, Л. М. Самчук, Т. І. Четвержук. Луцьк : Вежа-Друк, 2024. – 324 с.
4. Методичні рекомендації до написання кваліфікаційної роботи за ступенем вищої освіти «магістр» : метод. рекомендації для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти освітньої програми «Прикладна механіка», спец. 131 Прикладна механіка, галузі знань 13 Механічна інженерія денної та заоч. форм навч. / уклад.: Т. І. Четвержук, Р. М. Полінкевич. – Луцьк: ЛНТУ, 2024. 48 с.
5. Nataliia Imbirovych, Inna Boyarska, Oleksandr Povstyanoy, Krzysztof Kurdzydowski, Sviatoslav Homon, Leonid Kulakovskiy Modification of oxide coatings synthesized on zirconium alloy by the method of plasma electrolytic oxidation / International scientific session on Applied Mechanics XI (17 August 2023). V.2949 (1). P.56-60.
6. Борозенець Г.М., Павлов В.М., Семак І. В. Деталі машин : Навчальний посібник. – К.: Видавничий дім «Кондор», 2021. 220 с.
7. Головня В.Д. САПР технологічних процесів : конспект лекцій / В.Д. Головня. – Житомир : Житомирська політехніка, 2019. 200 с.
8. Morenko A., Morenko O., Dmytrotsa O., Poruchynsky A., Korzhyk O. Changes in electroencephalogram (EEG) power during subdominant (left) hand finger

movements in females with different alpha rhythm characteristics. *Health Problems of Civilization*. 2020. Vol 14, No 1. P. 63–69. 15. <https://doi.org/10.5114/hpc.2020.93295> [Web of Science/](#)

9. Korzhyk O. V., Dmutrotsa O. R., Poruchynskiy A. I., Morenko A. H. Event-related potentials during contralateral switching over motor programs in humans. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2020. Vol. 11, No 1. P. 110–115. <https://doi.org/10.15421/022016> Scopus (Q4), Web of Science.

10. Obertyukh, R., Slabkyi A., Polishchuk, L., Povstianoi, O., Kumargazhanova, S., & Satymbekov, M. (2022). Dynamic and mathematical models of the hydroimpulsive vibro-cutting device with a pressure pulse generator built into the ring spring. *Informatyka, Automatyka, Pomiarzy W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 12(3), 54–58.

11. Halchuk T. N., Povstyanoy O. Yu., Bembenek M., Redko R. G., Chetverzhuk T. I., Polinkevych R. M. (2023). Impact of technological system's characteristics on the machining accuracy of bearing rings. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 10(1), pp. A22-A30, doi:10.21272/jes.2023.10(1). a4.

12. Zaleta O. M., Povstyanoy O. Yu., Ribeiro L. F., Redko R. G., Bozhko T. Ye., Chetverzhuk T. I. (2023). Automation of optimization synthesis for modular technological equipment. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 10(1), pp. A6-A14, doi: 10.21272/jes.2023.10(1).a2.

13. Povstyanoy O., MacMillan A. (2021). Mechatronic system's permeable materials with controlled porosity. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 8(1), pp. C45–C49, doi: 10.21272/jes.2021.8(1).c DOI: 10.21272/jes.2021.8(1).

14. Редько Р.Г. Дослідження сили різання при розточуванні гвинтових нежорстких деталей машин / Р.Г. Редько, О.Ю.Повстяной, Р.М. Полінкевич, Т.І. Четвержук // *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. Том 1, №20, 2023. С.26-32.

15. Повстяной О.Ю., Полінкевич Р.М., Редько Р.Г., Четвержук Т.І. Технологія п'ятикоординатної обробки на фрезерних верстатах з ЧПУ // ВАЖКЕ МАШИНОБУДУВАННЯ. ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ: Матеріали XXII Міжнародної науково-технічної конференції (м.Краматорськ - Тернопіль, ДДМА, 28-30 травня 2024 р.). С.154