

**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 ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ЗМІНИ ПОРИСТОСТІ
ПЛАЗМООКСИДНИХ ПОКРИТТІВ, СИНТЕЗОВАНИХ НА
АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ В СЕРЕДОВИЩАХ ЛУЖНИХ
ЕЛЕКТРОЛІТІВ / ESTABLISHING THE DEPENDENCES OF
THE CHANGE IN POROSITY OF PLASMA OXIDE COATINGS
SYNTHESIZED ON ALUMINUM ALLOYS IN ALKALINE
ELECTROLYTE ENVIRONMENTS**

спеціальність 132 «Матеріалознавство»

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Індустріальний інжиніринг та менеджмент»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти

групи ПМ(ПМ)-41

Романюк Ірина Романівна

(підпис)

Керівник:

д.т.н., професор

Імбірович Наталія Юріївна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» _____ 20__ р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Гусачук Дмитро Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної 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

Імбирович Н.Ю.
"23" січня 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Романюк Ірина Романівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Встановлення залежностей зміни
пористості плазмосексидних покриттів, синтезованих
на алюмінієвих сплавах в середовищах змінних електричних
керівник роботи д.т.н., проф. Імбирович Н.Ю.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, місце зв'язу)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "31" 12 2025 року № 5406/22

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
"23" травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи склад та властивості сплаву
D16, розміри зразка з алюмінієвого сплаву

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Огляд механічної міцності. Методика
експериментальних досліджень. Експериментальна
частинка. Висновки. Співвідношення досліджень.

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

1. Тема роботи
2. Мета і завдання роботи
3. Методика експериментального дослідження
4. Мікроструктурний аналіз
5. Вплив на мікротвердість покриттів
6. Пористість ПСО-покриттів
7. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
В.хистрола	доцент кафедри матеріалознавства Мисковець С.В.	03.05.26	23.05.26

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Прізвище
1	Вступ Розділ. Огляд літератури	05.05.26	Виконано
2	Методика експериментальних досліджень	12.05.26	Виконано
3	Експериментальна частина. Висновки	19.05.26	Виконано

Здобувач вищої освіти _____

Романчук І.Р.
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____

Забірюк М.В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Романюк І.Р. Встановлення залежностей зміни пористості плазмооксидних покриттів, синтезованих на алюмінієвих сплавах в середовищах лужних електролітів. Рукопис.

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

Кваліфікаційна робота бакалавра складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

У роботі досліджено структуру, товщину плазмоелектролітного оксидування на алюмінієвому сплаві.

Бакалаврська робота складається з пояснювальної записки та додатків. Пояснювальна записка містить 47 сторінок, 9 рисунків, 1 таблицю та включає список з 25 літературних джерел. Графічна частина складається з 10 листів формату А4, представлених у додатку А.

Ключові слова: плазмоелектролітне оксидування, алюмінієвий сплав Д16, плазмооксидні покриття, пористість, мікротвердість, товщина покриття, мікроструктура, лужний електроліт.

					БР 2126.00.000 ПЗ			
За	Аук	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Романюк				Встановлення залежностей зміни пористості плазмооксидних покриттів, синтезованих на алюмінієвих сплавах в середовищах лужних електролітів	Лит.	Аук	Листів
Перевіряв	Гамбуров						3	47
Н. Контр.	Мисковець				ЛНТУ, каф. матеріалознавства гр. ПМ(ПМ)-41			
Затв.	Романюк							

					БР 2126.00.000 ПЗ				Арк.
									3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

ANNOTATION

I. R. Romanyuk. Establishing the dependences of the change in porosity of plasma oxide coatings synthesized on aluminum alloys in alkaline electrolyte environments. Manuscript.

Bachelor's qualification work OP "Industrial Engineering and Management" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

Bachelor's qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of sources used, and additions.

The structure and thickness of plasma electrolyte oxidation on an aluminum alloy were investigated in the work.

The bachelor's work consists of an explanatory note and additions. The explanatory note contains 47 pages, 9 figures, 1 tables and includes a list of 25 literary sources. The graphic part consists of 10 sheets of A4 format, presented in Addition A.

Key words: plasma electrolyte oxidation, aluminum alloy D16, plasma oxide coatings, porosity, microhardness, coating thickness, microstructure, alkaline electrolyte.

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП	6
Розділ 1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	8
1.1. Матеріалознавча характеристика алюмінієвих сплавів	8
1.2. Використання алюмінієвих сплавів в промисловості	11
1.3. Перспективи використання сплаву Д16 (2024)	13
1.4. Види оксидів алюмінію та їх властивості	15
1.5. Методи поверхневого зміцнення легких металів та їх сплавів	17
1.6. Висновки та завдання роботи.	21
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	23
2.1. Плазмоелектролітне оксидування. Методологія та технологічні параметри	23
2.2. Методика проведення мікроструктурного аналізу	26
2.3. Методика визначення мікротвердості	30
2.4. Методика гідростатичного зважування	32
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	33
3.1. Дослідження мікроструктур синтезованих покриттів	33
3.2. Встановлення товщини та мікротвердості ПЕО-покриттів, синтезованих на алюмінієвому сплаві	35
3.3. Визначення пористості ПЕО-покриттів	38
ВИСНОВКИ	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	44
ДОДАТКИ	

ВСТУП

У сучасному світі матеріали відіграють ключову роль у розвитку техніки та технологій. Від їх властивостей залежить те, наскільки надійними, довговічними та ефективними будуть машини, транспорт, будівлі та інші інженерні конструкції. Саме тому науковці постійно шукають способи зробити матеріали міцнішими, легшими та стійкішими до впливу навколишнього середовища, при цьому не ускладнюючи процеси їх виготовлення [1].

Одними з найпоширеніших матеріалів у сучасній промисловості є алюмінієві сплави. Їх активно використовують у різних галузях – від авіації до будівництва – завдяки їх малій масі, достатній міцності та здатності протистояти корозії. Простими словами, вони дозволяють створювати легкі, але водночас досить надійні конструкції. Саме інтерес до вдосконалення властивостей алюмінію постійно зростає [1, 3].

Однак алюмінієві сплави мають і певні недоліки. Вони не завжди достатньо тверді, швидше зношуються та можуть втрачати свої властивості в складних умовах експлуатації. Це обмежує їх використання там, де матеріал піддається великим навантаженням або агресивному середовищу. Одним із ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є не зміна самого матеріалу, а покращення його поверхні – тієї частини, яка безпосередньо контактує з навколишнім середовищем [2].

Сучасні технології дозволяють створювати на поверхні алюмінію спеціальні захисні покриття. Одним із найперспективніших методів є плазмоелектролітичне оксидування. У результаті цього процесу на поверхні формується міцний оксидний шар, який значно підвищує твердість, зносостійкість і корозійну стійкість матеріалу. Такий шар має складну будову і містить пори – мікроскопічні отвори, які суттєво впливають на властивості

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

покриття [15, 24].

Пористість покриття може відігравати як позитивну, так і негативну роль. У деяких випадках вона допомагає утримувати мастильні речовини або покращує взаємодію поверхні з іншими матеріалами. Водночас надмірна кількість пор може послаблювати захисні властивості покриття. Саме тому важливо розуміти, як формується ця пористість і від чого вона залежить [24].

Особливу увагу в цьому процесі приділяють умовам обробки, зокрема складу електроліту та режимам проведення оксидування. Серед різних варіантів значний інтерес становлять лужні електроліти, які широко застосовуються на практиці та дозволяють впливати на структуру і властивості отриманих покриттів [19].

Отже, дослідження процесів формування пористої структури покриттів на алюмінієвих сплавах є важливим як з наукової, так і з практичної точки зору. Розуміння цих процесів дає можливість цілеспрямовано покращувати властивості матеріалів і розширювати сфери їх застосування [15, 21].

Метою даної роботи є встановлення закономірностей зміни пористості плазмооксидних покриттів, сформованих на алюмінієвому сплаві Д16 у середовищах лужних електролітів, а також дослідження впливу умов обробки на структуру та властивості отриманих покриттів.

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Матеріалознавча характеристика алюмінієвих сплавів

Алюміній є одним із найважливіших металів сучасної техніки, а його сплави широко використовуються як конструкційні матеріали завдяки поєднанню цінних фізичних, механічних і хімічних властивостей. Як базовий елемент, алюміній визначає основні характеристики сплавів і суттєво впливає на їх поведінку в різних умовах експлуатації [1, 3].

Алюміній має гранецентровану кубічну кристалічну ґратку, що забезпечує велику кількість площин ковзання. Саме це обумовлює його високу пластичність і здатність до значної пластичної деформації без руйнування. Матеріал легко піддається обробці тиском навіть при кімнатній температурі, що є важливою технологічною перевагою [2].

Однією з ключових фізичних характеристик алюмінію є його мала густина – близько $2,7 \text{ г/см}^3$. Це значення значно менше, ніж у більшості металів, зокрема сталі (приблизно $7,8 \text{ г/см}^3$). Низька густина забезпечує зменшення маси конструкцій і сприяє підвищенню ефективності технічних систем, особливо в транспорті та авіації [1, 3].

Температура плавлення алюмінію становить близько $660 \text{ }^\circ\text{C}$, що є відносно низьким значенням серед металів. Це полегшує процеси лиття та переробки, зменшує енергетичні витрати і дозволяє отримувати вироби складної форми. Водночас низька температура плавлення обмежує застосування алюмінію при високих температурах [2].

Чистий алюміній характеризується невисокою міцністю (приблизно $50 \dots 100 \text{ МПа}$), однак має дуже високу пластичність і в'язкість. Завдяки легуванню та термічній обробці міцність алюмінієвих сплавів може зростати

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

у кілька разів і досягати 600 МПа і більше. При цьому зберігається відносно мала маса матеріалу [1, 3].

Алюміній відзначається високою корозійною стійкістю. Це пояснюється його здатністю до пасивації – утворення на поверхні щільної оксидної плівки Al_2O_3 . Товщина цієї плівки становить лише кілька нанометрів, проте вона надійно захищає метал від подальшого окиснення. У разі пошкодження плівка швидко відновлюється, що забезпечує довговічність матеріалу [4, 5].

Важливою характеристикою алюмінію є його висока теплопровідність, яка становить приблизно 200 ... 230 Вт/(м·К). Це дозволяє ефективно відводити тепло, що є критично важливим у теплообмінних пристроях, радіаторах, електронних компонентах і системах охолодження [1].

Електропровідність алюмінію також є високою і становить близько 60–65% від електропровідності міді. Завдяки поєднанню достатньої провідності та малої густини алюміній широко застосовується в електротехніці, зокрема для виготовлення проводів, кабелів і повітряних ліній електропередач [1].

Алюміній має також високий коефіцієнт відбивання світла і теплового випромінювання. Це робить його придатним для використання у світлотехніці, виробництві відбивних поверхонь і теплоізоляційних матеріалів [2].

Серед інших фізичних властивостей слід відзначити немагнітність алюмінію. Він не взаємодіє з магнітним полем, що є важливим для використання в електротехнічних і спеціальних приладах. Крім того, алюміній є нетоксичним і екологічно безпечним матеріалом, придатним для використання у харчовій промисловості та медицині [2].

Алюміній добре піддається механічній обробці. Він легко ріжеться, свердлиться, фрезерується і полірується. Це дозволяє отримувати вироби з

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

високою точністю та якісною поверхнею. Водночас при обробці необхідно враховувати його схильність до налипання на інструмент [1].

Суттєвим є також високий коефіцієнт теплового розширення алюмінію. Це означає, що при нагріванні матеріал значно змінює свої розміри, що необхідно враховувати при проектуванні конструкцій, які працюють у змінних температурних умовах [2].

Механічні властивості алюмінієвих сплавів значною мірою визначаються легуванням. Додавання міді підвищує міцність, магнію – покращує корозійну стійкість і зварюваність, кремнію – підвищує литтєві властивості, а цинку – сприяє значному зміцненню. Це дозволяє отримувати сплави з різними експлуатаційними характеристиками [3].

Важливу роль відіграє термічна обробка. Гартування та старіння сприяють утворенню дрібнодисперсних фаз, які зміцнюють матеріал. У результаті підвищуються межа текучості, твердість і зносостійкість алюмінієвих сплавів [3, 5].

Разом із тим алюміній має і певні недоліки. До них належать невисока твердість, схильність до зношування та зниження міцності при підвищених температурах. Для покращення властивостей застосовують поверхневе зміцнення, зокрема анодування, яке дозволяє створити міцний оксидний шар із підвищеною твердістю та корозійною стійкістю [4–7].

Таким чином, алюміній поєднує низьку густину, високу пластичність, добру тепло– та електропровідність, корозійну стійкість, технологічність і можливість зміцнення. Саме ці властивості визначають широке застосування алюмінієвих сплавів у різних галузях промисловості та роблять їх перспективними матеріалами для сучасних інженерних рішень [1, 3].

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Використання алюмінієвих сплавів в промисловості

Алюмінієві сплави належать до числа найважливіших матеріалів сучасного промислового виробництва, оскільки поєднують малу густину, корозійну стійкість, достатню механічну міцність, високу електро- і теплопровідність та добру технологічність. Саме завдяки цьому вони набули широкого поширення в транспортному машинобудуванні, електротехніці, будівництві, пакувальній індустрії, фармацевтичному виробництві та низці спеціалізованих технічних сфер [1, 3].

На відміну від технічно чистого алюмінію, який є відносно м'яким матеріалом, його сплави краще відповідають вимогам реального виробництва, де конструкції мають одночасно залишатися легкими, міцними, довговічними та стійкими до навантажень. Уведення до складу алюмінію інших елементів дає змогу цілеспрямовано змінювати властивості матеріалу, підвищуючи твердість, зносостійкість і міцність, що особливо важливо для деталей, які працюють в умовах вібрацій, перепадів температур або тривалого механічного впливу [2, 3].

Найбільш помітною є роль алюмінієвих сплавів у транспортній галузі, де зменшення маси конструкції без втрати експлуатаційної надійності має принципове значення. В авіабудуванні їх використовують для виготовлення елементів корпусу, силових вузлів і окремих деталей механізмів; у суднобудуванні - для корпусів, палубних надбудов і технічного обладнання; у залізничному та автомобільному машинобудуванні - для вагонних деталей, цистерн, кузовних елементів, каркасів і теплообмінних вузлів. У кожному з цих випадків цінність матеріалу визначається насамперед його високим співвідношенням міцності до маси, що дає змогу підвищувати енергоефективність, швидкість і маневрові характеристики транспортних засобів [16].

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливе місце алюмінієві сплави посідають і в електротехнічній та електронній промисловості. Їх застосовують у виробництві проводів, кабелів, шин, конденсаторів, корпусів приладів та окремих елементів електронної апаратури, оскільки алюміній характеризується високою електропровідністю та відносно невеликою масою. Разом із тим у цій сфері необхідно враховувати утворення на поверхні металу оксидної плівки, яка здатна погіршувати якість контактних з'єднань, тому під час використання матеріалу велике значення мають способи обробки поверхні та технологія монтажу [18].

У будівництві алюмінієві сплави цінуються за довговічність, стійкість до атмосферних впливів і простоту експлуатації. Вони використовуються для виготовлення каркасних систем, віконних і дверних рам, сходів, облицювальних панелей та інших конструктивних і декоративних елементів, де важливими є легкість, надійність і збереження властивостей упродовж тривалого часу. Подібні характеристики забезпечують матеріалу також вагоме місце у виробництві пакування та побутових виробів, зокрема фольги, туб, ємностей і кухонного посуду [17].

Крім традиційних напрямів використання, алюмінієві сплави та сполуки алюмінію мають значення для фармацевтичної, хімічної та спеціальної технічної галузей. Їх застосовують у складі окремих лікарських і гігієнічних засобів, у виробництві кріогенного обладнання, дзеркал, а також у деяких технологічних процесах, пов'язаних зі скловарінням та високотехнологічним машинобудуванням. Отже, універсальність алюмінієвих сплавів зумовлена не лише комплексом базових фізико-хімічних властивостей, а й можливістю регулювати їх характеристики відповідно до конкретних виробничих потреб, що й забезпечує стабільне розширення сфер їх промислового застосування [1, 17].

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3. Перспективи використання сплаву Д16 (2024)

Сплав Д16 належить до найбільш відомих і широко застосовуваних високоміцних деформівних алюмінієвих сплавів системи Al–Cu–Mg. Його популярність зумовлена вдалим поєднанням малої густини, високих механічних характеристик та добрих технологічних властивостей. У практиці промислового виробництва цей матеріал часто використовується у вигляді листів, прутків, профілів, плит та інших напівфабрикатів. У технічній літературі сплав Д16 також часто позначають як дюралюміній або дюраль [10].

Хімічний склад сплаву Д16 визначає його експлуатаційні властивості та значною мірою впливає на структурний стан після термічної обробки. Основу матеріалу становить алюміній, а як головні легувальні елементи виступають мідь, магній і марганець. Саме ці компоненти забезпечують формування дисперсних зміцнювальних фаз, що сприяють підвищенню міцності, твердості та стабільності механічних властивостей. Водночас вміст домішок, зокрема заліза, повинен суворо контролюватися, оскільки воно практично не розчиняється в алюмінієвій матриці та може утворювати крихкі інтерметалідні включення, які погіршують пластичність і знижують загальні механічні показники матеріалу [10].

Після гартування та старіння сплав Д16 набуває високого рівня міцності, що робить його придатним для виготовлення елементів, які працюють за умов значних навантажень при відносно малій масі. Саме ця особливість зумовила широке використання сплаву в конструкціях, де пріоритетним є високе співвідношення міцності до маси. До таких напрямів належать авіаційна техніка, транспортне машинобудування, елементи силових каркасів, вузли агрегатів та інші відповідальні деталі [8, 10].

Окремою перевагою сплаву Д16 є його задовільна технологічність. Матеріал добре піддається механічній обробці, холодному деформуванню,

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

свердлінню, фрезеруванню, різанню та куванню. Це забезпечує можливість виготовлення деталей різної конфігурації та складності. Завдяки цьому сплав широко застосовується у виробництві конструкційних елементів, які потребують високої точності виготовлення та достатньої міцності [10].

Разом із тим сплав Д16 має і певні обмеження, які необхідно враховувати під час його використання. Одним із основних недоліків є ускладнене зварювання, оскільки зварні з'єднання можуть втрачати необхідну міцність через особливості хімічного складу та структурні зміни в зоні термічного впливу. Тому в практиці перевага часто надається заклепковим, болтовим або іншим механічним способам з'єднання. Такий підхід є особливо характерним для авіа- та транспортного машинобудування [8].

Ще одним недоліком сплаву Д16 є його недостатня корозійна стійкість порівняно з деякими іншими алюмінієвими сплавами. Наявність міді в складі, хоча й забезпечує високу міцність, одночасно знижує стійкість до корозійного впливу середовища. Саме тому для підвищення довговічності виробів із цього сплаву застосовують плакування, анодування, оксидування та інші методи захисної обробки поверхні. У результаті формуються захисні оксидні шари, які зменшують інтенсивність взаємодії матеріалу з агресивним середовищем [9, 10].

Суттєві перспективи для подальшого розширення галузей застосування сплаву Д16 пов'язані з удосконаленням саме поверхневих властивостей. Використання плазмоелектролітичного оксидування, анодування в кислому середовищі та інших сучасних методів модифікації дає змогу істотно підвищити твердість, зносостійкість і корозійну стійкість поверхні. Завдяки цьому сплав може ефективніше використовуватися в умовах підвищеного механічного та хімічного навантаження [9].

Сплав Д16Т випускається у вигляді різноманітного металопрокату - прутків, листів, плит, труб, кутиків та інших напівфабрикатів. Така

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

різноманітність форм зумовлює широке коло його практичного використання. З нього виготовляють кріпильні елементи, силові деталі, балки, елементи каркасів, щогли, окремі вузли двигунів і конструкційні частини машин та механізмів [10].

У вигляді прутків сплав Д16 застосовується в автомобілебудуванні, авіабудуванні, суднобудуванні, а також у виробництві бурильного та іншого спеціалізованого обладнання. Трубний прокат із цього сплаву використовують у нафтовій і газовій промисловості, де важливими є поєднання малої маси, достатньої міцності та стійкості до експлуатаційних навантажень. Листовий матеріал ідеально підходить для виготовлення обшивки, каркасних елементів, корпусних деталей та інших конструкцій машинобудівного призначення [10].

Окрім промислового застосування, сплав Д16 використовується і в будівельній та допоміжній сферах. Із нього виготовляють елементи внутрішніх перегородок, дверних і віконних систем, декоративні та монтажні конструкції, а також інформаційні таблички, знаки й інші допоміжні вироби. Це свідчить про універсальність матеріалу та його придатність для різних умов експлуатації [10].

Таким чином, сплав Д16 є одним із найбільш перспективних високоміцних алюмінієвих сплавів, що поєднує високу міцність, відносно малу густину, технологічність і можливість подальшого вдосконалення властивостей шляхом поверхневої обробки. Саме ці особливості забезпечують стабільний інтерес до нього в сучасному машинобудуванні, транспортній галузі та матеріалознавчих дослідженнях [8, 9, 10].

1.4. Види оксидів алюмінію та їх властивості

Оксиди алюмінію є важливими функціональними матеріалами, що формуються як природним шляхом при взаємодії алюмінію з киснем, так і

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

штучно – в процесі електрохімічної або термічної обробки. Утворена на поверхні металу оксидна плівка виконує захисну функцію, запобігаючи подальшій корозії. Основною сполукою є оксид алюмінію Al_2O_3 , який характеризується високою твердістю, термостійкістю, хімічною інертністю та добрими діелектричними властивостями [11].

Залежно від умов формування та структури розрізняють кілька основних видів оксидів алюмінію: бар'єрні, пористі та оксиди, отримані методом плазмоелектролітного оксидування (ПЕО) [11].

Бар'єрні оксидні плівки формуються в електролітах, які не розчиняють оксид (наприклад, у розчинах борної кислоти). Вони мають компакту, переважно аморфну структуру, відзначаються високою електричною опірністю та виконують функцію тонкого електроізоляційного шару. Товщина таких плівок зазвичай не перевищує кількох сотень нанометрів через виникнення діелектричного пробоя при високих напругах [5].

Пористі оксидні плівки утворюються в електролітах, що частково розчиняють оксид (оксалатні, сульфатні, фосфатні розчини). Їх структура складається з тонкого щільного внутрішнього шару та зовнішнього пористого шару. Такі покриття мають значно більшу товщину і розвинену поверхню, що зумовлює їхні специфічні властивості, зокрема здатність до адсорбції та прояви фотолюмінесценції. Пористість істотно впливає на експлуатаційні характеристики: з одного боку, вона може знижувати захисні властивості, а з іншого – забезпечує можливість функціоналізації поверхні [12, 7].

Оксидні покриття, сформовані методом плазмоелектролітного оксидування, відрізняються найбільш складною структурою та високими експлуатаційними характеристиками. Вони утворюються в умовах мікродугових розрядів і мають значну товщину та підвищену міцність. На відміну від анодних плівок, такі покриття містять не лише аморфну фазу, а й кристалічні модифікації оксиду алюмінію, зокрема $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$ та $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$. Це

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечує високу твердість, зносостійкість і корозійну стійкість, хоча надмірна пористість і шорсткість можуть частково знижувати механічні характеристики [13, 15].

Важливим аспектом є існування різних кристалічних модифікацій оксиду алюмінію. Найбільш стабільною є α – Al_2O_3 . (корунд), що характеризується високою щільністю та твердістю. Перехідні форми, такі як γ – Al_2O_3 , δ – Al_2O_3 , θ – Al_2O_3 , мають більш розвинену пористу структуру і велику питому поверхню, що робить їх ефективними каталізаторами та адсорбентами [11].

Властивості оксидів алюмінію значною мірою визначаються їх мікроструктурою, пористістю та наявністю дефектів, зокрема кисневих вакансій. Саме ці дефекти впливають на оптичні характеристики, включаючи люмінесценцію у видимому діапазоні. Крім того, оксидні покриття відзначаються високою корозійною стійкістю, електроізоляційними властивостями та здатністю працювати в умовах підвищених температур [5, 6].

Таким чином, різноманітність структурних форм оксиду алюмінію та можливість керування їх властивостями шляхом зміни умов формування роблять ці матеріали перспективними для широкого застосування в машинобудуванні, електроніці, хімічній промисловості та технологіях поверхневого зміцнення [11, 13].

1.5. Методи поверхневого зміцнення легких металів та їх сплавів

Легкі метали, такі як алюміній і магній, широко використовують у техніці через їхню малу масу, але їхня поверхня часто не має достатньої стійкості до зношування, корозії та механічних пошкоджень. Саме тому для них застосовують методи поверхневого зміцнення, які дозволяють зробити зовнішній шар деталі твердішим, щільнішим і стійкішим, не змінюючи властивостей усього виробу. Найчастіше для цього формують на поверхні

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

оксидні або керамічні покриття, які виконують роль захисного бар'єра між металом і зовнішнім середовищем [21, 24].

Одним із найпростіших способів є анодне оксидування. Під час цього процесу на поверхні алюмінію утворюється тонка оксидна плівка, яка певною мірою захищає метал від дії вологи й повітря. На початковому етапі така плівка росте відносно рівномірно, але з часом у ній з'являються пори, мікротріщини та слабкі ділянки. Через це звичайне анодування часто розглядають лише як початковий етап створення більш складного і міцного покриття [5, 11].

Більш ефективним методом є плазмоелектролітне оксидування, або ПЕО. Якщо пояснити просто, то під час ПЕО на поверхні металу під дією високої напруги виникають дуже короткі мікроспалахи, які змінюють верхній шар металу і перетворюють його на міцне оксидно-керамічне покриття. На відміну від звичайного анодування, тут процес відбувається не лише за рахунок електрохімічного росту плівки, а й завдяки локальним розрядам, локальному плавленню, окисненню та швидкому затвердінню матеріалу. Саме тому ПЕО дає значно твердіший і функціональніший поверхневий шар [6, 15].

ПЕО – процес має виражений поетапний характер. На початку утворюється тонка бар'єрна оксидна плівка, після чого при досягненні пробивної напруги з'являються мікророзряди. Спочатку таких розрядів багато, і вони досить дрібні, але з часом їх кількість зменшується, а розміри зростають. Це пов'язано з тим, що покриття потовщується, і струм проходить уже через меншу кількість активних ділянок. У результаті формується шар із виразно неоднорідною структурою, який містить як щільні, так і пористі зони [15, 24].

Саме така будова є дуже важливою. Зазвичай ПЕО–покриття мають внутрішній щільний шар і зовнішній більш пористий шар. Внутрішній шар виконує основну захисну функцію, оскільки не дає агресивному середовищу

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

легко проникати до основного металу. Зовнішній шар є більш шорстким і пористим, але він теж не є недоліком: він впливає на зчеплення покриття з основою, на характер тертя та на подальшу поведінку поверхні під навантаженням. Саме поєднання цих двох шарів дозволяє отримати матеріал, який не лише захищений від корозії, а й краще працює в умовах зношування [24].

Важливою особливістю ПЕО є те, що склад електроліту безпосередньо впливає на склад і властивості покриття. Якщо в розчині містяться, наприклад, сполуки кремнію або вольфраму, ці елементи можуть входити до складу оксидного шару. У такому разі покриття стає не просто алюмооксидним, а більш складним за хімічною будовою. У досліджених роботах показано, що в покриттях, отриманих у вольфрамвмісних електролітах, можуть утворюватися фази на основі Al_2O_3 , WO_3 та навіть силікат-вольфрамові бронзи. Це означає, що ПЕО дає змогу не просто обробити поверхню, а цілеспрямовано створити новий функціональний шар із потрібними властивостями [19, 20].

Ще одна важлива перевага ПЕО – можливість значно підвищити мікротвердість поверхні. У процесі оксидування спочатку формується досить твердий шар, але зі збільшенням часу обробки властивості покриття можуть змінюватися. Якщо процес триває занадто довго, поверхня стає більш пористою і шорсткою, а це вже може знижувати мікротвердість. Тому для ПЕО дуже важливо правильно вибрати режим обробки: надто короткий час дає тонке покриття, а надто тривалий – може зробити його менш однорідним. Отже, ефект зміцнення залежить не лише від самого методу, а й від точного підбору технологічних параметрів [24].

Для алюмінію ПЕО особливо корисне, бо дозволяє отримати щільний захисний шар, стійкий до корозії та зношування. Дослідження показують, що такі покриття можуть суттєво знижувати корозійний струм і краще захищати основу в сольових середовищах. Це означає, що метал повільніше руйнується

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

і довше зберігає свої властивості. Крім того, ПЕО – покриття добре працюють при терті, оскільки їхня тверда структура зменшує швидкість зношування поверхні [21, 24].

Для магнієвих сплавів і композитів значення ПЕО ще більше, оскільки магній є хімічно активним і сам по собі має низьку корозійну стійкість. У таких матеріалах ПЕО дозволяє сформувати керамічне покриття, яке істотно підвищує захист від корозії. При цьому навіть наявність армуючих частинок у композиті не обов'язково заважає формуванню суцільного покриття, якщо процес підібраний правильно. Це дуже важливо, оскільки звичайні анодні плівки в подібних матеріалах часто виходять недостатньо суцільними [23].

Окремо слід відзначити комбіновані методи, коли ПЕО використовують разом із попереднім нанесенням алюмінієвого шару. У такому разі спочатку створюють металеве покриття, а потім перетворюють його поверхню на керамічний шар шляхом плазмоелектролітичного оксидування. Такий підхід дає змогу отримати дуже тверді й зносостійкі поверхні, придатні для роботи в складних умовах. Саме тому ПЕО розглядають не лише як окрему технологію, а як універсальний спосіб функціонального зміцнення поверхні [24].

Отже, плазмоелектролітичне оксидування є одним із найефективніших методів поверхневого зміцнення легких металів та їх сплавів. Його головна перевага полягає в тому, що на поверхні формується не просто тонка захисна плівка, а складний оксидно-керамічний шар із високою твердістю, доброю адгезією, підвищеною корозійною стійкістю та кращою опірністю зношуванню. Саме тому ПЕО широко розглядають як перспективний метод для алюмінію, магнію та їх сплавів, особливо тоді, коли деталі повинні працювати в складних і агресивних умовах [15, 21, 24].

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

1.6. Висновки та завдання роботи.

У результаті аналізу літературних джерел встановлено, що алюмінієві сплави є одними з найбільш поширених конструкційних матеріалів у сучасній промисловості. Це пов'язано з їх малою густиною, достатньою міцністю, корозійною стійкістю та хорошими технологічними властивостями. Серед таких матеріалів значний інтерес становить сплав Д16, який широко використовується у машинобудуванні та транспортній галузі. Проте, незважаючи на хороші механічні характеристики, він має недостатню зносостійкість, тому потребує додаткового зміцнення поверхні [1, 10].

Проведений аналіз показав, що одним із найбільш ефективних способів покращення властивостей алюмінієвих сплавів є плазмоелектролітне оксидування. У результаті цього процесу на поверхні металу формується оксидне покриття з підвищеною твердістю, корозійною стійкістю та кращими експлуатаційними характеристиками. Разом із тим важливою особливістю таких покриттів є їх пористість, оскільки саме вона значною мірою впливає на структуру та властивості сформованого шару [15, 24].

Аналіз наукових праць показав, що пористість плазмооксидних покриттів залежить від умов проведення процесу: складу електроліту, режимів оксидування та тривалості обробки. Незважаючи на значну кількість досліджень, питання впливу лужних електролітів на зміну пористості покриттів досі залишається актуальним і потребує подальшого експериментального вивчення [19].

Метою даної роботи є дослідження процесу формування плазмооксидних покриттів на алюмінієвому сплаві Д16 у середовищах лужних електролітів та встановлення залежностей зміни їх пористості від умов оксидування для отримання покриттів із покращеними властивостями.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

- провести плазмоелектролітне оксидування алюмінієвого сплаву Д16 у розроблених середовищах лужних електролітів;
- дослідити вплив технологічних параметрів процесу на формування покриттів;
- провести мікроструктурний аналіз отриманих покриттів;
- визначити мікротвердість сформованих оксидних шарів;
- дослідити пористість покриттів методом гідростатичного зважування;
- встановити залежності зміни пористості плазмооксидних покриттів від умов їх формування.

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Плазмоелектролітне оксидування. Методологія та технологічні параметри

Плазмоелектролітне оксидування (ПЕО) є сучасним методом поверхневої модифікації вентильних металів та їх сплавів, який дозволяє формувати на поверхні виробів тверді оксидні покриття з підвищеною корозійною стійкістю, мікротвердістю та зносостійкістю. Метод базується на поєднанні електрохімічних і плазмохімічних процесів, що відбуваються у лужному електроліті під дією високої напруги. У процесі ПЕО на поверхні металу виникають локальні мікродугові розряди, внаслідок чого формується оксидний шар із характерною пористою структурою [15].

ПЕО широко застосовується для алюмінієвих сплавів, оскільки дозволяє суттєво покращити їх експлуатаційні властивості. Сформовані покриття характеризуються високою твердістю, підвищеною зносостійкістю та покращеною корозійною стійкістю. Крім того, ПЕО-покриття здатні працювати в умовах підвищених механічних навантажень та агресивних середовищ [21].

У роботі дослідження проводили на зразках алюмінієвого сплаву Д16. Для проведення експерименту використовували два зразки, які обробляли окремо. Площа поверхні зразка №1 становила 0,0703 дм², а площа поверхні зразка №2 – 0,1262 дм². Визначення площі поверхні проводили для контролю режимів процесу ПЕО та оцінки параметрів електрохімічної обробки.

ПЕО здійснювали на лабораторній установці, до складу якої входили джерело живлення, електролітна ванна, амперметр та вольтметр для контролю параметрів процесу. Як реакційну ємність використовували електролітну ванну з нержавіючої сталі об'ємом 40 л.

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Як електроліт використовували лужний силікатний розчин на основі дистильованої води, гідроксиду калію та рідкого скла. Використання такого електроліту забезпечує стабільне протікання процесу ПЕО та сприяє формуванню оксидного покриття на поверхні алюмінієвого сплаву. Рідке скло у складі електроліту сприяло формуванню силікатних складових у структурі оксидного покриття та впливало на процес росту поверхневого шару [19, 20].

Для приготування електроліту використовували 40 л дистильованої води, 120 г гранульованого гідроксиду калію (КОН) та 80 г рідкого скла. Електроліт готували шляхом послідовного розчинення гідроксиду калію у дистильованій воді з подальшим додаванням рідкого скла. Після приготування розчин витримували протягом трьох діб для стабілізації складу та повного розчинення компонентів.

Перед проведенням оксидування зразки промивали дистильованою водою для очищення поверхні від можливих забруднень. Після цього зразок закріплювали у спеціальному тримачі та за допомогою металевого дроту занурювали в електролітну ванну. Загальний вигляд пристрою для закріплення зразка наведено на рисунку 2.1. Такий спосіб кріплення забезпечував надійний електричний контакт і стабільне положення зразка під час проведення процесу. Під час проведення ПЕО зразок виконував роль анода, тоді як електролітна ванна з нержавіючої сталі використовувалась як катод.

Контроль параметрів процесу здійснювали за допомогою амперметра та вольтметра, підключених до установки. Під час проведення експерименту сила струму залишалась практично стабільною. Для зразка №1 сила струму становила приблизно 0,35 А, а для зразка №2 – близько 0,65 А. Різниця сили струму була пов'язана з різною площею поверхні дослідних зразків.

Обробку зразка №1 проводили протягом 30 хв, а зразка №2 – протягом 20 хв.

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24



Рисунок 2.1 – Пристрій
для закріплення зразка
перед проведенням ПЕО

На початковому етапі процесу на поверхні алюмінієвого сплаву відбувалося формування тонкої оксидної плівки внаслідок електрохімічного окиснення металу. Із подальшим збільшенням напруги товщина оксидного шару зростала, а його електричний опір поступово підвищувався. Після досягнення критичних значень напруги в оксидному шарі виникали локальні електричні пробої, які супроводжувалися появою мікродугових плазмових розрядів на поверхні зразка [6].

У місцях виникнення розрядів спостерігалось локальне короткочасне підвищення температури до температур, достатніх для локального плавлення оксидного шару, плавлення окремих ділянок поверхневого шару та

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

інтенсивне окиснення металу. У результаті цього відбувалося формування плазмооксидного покриття. Під час охолодження розплавлених ділянок на поверхні утворювалася характерна пориста структура покриття. Формування пор пов'язане з виділенням газів, локальними пробоями та нерівномірним затвердінням оксидного шару після дії плазмових розрядів [22].

У процесі проведення ПЕО на поверхні зразків спостерігалось характерне світіння та іскріння, що свідчило про стабільне протікання плазмових процесів і формування оксидного покриття [6].

Після завершення процесу оксидування зразки виймали з електролітної ванни та висушували природним шляхом на повітрі. Зовнішній вигляд зразків після проведення ПЕО наведено на рисунку 2.2.

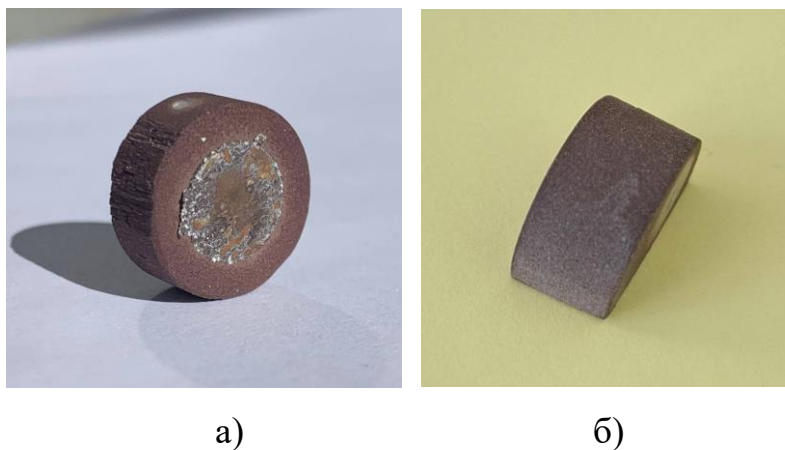


Рисунок 2.2 – Зразки після проведення ПЕО

а) – зразок №1;

б) – зразок №2

2.2. Методика проведення мікроструктурного аналізу

Мікроструктурний аналіз є одним із найважливіших методів дослідження структури металів, сплавів та захисних покриттів. Даний метод дозволяє вивчати внутрішню будову матеріалу, оцінювати морфологію поверхневих шарів, виявляти дефекти структури та досліджувати

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

особливості формування покриттів після різних видів обробки. У матеріалознавстві мікроструктурний аналіз широко застосовується для оцінки якості поверхневих шарів, визначення структурних змін у матеріалі та встановлення взаємозв'язку між структурою і властивостями досліджуваного матеріалу [1].

Для дослідження структури металів та покриттів використовують різні методики мікроструктурного аналізу. Найбільш поширеними є світлова мікроскопія, електронна мікроскопія та рентгеноструктурний аналіз. Світлова мікроскопія дозволяє досліджувати загальну будову поверхневого шару, характер пористості та межі між структурними складовими матеріалу. Електронна мікроскопія забезпечує можливість детального дослідження мікро- та наноструктури покриттів, а рентгеноструктурний аналіз застосовують для визначення фазового складу та кристалічної будови матеріалів [1].

У даній роботі мікроструктурний аналіз проводили методом світлової металографії на підготовлених металографічних шліфах. Використання даного методу дозволило дослідити структуру плазмооксидних покриттів, характер пористості, рівномірність сформованого шару та межу між покриттям і основним металом.

Для плазмооксидних покриттів мікроструктурний аналіз має особливе значення, оскільки структура поверхневого шару безпосередньо впливає на механічні та експлуатаційні властивості покриття. Під час дослідження особливу увагу приділяють рівномірності сформованого шару, характеру пористості, наявності мікротріщин і дефектів, а також якості зчеплення покриття з основою. Крім того, дослідження поперечного перерізу дозволяє оцінити особливості формування перехідної зони між оксидним шаром та алюмінієвим сплавом. Саме дослідження поперечного перерізу дозволяє оцінити не лише поверхню покриття, а і його внутрішню будову, товщину, характер пористості та якість зчеплення покриття з основою [15].

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

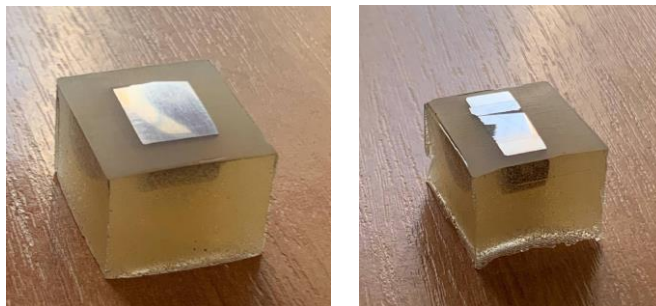
Для проведення мікроструктурного аналізу необхідно отримати якісні металографічні шліфи. З цією метою після завершення ПЕО дослідні зразки розрізали навпіл за допомогою механічної пилки. Розрізання виконували для отримання поперечного перерізу покриття та подальшого дослідження його структури.

Після розрізання проводили підготовку зразків до виготовлення металографічних шліфів. Для цього виготовляли прямокутні паперові формочки, у які встановлювали дослідні зразки. Після фіксації зразків у формочках їх заливали епоксидною смолою та залишали до повного затвердіння. Заливання зразків у смолу забезпечувало зручність утримання під час подальшої механічної обробки та дозволяло уникнути пошкодження крихкого плазмооксидного покриття.

Після затвердіння смоли проводили поетапне ручне шліфування поверхні шліфів із використанням шліфувального паперу різної зернистості. Шліфування здійснювали поступово – від грубозернистого абразиву до дрібнозернистого. Для обробки використовували шліфувальний папір зернистістю 220, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 та 2000. Послідовна зміна зернистості дозволяла поступово зменшувати нерівності поверхні та усувати сліди попередньої механічної обробки.

Після завершення шліфування переходили до полірування поверхні. Полірування проводили з використанням алмазних паст різної дисперсності, які наносили на флісову тканину до отримання рівної дзеркальної поверхні шліфа. Даний етап був необхідний для усунення дрібних подряпин та забезпечення якісного мікроструктурного аналізу. Недостатнє полірування може ускладнювати проведення мікроструктурного аналізу через появу поверхневих дефектів і спотворення структури під час спостереження. Підготовлені та відполіровані шліфи наведені на рисунку 2.3.

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28



а)

б)

Рисунок 2.3 – Відполіровані
металографічні шліфи:

а) – зразок №1;

б) – зразок №2

Для більш чіткого виявлення структури матеріалу та меж між покриттям і основою частину поверхні піддавали хімічному травленню царською горілкою у співвідношенні $\text{HCl}:\text{HNO}_3 = 4:1$. У результаті травлення структурні складові матеріалу проявлялися більш чітко, що дозволяло краще дослідити структуру покриття та характер переходу між оксидним шаром і основним металом. Травлення дозволяє виявити межі зерен, структурні неоднорідності та межу між покриттям і основним металом.

Після завершення підготовки шліфів проводили безпосередній мікроструктурний аналіз. Дослідження здійснювали при збільшеннях $\times 100$ та $\times 255$. Під час аналізу оцінювали структуру плазмооксидного покриття, характер пористості, наявність дефектів, рівномірність покриття та межу між покриттям і основою алюмінієвого сплаву.

Отримані мікроструктурні зображення використовували для подальшого аналізу структури та особливостей сформованих ПЕО-покриттів.

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

2.3. Методика визначення мікротвердості

Визначення мікротвердості застосовують для оцінки механічних властивостей поверхневих шарів та захисних покриттів. Для плазмооксидних покриттів даний метод дозволяє оцінити твердість оксидного шару, рівномірність структури, а також зміну властивостей у різних зонах матеріалу [21].

У роботі визначення мікротвердості проводили методом Віккерса за допомогою стаціонарного мікротвердоміра ТС-МКВ1. Принцип роботи приладу базується на вдавлюванні алмазного індентора пірамідальної форми у поверхню досліджуваного матеріалу під дією заданого навантаження з подальшим вимірюванням діагоналей отриманого відбитка. За отриманими значеннями діагоналей прилад автоматично визначає значення мікротвердості за шкалою HV [22]. Зовнішній вигляд мікротвердоміра ТС-МКВ1 наведено на рисунку 2.4.

Перед проведенням вимірювань підготовлений металографічний шліф закріплювали на робочому столику приладу та за допомогою підйомного механізму підводили до індентора. Для спостереження за поверхнею використовували оптичну систему мікротвердоміра зі збільшенням $\times 100$ та $\times 400$. Після фокусування поверхні здійснювали вдавлювання алмазного індентора при навантаженні 0,1 кгс із витримкою під навантаженням протягом заданого часу.

Після завершення навантаження за допомогою вбудованого мікроскопа вимірювали дві діагоналі відбитка (D1 та D2), після чого прилад автоматично розраховував значення мікротвердості. Метод Віккерса дозволяє проводити вимірювання локальних ділянок матеріалу та оцінювати зміну твердості в різних структурних зонах покриття і основного металу [22].

					БР 2126.00.000 ПЗ	30 Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30



Рисунок 2.4 – Мікротвердомір ТС-МКВ1

Дослідження проводили на підготовлених металографічних шліфах. Вимірювання виконували у трьох зонах: в основному металі, поблизу межі покриття та безпосередньо у плазмооксидному покритті. У кожній зоні проводили приблизно по три вимірювання з подальшим визначенням середнього значення мікротвердості.

Під час вимірювань враховували пористу структуру ПЕО-покриттів, тому відбитки наносили на найбільш рівні та суцільні ділянки поверхні. Це дозволяло зменшити вплив пор і поверхневих дефектів на результати вимірювань та підвищити точність отриманих значень мікротвердості [15] .

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4. Методика гідростатичного зважування

Гідростатичне зважування застосовують для визначення густини та пористості захисних покриттів. Для плазмооксидних покриттів даний метод дозволяє оцінити кількість пор у сформованому оксидному шарі та визначити щільність покриття. Пористість є важливою характеристикою ПЕО-покриттів, оскільки вона впливає на корозійну стійкість, міцність та експлуатаційні властивості поверхневого шару [25].

У роботі дослідження проводили на зразках алюмінієвого сплаву Д16 після проведення ПЕО. Перед виконанням вимірювань зразки очищували та висушували природним шляхом. Для запобігання проникненню води у відкриті пори поверхню зразків покривали тонким шаром парафіну.

Суть методу полягає у порівнянні маси зразка в повітрі та у воді. Під час занурення зразка у воду можна визначити його об'єм, що дає змогу розрахувати густину та пористість покриття [25].

Для проведення дослідження використовували спеціальну скляну посудину – пікнометр. Під час вимірювань визначали масу сухого зразка, масу зразка у дистильованій воді та масу пікнометра із рідиною і зразком. На основі отриманих значень розраховували густину та пористість сформованих покриттів.

Дослідження проводили декілька разів для кожного зразка з подальшим визначенням середніх значень. Отримані результати використовували для оцінки впливу режимів ПЕО на структуру сформованих покриттів. Більш пористі покриття характеризуються меншою густиною та містять більшу кількість пор, тоді як щільніші покриття мають кращу корозійну стійкість та більш стабільні експлуатаційні властивості [25].

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1. Дослідження мікроструктур синтезованих покриттів

Після проведення ПЕО на поверхні зразків алюмінієвого сплаву Д16 сформувалися оксидні покриття з характерною пористою структурою. Під час мікроструктурного аналізу добре помітно, що структура покриттів для обох зразків відрізняється як за кількістю пор, так і за рівномірністю сформованого шару. На мікроструктурних зображеннях чітко видно межу між основним металом та оксидним покриттям, а також пористу будову поверхневого шару, характерну для ПЕО-покриттів. На рисунку 3.1 наведено мікроструктуру зразка №1 після проведення ПЕО.

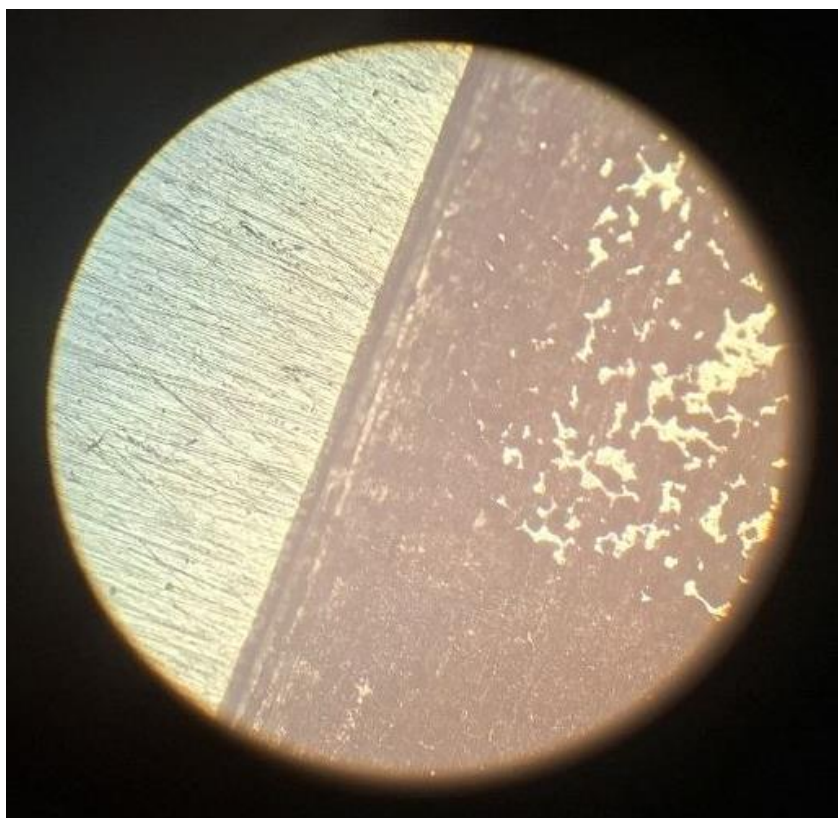


Рисунок 3.1 – Мікроструктура ПЕО-покриття зразка №1 при збільшенні $\times 100$

					БР 2126.00.000 ПЗ	Зрк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Покриття зразка №1 має відносно рівномірну структуру та порівняно невелику кількість великих пор. На більшості досліджених ділянок спостерігаються дрібні округлі пори, які рівномірно розподілені по товщині оксидного шару. Межа між покриттям і основним металом є чіткою та без помітних дефектів. Відшарувань або значних тріщин у структурі не виявлено, що свідчить про достатнє зчеплення покриття з поверхнею алюмінієвого сплаву. На рисунку 3.2 наведено мікроструктуру зразка №2 після проведення ПЕО.

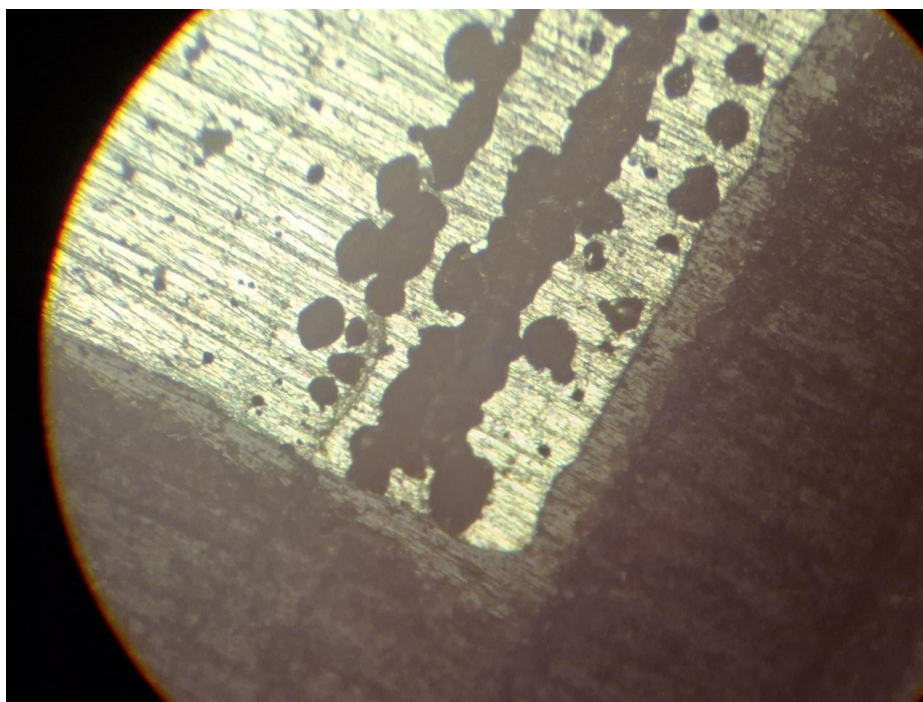


Рисунок 3.2 – Мікроструктура ПЕО–покриття зразка №2 при збільшенні $\times 255$

Порівняно зі зразком №1, покриття зразка №2 має більш розвинену пористу структуру. Такі особливості структури можуть бути пов'язані з більш інтенсивним протіканням плазмових процесів під час ПЕО. Для зразка №2 сила струму становила близько 0,65 А, тоді як для зразка №1 – приблизно 0,35 А. Незважаючи на меншу тривалість обробки зразка №2, вища сила

					БР 2126.00.000 ПЗ	34 Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

струму сприяла активнішому формуванню оксидного шару та збільшенню кількості пор у покритті.

3.2. Встановлення товщини та мікротвердості ПЕО-покриттів, синтезованих на алюмінієвому сплаві

Під час дослідження встановлено, що режими ПЕО суттєво впливають не лише на структуру покриття, а і на його товщину та твердість. Покриття зразка №1 зображено на рисунку 3.3. Отримані результати показали помітну різницю між зразками як за товщиною сформованого оксидного шару, так і за значеннями мікротвердості в різних зонах дослідження.

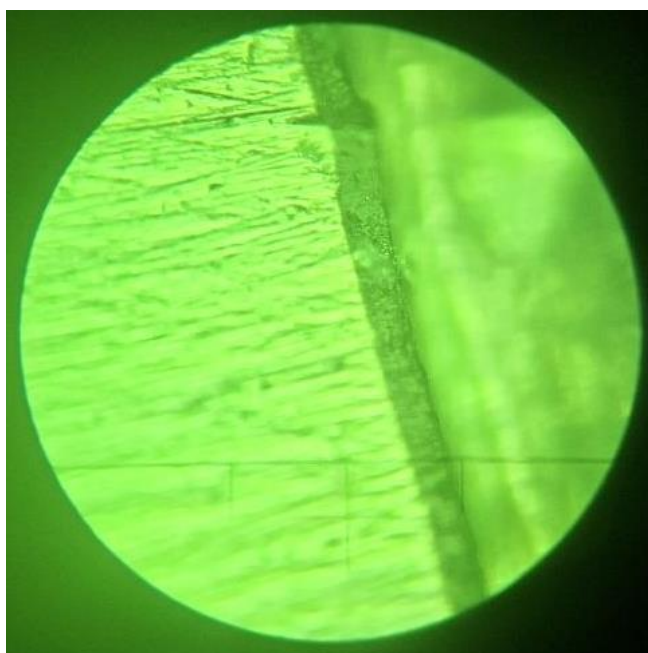


Рисунок 3.3 – Мікроструктура ПЕО-покриття зразка №1 при збільшенні $\times 400$

Мікротвердість покриттів визначали методом Віккерса шляхом нанесення серії вдавнень алмазною пірамідою з подальшим визначенням

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

середнього значення твердості. Приклади отриманих відбитків наведено на рисунках 3.4, 3.5. Наявність декількох вдавлень на поверхні зразків підтверджує проведення серії вимірювань для підвищення точності отриманих результатів.

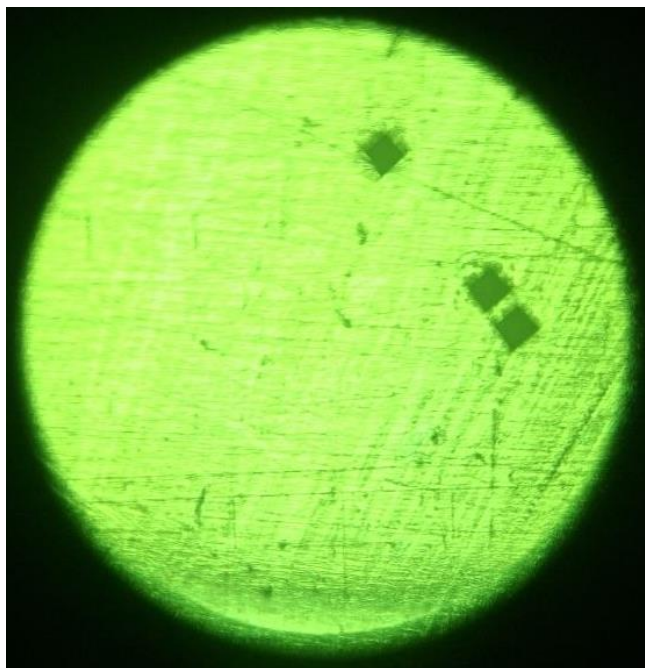


Рисунок 3.4 – Відбитки індентора під час визначення мікротвердості методом Віккерса при збільшенні $\times 100$

Під час визначення мікротвердості методом Віккерса встановлено, що середнє значення твердості основного металу становило 185,6 HV. У зоні поблизу межі покриття твердість дещо знижувалась і становила 176 HV. Водночас твердість самого ПЕО-покриття досягала 2165,8 HV, що значно перевищувало твердість алюмінієвого сплаву. Таке різке зростання твердості пояснюється формуванням на поверхні керамікоподібного оксидного шару під час ПЕО.

Під час визначення мікротвердості методом Віккерса встановлено, що

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

середнє значення твердості основного металу становило 185,6 HV. У зоні поблизу межі покриття твердість дещо знижувалась і становила 176 HV. Водночас твердість самого ПЕО-покриття досягала 2165,8 HV, що значно перевищувало твердість алюмінієвого сплаву. Таке різке зростання твердості пояснюється формуванням на поверхні керамікоподібного оксидного шару під час ПЕО.

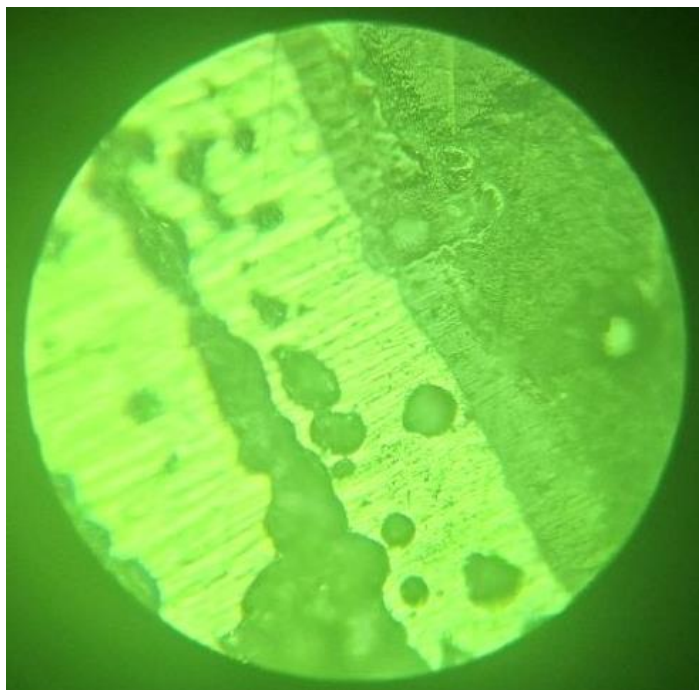


Рисунок 3.5 – Мікроструктура ПЕО-покриття зразка №2 при збільшенні $\times 40$

Для зразка №2 середня товщина сформованого покриття становила 142,6 мкм, що значно перевищувало товщину покриття зразка №1. ПЕО даного зразка проводили протягом 20 хв при силі струму близько 0,65 А. Площа поверхні зразка становила 0,1262 дм².

Середня твердість основного металу для зразка №2 становила 167,3 HV. У зоні поблизу покриття твердість зростала до 230,7 HV, що може свідчити про зміцнення приповерхневої області під час ПЕО. Твердість

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

самого покриття становила 2344 HV.

Порівняння отриманих результатів показало, що зразок №2 характеризувався не лише більшою товщиною покриття, а й вищими показниками твердості. Незважаючи на меншу тривалість обробки, більша сила струму сприяла інтенсивнішому протіканню плазмових процесів та активнішому росту оксидного шару. У результаті цього сформувалося більш товсте та тверде покриття.

Для зразка №1, навпаки, при меншій силі струму формувалося тонше покриття з нижчими показниками твердості. При цьому твердість основного металу в обох випадках залишалася значно нижчою за твердість сформованого оксидного шару, що підтверджує ефективність ПЕО для зміцнення поверхні алюмінієвих сплавів.

3.3. Визначення пористості ПЕО-покриттів

Пористість є однією з основних характеристик плазмоелектролітичних оксидних покриттів, оскільки вона суттєво впливає на корозійну стійкість, щільність та експлуатаційні властивості поверхневого шару. Для ПЕО-покриттів характерна наявність пор і каналів, які утворюються внаслідок дії мікророзрядів під час процесу оксидування.

У даному підрозділі проаналізовано пористість ПЕО-покриттів, сформованих на алюмінієвому сплаві Д16 за різних режимів оброблення. Зразок №1 обробляли при силі струму 0,35 А протягом 30 хв, тоді як зразок №2 – при 0,65 А протягом 20 хв. Отримані результати показали, що зміна режимів ПЕО суттєво впливає на структуру та пористість сформованого оксидного шару.

Для оцінювання пористості використовували істинну та середню густину покриттів. Істинну густину визначали пікнометричним методом за формулою:

					БР 2126.00.000 ПЗ	ЗгАрк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\rho = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1 - m_4 + m_3} \rho_p \quad (3.1)$$

Де: m_1 – маса сухого пікнометра;

m_2 – маса пікнометра з рідиною;

m_3 – маса сухого пікнометра із зразком;

m_4 – маса пікнометра з рідиною та зразком;

ρ_p – густина рідини якою заповнюється пікнометр.

Середню густина визначали методом гідростатичного зважування:

$$\rho_0 = \frac{m}{\frac{m_1 - m_2}{\rho_e} - \frac{m_1 - m}{\rho_n}} \quad (3.2)$$

де m_1 – маса зразка покритого парафіном;

m_2 – маса зразка покритого парафіном та зваженого у воді;

m – маса зразка зваженого на повітрі;

ρ_e – густина води;

ρ_n – густина парафіну на поверхні зразка.

Відкриту пористість визначали за формулою:

$$P = \left(1 - \frac{\rho_{\text{сер}}}{\rho_{\text{іст}}} \right) \cdot 100\%, \quad (3.3)$$

де P – відкрита пористість, %;

$\rho_{\text{сер}}$ – середня густина покриття;

$\rho_{\text{іст}}$ – істинна густина покриття.

Для зразка №1 істинна густина становила 3,12 г/см³, а середня густина – 2,74 г/см³. Тоді пористість покриття визначали за формулою:

$$P_1 = \left(1 - \frac{2,74}{3,12} \right) \cdot 100\% = 12,18\%$$

					БР 2126.00.000 ПЗ	Зг. Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для зразка №2 істинна густина становила 3,18 г/см³, а середня густина – 2,58 г/см³. Пористість покриття визначали за формулою:

$$P_2 = \left(1 - \frac{2,58}{3,18}\right) \cdot 100\% = 18,87\%.$$

Отримані результати показали, що покриття зразка №2 є суттєво більш пористим порівняно зі зразком №1. Це можна пояснити більшою силою струму під час ПЕО, через що мікророзрядні процеси проходили інтенсивніше та супроводжувалися активнішим формуванням пор і каналів у поверхневому шарі.

Для зразка №1 процес оксидування проходив стабільніше, тому структура покриття була більш рівномірною та містила меншу кількість великих пор. Водночас для зразка №2 спостерігалось формування значно товстішого покриття (142,6 мкм), однак це супроводжувалося зростанням відкритої пористості до 18,9 %.

Отримані результати добре узгоджуються з даними мікроструктурного аналізу та вимірювання мікротвердості. Більш пористе покриття зразка №2 одночасно характеризувалося більшою товщиною та вищою твердістю, що свідчить про інтенсивніший перебіг процесів плазмоелектролітного оксидування при більшій силі струму.

Узагальнені результати визначення пористості ПЕО–покриттів наведено в таблиці 3.6.

					БР 2126.00.000 ПЗ	10 Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Таблиця 3.6 – Результати дослідів товщини, твердості, пористості покриттів, синтезованих на сплаві Д16.

Показник	Зразок №1	Зразок №2
Час ПЕО, хв	30	20
Сила струму ПЕО, А	0,35	0,65
Товщина покриття, мкм	22,3	142,6
Твердість покриття, НV	2165,8	2344,0
Істинна густина, г/см ³	3,12	3,18
Середня густина, г/см ³	2,74	2,58
Відкрита пористість, %	12,2	18,9

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі досліджено особливості формування ПЕО–покриттів на алюмінієвому сплаві Д16 у середовищі лужного силікатного електроліту та визначено вплив режимів ПЕО на структуру, товщину, твердість і пористість сформованих покриттів.

Проведені дослідження показали, що режими ПЕО суттєво впливають на характер формування оксидного шару та його властивості. У процесі роботи вдалося простежити взаємозв'язок між силою струму, особливостями мікроструктури, товщиною покриття, рівнем пористості та твердістю поверхневого шару.

Мікроструктурний аналіз показав, що покриття, сформовані за різних режимів обробки, помітно відрізнялися між собою. Для зразка №1 характерним було формування тоншого та більш рівномірного покриття з меншою кількістю великих пор. Для зразка №2, навпаки, спостерігалось формування більш товстого шару з більшою кількістю пор та локальних неоднорідностей у структурі покриття. Отримані результати добре узгоджувалися з особливостями перебігу плазмових процесів під час оксидування.

1. Встановлено, що при обробці зразка №1 при силі струму 0,35 А протягом 30 хв середня товщина покриття становила 22,3 мкм. Для зразка №2, який обробляли при силі струму 0,65 А протягом 20 хв, товщина оксидного шару досягала 142,6 мкм. Отримані результати показали, наскільки суттєво зміна режимів ПЕО може впливати на швидкість росту та особливості формування оксидного покриття.

2. Дослідження мікротвердості методом Віккерса підтвердило значне зміцнення поверхневого шару після проведення ПЕО. Для зразка №1 середня твердість покриття становила 2165,8 НV, а для зразка №2 – 2344 НV, тоді як твердість основного металу залишалася в межах 167,3–185,6 НV.

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

3. Під час визначення пористості встановлено, що відкрита пористість зразка №1 становила 12,2 %, а для зразка №2 – 18,9 %. Зростання пористості при більшій силі струму можна пояснити інтенсивнішим перебігом мікророзрядних процесів, які супроводжувалися активнішим формуванням пор у поверхневому шарі покриття.

4. Порівняння отриманих результатів показало, що збільшення сили струму під час ПЕО сприяло формуванню більш товстих і твердих покриттів, однак одночасно супроводжувалося збільшенням відкритої пористості. Це підтвердило складний взаємозв'язок між режимами плазмоелектролітного оксидування та властивостями сформованих покриттів.

Проведене дослідження дозволило на практиці простежити, наскільки суттєво режими плазмоелектролітного оксидування впливають на структуру та властивості сформованих покриттів. Отримані результати показали, що навіть зміна сили струму та тривалості оброблення помітно змінює товщину, твердість і пористість оксидного шару, що робить процес ПЕО цікавим як з наукової, так і з практичної точки зору.

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. J.R. Davis, Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, 2001, Pages 1–784,
<https://materialsdata.nist.gov/bitstream/handle/11115/173/Aluminum%20and%20Aluminum%20Alloys%20Davis.pdf>.
2. Hatch, J.E., Aluminum: Properties and Physical Metallurgy, ASM International, 1984, Pages 1–424, <https://doi.org/10.31399/asm.tb.apm.t51290001>.
3. Polmear, I.J., Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals, 4th Edition, Butterworth-Heinemann, 2005, Pages 1–544,
<https://doi.org/10.1016/B978-075066371-7/50000-6>.
4. Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, 2024, Pages 1–5, https://www.asminternational.org/wp-content/uploads/files_main/pdf/ASM%20Subject%20Guide_Aluminum.pdf.
5. Stojadinovic S, Vasilic R, Belca I, Kasalica B, Nedic Z, Zekovic Lj. Photoluminescent properties of barrier anodic oxide films on aluminum. Thin Solid Films. 2011;519(11):3516–3521.
6. Kasalica B, Petkovic M, Belca I, Stojadinovic S, Zekovic Lj. Electronic transitions during plasma electrolytic oxidation of aluminum. Surface & Coatings Technology. 2009;203(21):3000–3004. doi: 10.1016/j.surfcoat.2009.03.011.
7. S. Stojadinovic et al., Galvanoluminescence properties of porous oxide films formed by anodization of aluminum in malonic acid, Journal of Electroanalytical Chemistry, 2008.
8. T. M. Labur, V. A. Koval, Structure and Mechanical Properties of Heat-Treated D16 Aluminium–Alloy Welded Joints Made with a Consumable Electrode after Heat Treatment, Metallofizika i Noveishie Tekhnologii, Volume 47, Issue 6, 2025, Pages 627–645, <https://doi.org/10.15407/mfint.47.06.0627>.

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

9. Valeria Subbotina, Oleg Sobol, Valery Belozarov, Alexander Subbotin, Yuliya Smyrnova, A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on D16 alloy during micro-arc oxidation in electrolytes of different types, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Volume 4, Issue 12(106), 2020, Pages 14 – 23, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209722>.

10. D16/Д16 Aluminium wrought alloys, splav-kharkov.com, Pages, http://www.splav-kharkov.com/en/e_mat_start.php?name_id=1438.

11. J. W. Diggle, T. C. Downie, C. W. Goulding, Anodic oxide films on aluminum, Chemical Reviews, Volume 69, Issue 3, 1969, Pages 365-405, <https://doi.org/10.1021/cr60259a005>.

12. Roman G. F. Went, Alexander B. P. et al., MEMBRANE MATERIALS BASED ON POROUS ANODIC ALUMINIUM OXIDE, Physical chemistry, 2020, <https://doi.org/10.33609/2708-129X.86.12.2020.67-102>.

13. Characterization of oxide coating grown by plasma electrolytic oxidation (PEO) at different times on aluminum alloy AA2024-T3, MRS Communications, 2022, <http://dx.doi.org/10.1557/s43579-022-00174-9>.

14. Plasma electrolytic oxidation of pre-anodized aluminium, Surface and Coatings Technology, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.09.005>.

15. S. Stojadinovic et al., Characterization of the plasma electrolytic oxidation of aluminium, Corrosion Science, 2010.

16. X. Sun, X. Han, C. Dong, X. Li, Applications of Aluminum Alloys in Rail Transportation, in Advanced Aluminium Composites and Alloys, IntechOpen, 2021, Pages 145 – 170, <https://doi.org/10.5772/intechopen.96442>.

17. Xiaohan You, Zhiquan Xing, et al., A review of research on aluminum alloy materials in structural engineering, Journal of Materials Research and Technology, Volume 27, 2023, Pages 944 – 983, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785423024006>

18. Pooya Parvizi, Milad Jalilian, Pedram Sorouri Mirazizi, Mohammad Reza Zangeneh, Alireza Mohammadi Amidi, Mechanical and physical properties of

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

aluminum and its alloys for electrical conductors: A review, Next Materials, Volume 9, 2025, ISSN 2949–8228, <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.101090>.

19. Stojadinovic S, Petkovic M, Belca I, Kasalica B, Nedic Z, Zekovic Lj. Characterization of the plasma electrolytic oxidation of aluminium in sodium tungstate. Corrosion Science. 2010;52(10):3258–3265. doi: 10.1016/j.corsci.2010.05.042.

20. Petkovic M, Stojadinovic S, Vasilic R, Belca I, Nedic Z, Kasalica B, Mioč UB. Preparation of silicate tungsten bronzes on aluminum by plasma electrolytic oxidation process in 12-tungstosilicic acid. Applied Surface Science. 2011;257(23):9555–9561. doi: 10.1016/j.apsusc.2011.06.062.

21. Cui S, Han J, Du Y, Li W. Corrosion resistance and wear resistance of plasma electrolytic oxidation coatings on metal matrix composites. Surface & Coatings Technology. 2007; 201(21):5306–5309. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.07.126.

22. Gu W–C, Lv G–H, Chen H, Chen G–L, Feng W–R, Yang S–Z. Characterisation of ceramic coatings produced by plasma electrolytic oxidation of aluminum alloy. Materials Science and Engineering A. 2007;447(1–2):158–162. doi: 10.1016/j.msea.2006.09.004. Rezwan K, Chen QZ, Blaker JJ, Boccaccini AR. Biodegradable and bioactive porous polymer/inorganic composite scaffolds for bone tissue engineering. Biomaterials. 2006 Jun;27(18):3413–31. doi: 10.1016/j.biomaterials.2006.01.039. Epub 2006 Feb 28. PMID: 16504284.

23. Xue W, Jin Q, Zhu Q, Hua M, Ma Y. Anti-corrosion microarc oxidation coatings on SiC P P /AZ31 magnesium matrix composite. Journal of Alloys and Compounds. 2009;482(1–2):208–212. doi: 10.1016/j.jallcom.2009.03.098.

24. Lampke T, Meyer D, Alisch G, Nickel D, Scharf I, Wagner L, Raab U. Alumina coatings obtained by thermal spraying and plasma anodising – A comparison. Surface & Coatings Technology. 2011. doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.09.006.

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

25. Curran J.A., Clyne T.W. Porosity in plasma electrolytic oxide coatings // Acta Materialia. 2006. Vol. 54, No. 8. P. 1985–1993.
<https://www.ccg.msm.cam.ac.uk/system/files/documents/porosity.pdf>

					БР 2126.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					БР 2126.00.000 ПЗ	18Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48