

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»

ВПЛИВ ПЛАЗМОЕЛЕКТРОЛІТНОГО ОКСИДУВАННЯ СПЛАВУ Д16
НА СТРУКТУРУ МАТРИЦІ / THE EFFECT OF PLASMA
ELECTROLYTIC OXIDATION OF D16 ALLOY ON THE MATRIX
STRUCTURE

спеціальність 132 «Матеріалознавство»

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Індустріальний
інжиніринг і менеджмент»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ(ПМ)-41
Омельчук Олексій Вікторович

(підпис)

Керівник:
д.т.н., професор
Імбірович Наталія Юріївна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 20__ р.
к.т.н., доцент
Гарант освітньої програми:
Гусачук Дмитро Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет 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.

" 03 " січня 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

- Ашмелев Олександр Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)
1. Тема роботи Тимчасовий план експериментального окиснення
сплавів А16 на структуру матриці
- керівник роботи Імбирович Н.Ю., д.т.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
- затверджені наказом вищого навчального закладу від "31" 12 2025 року № 54901-02
2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
"23" травня 2026р.
3. Вихідні дані до роботи смак та властивості сплаву А16,
розміри графіків
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Огляд технічної літератури. Мето-
дика експериментальних досліджень. Експериментальна
частинка. Технологічна частинка. Висновки. Список
використаних джерел.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
1. Мета і завдання роботи
 2. Властивості досліджуваного матеріалу.
 3. Смак електроду.
 - 4,5. Додаткова інформація про ОДП.
 - 6,7. Додаткова інформація про ОДП.
 8. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання	завдання прийнято
Н.конфрань	Лисковець С.В., доцент каф. матеріалознавства	... 05.26	

7. Дата видачі завдання «05» 01 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Прізвище
1.	Вступ. Розділ 1.	05.05.26	виконав
2.	Розділ 2, розділ 3	12.05.26	виконав
3.	Розділ 4. Висновки	19.05.26	виконав

Здобувач вищої освіти

Керівник кваліфікаційної роботи

Александр
(прізвище та підпис)

Лисковець
(прізвище та підпис)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

АНОТАЦІЯ

Омельчук О.В. Вплив плазмоелектролітного оксидування сплаву Д16 на структуру матриці. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП "Індустріальний інжиніринг та менеджмент" спеціальність 132. Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

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

Метою даної бакалаврської роботи було дослідити фізичні властивості сплаву Д16 після плазмо-електролітного оксидування в лужних електролітах. Проводились дослідження фізико-механічних властивостей оксидокерамічних покриттів синтезованих на алюмінієвому сплаві Д16, проведено мікроструктурні дослідження, визначали значення товщини та мікротвердості оксидокерамічного покриття.

Бакалаврська робота складається з пояснювальної записки та додатків. Пояснювальна записка містить 51 сторінку, 13 рисунків, 11 таблиць та включає список із 14 літературних джерел. Графічна частина складається з 10 аркушів формату А4, представлених у Додатку А.

Ключові слова: синтез, окиснення, плазма, електроліт, дuralumin, покриття.

					БР-2626.00.000-ПЗ			
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата	Вплив плазмоелектролітного оксидування сплаву Д16 на структуру матриці / The effect of plasma electrolytic oxidation of D16 alloy on the matrix structure +	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив	Омельчук						Зм.	51
Перевірив	Габришан					ЛІНТУ		
Н. Копрів	Мисковець					каф. матеріалознавства		
Затв.	Габришан					тр. ТІМ(ІМ)-41		

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		3

ANNOTATION

Omelchuk O.V. The influence of plasma electrolytic oxidation of alloy D16 on the matrix structure. Manuscript.

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

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

The purpose of this bachelor's work was to investigate the physical properties of alloy D16 after plasma electrolytic oxidation in alkaline electrolytes. Studies of the physical and mechanical properties of oxide-ceramic coatings synthesized on aluminum alloy D16 were carried out, microstructural studies were carried out, the values of the thickness and microhardness of the oxide-ceramic coating were determined.

The bachelor's work consists of an explanatory note and appendices. The explanatory note contains 51 pages, 13 figures, 11 tables and includes a list of 14 references. The graphic part consists of 10 A4 sheets, presented in Appendix A.

Keywords: synthesis, oxidation, plasma, electrolyte, draluminum, coating.

					БП 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	7
1.1. Класифікація алюмінію за ступенем чистоти і його механічні властивості	7
1.2. Можливі легуючі елементи для алюмінію	8
1.3. Використання алюмінію та його сплавів в промисловості	10
1.4. Властивості дюралюмінію	11
1.5. Методи поверхневого зміцнення металів	17
1.6. Захист деталей від різних видів зношування	19
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	20
2.1. Характеристика об'єкту досліджень	22
2.2. Методика формування оксидокерамічного покриття	22
2.3. Методика визначення товщини та твердості покриття	24
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	28
3.1. Аналіз мікроструктурних досліджень	28
3.2. Результати визначення товщини покриттів на алюмінієвому сплаві, отриманих методом ПЕО	30
3.3. Результати досліджень мікротвердості оксидокерамічних покриттів, синтезованих на алюмінієвому сплаві Д16 на різних відстанях між електродами	34
3.4. Кореляційні залежності товщини та мікротвердості ОКП на алюмінієвому сплаві від складу електроліту та віддалі між електродами	36
РОЗДІЛ 4 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	
4.1. Особливості роботи з високовольтним обладнанням	42
4.2. Правила підготовки до початку роботи на виробництві	45
ВИСНОВКИ	48

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

49

ДОДАТКИ

52

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Вироби з алюмінієвих сплавів із захисними покриттями широко застосовуються у різних галузях промисловості, зокрема покриттями, отриманими методом мікродугового або плазмоелектролітного оксидування (МДО, ПЕО).

Технологія ПЕО має значні переваги порівняно з іншими способами нанесення покриттів. Сформовані покриття характеризуються підвищеною твердістю, високою зносостійкістю, міцним зчепленням із металевою основою, а також ефективними антикорозійними властивостями.

Разом із тим, через високу енергоємність процесу та його порівняно невисоку продуктивність навіть при використанні оптимальних за складом електролітів, дана технологія поки що не набула широкого промислового впровадження.

Створення нових технологічних підходів і розробка оптимізованих електролітів, здатних усунути зазначені недоліки, можливі лише за умови формування ефективного механізму плазмоелектролітного оксидування алюмінієвих сплавів.

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Класифікація алюмінію за ступенем чистоти і його механічні властивості

Чистий алюміній широко використовується переважно в електронній промисловості – від виробництва електролітичних конденсаторів до сучасних високотехнологічних мікропроцесорів. Також він знаходить застосування у кріоелектроніці та кріомагнетиці.

Алюміній із чистотою понад 99,99 % уперше було отримано методом електролізу у 1920 році. Уже в 1925 році в роботах Едвардса були наведені окремі дані щодо фізичних і механічних властивостей цього матеріалу.

Серед сучасних методів отримання високочистого алюмінію застосовують зонне очищення, кристалізацію з амальгам (сплавів алюмінію з ртуттю), а також виділення металу з лужних розчинів.

Рівень чистоти алюмінію визначають за величиною його електроопору при низьких температурах. На сьогодні використовується така класифікація алюмінію за ступенем чистоти:

- а) алюміній промислової чистоти – 99,5 ... 99,79 %;
- б) високочистий алюміній – 99,8 ... 99,94 %;
- в) надчистий алюміній – понад 99,999 %;
- г) особливо чистий алюміній – 99,996 ... 99,999 %;
- д) ультрачистий алюміній – понад 99,999 %.

Механічні властивості алюмінію різного ступеня чистоти представлено в таблиці 1.1. Чистий алюміній є досить м'яким металом – його твердість майже втричі менша, ніж у міді, тому навіть товсті алюмінієві пластини та стрижні легко піддаються згинанню. Проте при утворенні сплавів, кількість

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

яких є надзвичайно великою, твердість алюмінію може збільшуватися у десятки разів [1].

Таблиця 1.1 – Механічні властивості алюмінію при кімнатній температурі

Чистота, %	Межа текучості, $\sigma_{0,2}$, МПа	Межа міцності, σ_B , МПа	Відносне видовження, δ ,%
99,99	10	45	50
99,8	20	60	45
99,6	30	70	43

1.2. Основні легуючі елементи для алюмінію

З метою покращення механічних властивостей алюмінію його зазвичай легують різними елементами, які надають алюмінієвим сплавам властивостей домінуючого елемента. Найпоширенішими легувальними елементами для алюмінію є такі:

а) берилій, який додають для зменшення окиснення при високих температурах. Невеликі його концентрації (0,01...0,05 %) застосовують у ливарних алюмінієвих сплавах для покращення текучості під час виготовлення деталей двигунів внутрішнього згоряння, зокрема поршнів і головок циліндрів;

б) бор, що використовується для підвищення електропровідності та як рафінуюча добавка. Його вводять у сплави, які застосовуються в атомній енергетиці (за винятком деталей реакторів), оскільки бор ефективно поглинає нейтрони та стримує поширення радіації. Зазвичай його вміст становить 0,095 ... 0,1 %;

в) метали з низькою температурою плавлення – вісмут, свинець, олово та кадмій. Їх додають для покращення оброблюваності різанням. Вони

утворюють м'які легкоплавкі фази, що сприяють кращому ламанню стружки та зменшенню тертя різального інструмента;

г) галій, який у кількості 0,01...0,1 % вводять до сплавів, призначених для виготовлення анодів;

д) залізо, яке в невеликих кількостях (понад 0,04 %) додають під час виробництва дротів для підвищення міцності та покращення характеристик повзучості. Крім того, залізо зменшує прилипання металу до стінок форм при литті в кокіль;

е) індій, добавка якого в межах 0,05...0,2 % сприяє зміцненню алюмінієвих сплавів у процесі старіння, особливо при низькому вмісті міді. Такі сплави застосовують, зокрема, у виробництві алюмінієво-кадмієвих підшипників;

є) кадмій, який у кількості близько 0,3 % підвищує міцність і корозійну стійкість сплавів;

ж) кальцій, що покращує пластичність матеріалу. При його вмісті близько 5 % сплави можуть проявляти ефект надпластичності;

з) кремній — одна з найпоширеніших добавок у ливарних алюмінієвих сплавах. Його введення у межах 0,5...4 % зменшує схильність до тріщиноутворення, а поєднання кремнію з магнієм забезпечує можливість термічного зміцнення сплаву;

и) магній, який істотно підвищує міцність без помітного зниження пластичності, покращує зварюваність та збільшує корозійну стійкість;

і) мідь, що забезпечує зміцнення сплавів. Найбільший ефект досягається при вмісті 4...6 % міді. Такі сплави широко використовують для виготовлення поршнів двигунів внутрішнього згорання та високоякісних литих деталей авіаційної техніки;

ї) олово, яке покращує оброблюваність різанням;

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

й) титан, основною функцією якого є подрібнення зерна у виливках і злитках, що значно підвищує міцність та забезпечує рівномірність властивостей матеріалу по всьому об'єму [2, 3].

1.3. Використання алюмінію та його сплавів в промисловості

Алюміній є одним із найпоширеніших і найдоступніших металів, без якого складно уявити сучасну техніку та побут. Його недарма називали металом ХХ століття. Матеріал добре піддається різним видам механічної обробки – куванню, штампуванню, прокатуванню, волочінню та пресуванню.

Чистий алюміній характеризується високою пластичністю та м'якістю, тому з нього виготовляють електричні дроти, конструкційні елементи, харчову фольгу, кухонне приладдя, а також алюмінієві фарби. Завдяки невеликій густині, привабливому зовнішньому вигляду та корозійній стійкості алюміній широко застосовується у будівництві та авіаційній промисловості. Метал має високу відбивну здатність, тому його використовують для виготовлення дзеркал шляхом вакуумного напилення [4].

У машинобудуванні, авіації та будівельній галузі переважно використовують не чистий алюміній, а його сплави, які відзначаються значно вищою міцністю. Одним із найвідоміших є сплав алюмінію з міддю та магнієм – дюралюміній (дюраль), назва якого походить від німецького міста Дюрен. Дюралюміні поєднують високу міцність і достатню пластичність, хоча їх корозійна стійкість є відносно невисокою. Типовим представником цієї групи є сплав Д16, що містить приблизно 4,3 % Cu, 1,5 % Mg та 0,6 % Mn. Після гартування та старіння такий сплав набуває високої твердості й стає майже у сім разів міцнішим за чистий алюміній, залишаючись при цьому майже втричі легшим за сталь.

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Дюралюміній отримують шляхом легування алюмінію невеликими кількостями міді, магнію, марганцю, кремнію та заліза. Широко застосовуються також силуміни – ливарні алюмінієво-кремнієві сплави. Крім того, виробляють високоміцні, жароміцні та криогенні алюмінієві сплави, стійкі до низьких температур. На поверхню виробів з алюмінієвих сплавів легко наносяться захисні та декоративні покриття [5].

Алюмінієва бронза, яка містить до 11 % Al, характеризується високими механічними властивостями та корозійною стійкістю, зокрема в морській воді та слабких розчинах соляної кислоти [6].

1.4. Властивості дюралюмінію

Сплави системи Al – Cu – Mg, відомі як дюралюміній, є одними з найстаріших і найважливіших алюмінієвих сплавів, що широко використовуються у машинобудуванні та особливо в авіаційній техніці. Найпоширенішими представниками цієї групи є сплави Д16 та його модифікації Д16ч і 1163. Після термічного зміцнення вони характеризуються високою ударною в'язкістю, зносостійкістю та стійкістю до розвитку втомних тріщин [7].

Хоча дюралюміній поступається за міцністю сплавам системи Al – Zn – Mg – Cu та мають нижчу корозійну стійкість, вони перевершують їх за зносостійкістю. Основними легувальними елементами дюралюмініїв є мідь, магній та марганець, а базовим компонентом виступає алюміній. Хімічний склад дюралюмініїв представлено в таблиці 1.2.

Сплави системи Al – Cu – Mg мають вищу жароміцність порівняно зі сплавами Al – Mg, Al – Mg – Si та Al – Zn – Mg – Cu. Їхні переваги особливо проявляються при температурах понад 100 °C і за тривалого нагрівання. Водночас сплави Д16 та Д1 схильні до утворення кристалізаційних тріщин, тому їх відносять до групи сплавів, що погано зварюються плавленням.

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Таблиця 1.2 – Хімічний склад дюралюмініїв

Марка сплаву	Cu	Mg	Mn	Домішки, % не більше				
				Fe	Si	Zn	Ti	Ni
Д16	3,8...4,9	1,2...1,8	0,3...0,9	0,5	0,5	0,3	0,1	0,1
Д16ч	3,8...4,9	1,2...1,8	0,3...0,9	0,3	0,2	0,1	0,1	0,05
Д63	3,8...4,5	1,2...1,6	0,4...0,8	0,15	0,1	0,1	0,01...0,07	0,05
Д1	3,8...4,8	0,4...0,8	0,4...0,8	0,7	0,7	0,3	0,1	0,1
Д1ч	3,8...4,3	0,4...0,8	0,4...0,8	0,4	0,5	0,3	0,1	0,1
Д18	2,2...3,0	0,2...0,5	0,2	0,5	0,5	0,1	0,1	-
Д19	3,8...4,3	1,7...2,3	0,5...1,0	0,5	0,5	0,1	0,1	-

Механічні властивості дюралюмініїв значною мірою залежать від режимів термічної обробки. За способом зміцнення їх поділяють на термічно незміцнювані та термічно зміцнювані. Високі експлуатаційні характеристики досягаються в результаті гартування та подальшого старіння.

Термічна обробка ґрунтується на змінній розчинності міді, магнію та інших легувальних елементів у твердому алюмінії при різних температурах. Основною метою гартування є отримання перенасиченого твердого розчину, здатного зміцнюватися в процесі старіння. Для сплаву Д1 температура гартування становить приблизно 495 ... 510 °С [8].

Нагрів дюралюмінієвих виробів здійснюють у електропечах із примусовою циркуляцією повітря або у ваннах із розплавленими нітратами, найчастіше евтектичною сумішшю NaNO_3 та KNO_3 . Використання селітрових ванн забезпечує швидке й рівномірне нагрівання та зменшує окиснення поверхні, однак потребує суворого дотримання техніки безпеки через ризик вибуху при потраплянні вологи або органічних речовин.

Після нагріву дюралюмінії гартують у холодній воді, а великогабаритні деталі – у гарячій, щоб уникнути утворення тріщин. У результаті формується перенасичений твердий розчин, який після гартування має невисоку міцність, але високу пластичність.

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Необхідних механічних властивостей дюралюміній набуває в процесі старіння – самовільної зміни структури та властивостей після гартування. Старіння може бути природним (при кімнатній температурі) або штучним (при нагріванні до температур не вище 250 °C).

В таблиці 1.3 представлено режими тзагартування та старіння для дюралюмінів.

Таблиця 1.3 – Режимы загартування і старіння дюралюмінів

Марка	Допустимий інтервал температур під загартування, °C	Температура старіння, °C	Тривалість старіння, год
Д1	495...510	20	≥ 96
Д16	485...503	20	≥ 96
Д19 (піддаються і природному і штучному старінню)	495...505	185...195	12...14
Д20	530...540	200...220	8...12
Д21	520...530	180...190	15...17

Під час природного старіння в перенасиченому твердому розчині утворюються зони Гіньє-Престона – дрібнодисперсні області, збагачені міддю. Вони викликають спотворення кристалічної ґратки та забезпечують зміцнення сплаву. Процес природного старіння зазвичай завершується протягом 5 ... 7 діб. На початковій стадії сплав ще зберігає високу пластичність, що дає можливість проводити холодну деформацію, однак уже через кілька годин пластичність знижується, а міцність інтенсивно зростає [9]. Механічні властивості дюралюмінів представлено в таблиці 1.4.

При штучному старінні процеси структуроутворення є складнішими. Крім зон Гіньє-Престона, утворюються проміжні та стабільні фази, зокрема сполука CuAl_2 . На початкових стадіях це призводить до зміцнення, але при надмірній тривалості старіння сплав поступово розміцнюється через укрупнення частинок та зменшення викривлення кристалічної ґратки.

У деяких випадках дюралюміній піддають обробці «на повернення», яка полягає у короткочасному нагріванні до 150 ... 300 °С. Після такої обробки матеріал стає більш пластичним і придатним для холодної деформації, а згодом знову здатний до старіння.

Таблиця 1.4 – Механічні властивості дюралюмінів

Марка	Стан матеріалу чи термічна обробка	Механічні характеристики, не менше		
		σ_B , Н/мм ²	δ , %	НВ, Н/мм ²
Д1	Відпалений Загартований і природно зістарений	не більше 210 380	12 12	450 1130
Д1Т	Загартування з 500 ⁰ С у воді, природне старіння	400	20	—
Д16	Відпалений Загартований і природно зістарений	не більше 230 430	10 10	420 1050
Д16Т	Загартування з 500 ⁰ С у воді, природне старіння	460	17	—

Додаткове зміцнення термічно обробленого дюралюмінію може здійснюватися методом холодної пластичної деформації, хоча при цьому пластичність матеріалу зменшується. Для відновлення пластичності та зниження твердості застосовують відпал, який зазвичай проводять при температурі 350 ... 370 °С [10].

Отже, метою такої термічної обробки, як загартування для дюралюмінів є надання їм однорідного перенасиченого твердого розчину, який має здатність до старіння в подальшому.

Сплав, склад якого відповідає дюралюмінію (приблизно 4 % Cu), на діаграмі впливу на нього температури, яка зображена на рисунку 1.1, відображається вертикальною лінією abc. Оптимальна температура загартування визначається точкою а, за якої сплав переходить у стан однорідного твердого розчину.

Недостатній нагрів до цієї температури призводить до збереження в структурі нерозчинених частинок інтерметалідної сполуки CuAl_2 , що негативно впливає на властивості матеріалу. Перегрів вище точки α є ще небезпечнішим, оскільки викликає укрупнення зерен твердого розчину та окиснення по межах зерен, унаслідок чого різко зростає крихкість сплаву.

У результаті як недогріву, так і перегріву спостерігається погіршення механічних властивостей сплаву, зокрема його міцності та пластичності.

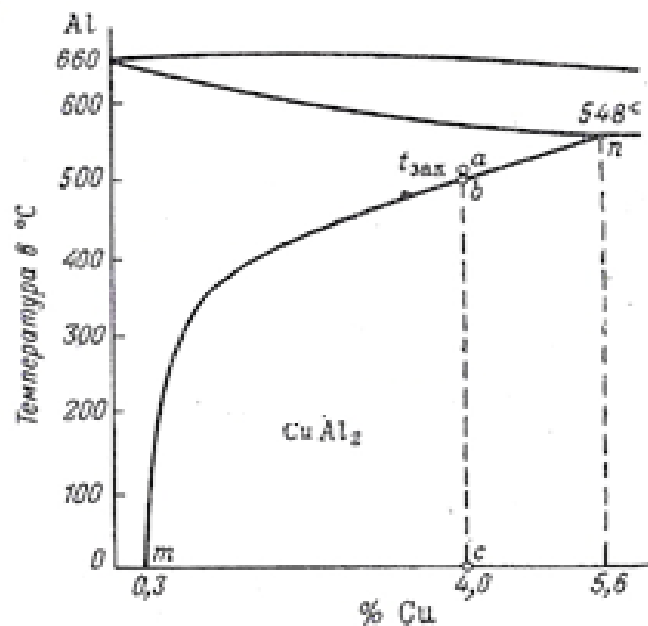


Рисунок 1.1 – Вибір температури загартування при термічній обробці дюралюмінію

Вище зазначалось, що для дюралюмінію марки Д1, до складу якого, крім алюмінію та міді, входять також магній, марганець, кремній і залізо, оптимальна температура загартування становить 495 ... 510 °С.

Нагрівання у селітрових ваннах забезпечує швидке та рівномірне прогрівання матеріалу, запобігає окисненню поверхні, характерному для повітряного середовища, а також спрощує контроль температурного режиму. Водночас така технологія потребує суворого дотримання правил безпеки,

оскільки потрапляння води чи органічних речовин у розплав може спричинити розбризування або навіть вибух [11].

Загартування дюралюмінію зазвичай проводять у холодній воді. Для деталей із перерізом понад 80 мм застосовують гарячу воду, що дозволяє зменшити ризик утворення тріщин. Після загартування фіксується однорідний твердий розчин, який існував при температурі нагрівання. За кімнатної температури такий розчин є сильно перенасиченим міддю, магнієм та іншими легувальними елементами. Свіжозагартований дюралюміній характеризується невисокою міцністю, але значною пластичністю.

Необхідних високих механічних властивостей сплав набуває лише після процесу старіння. Зміна міцності від часу старіння дюралюмінію представлена на рисунку 1.2.

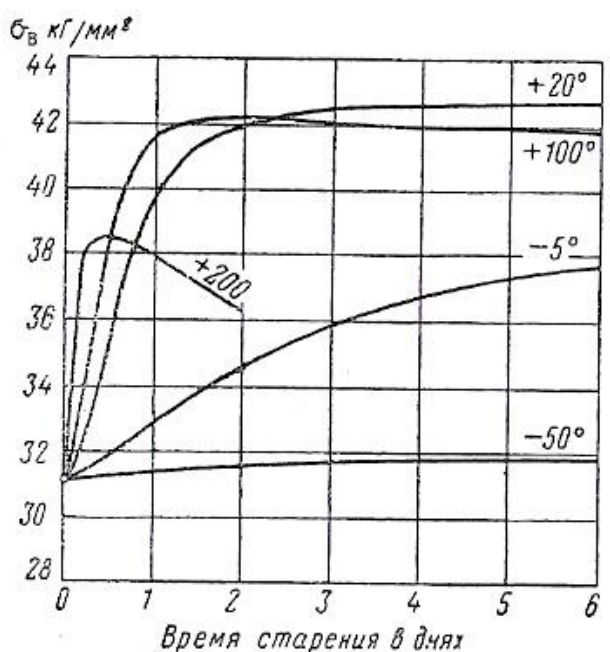


Рисунок 1.2 — Криві старіння дюралюмінію

Сучасні уявлення про старіння подвійних сплавів системи Al — Cu пояснюють цей процес дифузією атомів міді в перенасиченому твердому

розчині одразу після загартування. Атоми міді концентруються в окремих ділянках, де формуються так звані зони Гін'є-Престона (ЗГП) – субмікроскопічні пластинчасті області, збагачені міддю. Ці зони тісно пов'язані з твердим розчином і спричиняють значне викривлення кристалічної ґратки в прилеглих областях. Саме це викривлення є основною причиною зміцнення дюралюмінію в процесі старіння.

Природне старіння супроводжується лише утворенням зон Гін'є-Престона. Інтенсивність їх формування поступово зменшується, і приблизно через 5 ... 7 діб процес практично завершується. На початковій стадії старіння спостерігається так званий інкубаційний період, коли помітного підвищення міцності ще не відбувається. Це має важливе практичне значення, оскільки в цей час сплав зберігає високу пластичність і невелику твердість, що полегшує проведення операцій холодної пластичної деформації. Проте вже через 20 хвилин – 2 години пластичність починає знижуватися, а найінтенсивніше зростання міцності спостерігається протягом наступних 5 ... 15 годин [12].

1.5. Методи поверхневого зміцнення металів

Міцність — це властивість матеріалу протидіяти пластичній деформації та руйнуванню під впливом зовнішніх навантажень [12].

Основною метою поверхневого зміцнення є підвищення міцності, твердості та зносостійкості поверхневих шарів деталей при одночасному збереженні в'язкої та пластичної серцевини, здатної ефективно сприймати ударні навантаження.

Існуючі методи зміцнення металів умовно поділяють на шість основних класів (таблиця 1.5) [13], кожен з яких охоплює різні технологічні процеси та способи обробки.

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Таблиця 1.5 – Класифікація методів зміцнення металів

Клас методів зміцнення	Метод	Типи процесів
1	2	3
Зміцнення створенням плівки на поверхні виробу	Осадження хімічної реакції	Хімічне оксидування, нікелювання, сульфидування, кадміювання, фосфатування, нанесення зміцнюючого змащувального матеріалу, осадження з газової фази
	Електролітичне осадження	Електролітичне хромування, нікелювання, нікельфосфатування, борування, борохромування, хромофосфатування
	Осадження твердих опадів з пари	Електроіскрове легування, катодноіонне бомбардування, прямий електронно-променевий випар, реактивний електронно-променевий випар, електрохімічний випар, термічний випар тугоплавких з'єднань
	Напилення зносостійких з'єднань	Плазмове напилення порошкових матеріалів, детонаційне напилення, напилення електродуги, лазерне напилення
Зміцнення зміною хімічного складу поверхневого шару металу	Дифузійне насичення	Хіміко-термічне нітрооксидування, нітроцементация, карбонітрація, карбохромування, хромоазотування, хромотитанування, азотування, хромосиліціювання, хромоалітування, борохромування, борування, ціанування, дифузійне хромування, дифузійне нікелювання, циркосиліціювання, бороціанування, легування малопотужними пучками іонів
Зміцнення зміною структури поверхневого шару	Фізико-термічна обробка	Лазерне гартування, плазмове гартування
	Електрофізична обробка	Електроімпульсна обробка, обробка електроконтакту, електроерозійна обробка, ультразвукова обробка
	Механічна обробка	Зміцнення вібрацією, фрикційно-зміцнююча обробка, дробоструменева обробка, обробка вибухом, термомеханічна обробка, прокатування, волочіння, редукування, термопластична обробка

Продовження таблиці 1.5

1	2	3
	Наплавлення легованого металу	Наплавлення газовим полум'ям, електричною дугою, плазмою, лазерним променем, пучком іонів
Зміцнення зміною енергетичного запасу поверхневого шару	Обробка в магнітному полі	Обробка: електроферромагнітна, в імпульсному магнітному полі
Зміцнення зміною шорсткості поверхні	Електрохімічне полірування	Занурення у ванну (у струмені електроліту)
	Обробка різанням	Шліфування, суперфінішування, хонінгування
	Пластична деформація	Накатування, розкочування
Зміцнення зміною структури всього об'єму металу	Термічна обробка при позитивних температурах	Гарт: крізна, некрізна. Ізотермічна, з само відпуском, з підстуджуванням, з безперервним охолодженням і ступінчаста. Відпуск низький і високий
	Кріогенна обробка	Гартування з обробкою холодом від температури гарту або охолодження від нормальної температури,

1.6. Захист деталей від різних видів зношування

З метою підвищення зносостійких властивостей широко розповсюдженою практикою є створення або нанесення на поверхнях деталей захисних покриттів з високими механічними властивостями.

Покриттям називають шар матеріалу, який природним або штучним способом формується на поверхні виробу, виготовленого з іншого матеріалу. Найчастіше покриття використовують для захисту металів від корозії. Крім того, вони широко застосовуються в техніці для підвищення зносостійкості,

поверхневої твердості деталей, а також для відновлення робочих поверхонь, пошкоджених унаслідок зношування, корозії, ерозії чи кавітації [14].

Матеріали з високою корозійною стійкістю часто використовують без додаткових захисних шарів. Однак в умовах експлуатації при підвищених температурах, дії агресивних середовищ або радіаційного випромінювання виникає потреба у додатковому антикорозійному захисті.

Технології плазмохімічного синтезу дають можливість формувати оксидокерамічні покриття із заданою товщиною та високими показниками твердості.

Відомо, що всі метали та сплави при температурах понад 800 °С активно взаємодіють із киснем, тому без спеціального захисту не можуть ефективно використовуватись у таких умовах. Проблема захисту металів і сплавів від окиснення є складною та багатогранною, а пошук ефективних захисних покриттів, дослідження механізмів окиснення та причин руйнування покривів переважно здійснюються експериментальними методами.

За способом формування захисні покриття поділяють на чотири основні групи:

- а) дифузійні;
- б) покривні або лакофарбові;
- в) комбіновані дифузійно-покривні;
- г) імплантовані.

Найбільшого поширення набули дифузійні покриття. Вони характеризуються достатньо міцним зчепленням з основою та відносною простотою отримання. Водночас їхнім недоліком є висока температура формування та активна взаємодія з матеріалом основи.

Покриття покривного типу формуються за нижчих температур, ніж дифузійні, однак мають слабшу адгезію до поверхні металу.

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

За складом захисного шару покриття поділяють на металеві, інтерметалідні, оксидні та металокерамічні. Металеві покриття, призначені для захисту від окиснення, не повинні утворювати з основним металом суцільні тверді розчини, а мають формувати лише обмежені тверді розчини. Крім того, такі покриття повинні бути непроникними для кисню, оскільки проникнення кисню до основи та утворення оксидів під покриттям призводить до його швидкого відшарування. Під час окиснення на поверхні мають утворюватися оксидні плівки зі щільно упакованими іонами кисню, що забезпечує ефективний захист.

Для запобігання руйнуванню та сколюванню покриття необхідно забезпечити його добре зчеплення з основою. Однак надмірна взаємодія між покриттям і металом основи може спричиняти дифузійне розчинення захисного шару.

Одна з моделей росту покриття описується таким чином: після формування на поверхні металу бар'єрного шару напруженість електричного поля на межі поділу фаз зростає, і при перевищенні діелектричної міцності плівки відбувається її пробій. Унаслідок цього виникає іскровий розряд з локальною електронною температурою до 10000 °C і тиском до 1800 атм. Частина металу із зони розряду викидається на поверхню, де взаємодіє з електролітом, забезпечуючи подальше формування покриття [10 – 14].

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика об'єкту досліджень

Об'єктом даного дослідження є алюмінієвий сплав Д16 з оксидокерамічним покриттям, сформованим на його поверхні.

Хімічний склад сплаву Д16 включає: 90,9 ... 91,5 % Al; 3,8 ... 4,9 % Cu; до 0,5 % Si; 1,2 ... 1,8 % Mg; 0,3 ... 0,9 % Mn; до 0,5 % Fe; близько 0,1 % Cr; до 0,25 % Zn; до 0,15 % Ti.

Сплав Д16 характеризується певними фізичними та механічними властивостями. Зокрема, твердість відпаленого сплаву становить приблизно HB 42 МПа, тоді як після загартування та подальшого старіння вона зростає до HB 105 МПа.

2.2. Методика формування оксидокерамічного покриття

Формування анодно-іскрового покриття проводили у гальваностатичному режимі – анодному та анодно-катодному з використанням установки, схематичне зображення якої представлено на рисунку 2.1, до складу якої входили: деталь (1), на поверхні якої утворювався покриття; електроліт (2); електролітна ванна (3) та зона іскрових розрядів (4).

Силовий блок установки забезпечував підвищення амплітудної напруги до 800 В для анодного півперіоду та до 400 В для катодного при фіксованих середніх значеннях анодного (I_a) і катодного (I_k) струмів, встановлених для конкретного режиму обробки.

Як катод використовували ванну, виготовлену з нержавіючої сталі марки 12Х18Н9Т. Густина струму в процесі становила 10 ... 30 А/дм², а співвідношення катодного та анодного струмів змінювалося в межах 1 ... 1,5.

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За допомогою амперметрів і вольтметрів здійснювали реєстрацію часових залежностей амплітудних значень анодної (U_a) та катодної (U_k) напруг, а також величин струмів у процесі формування покриття.

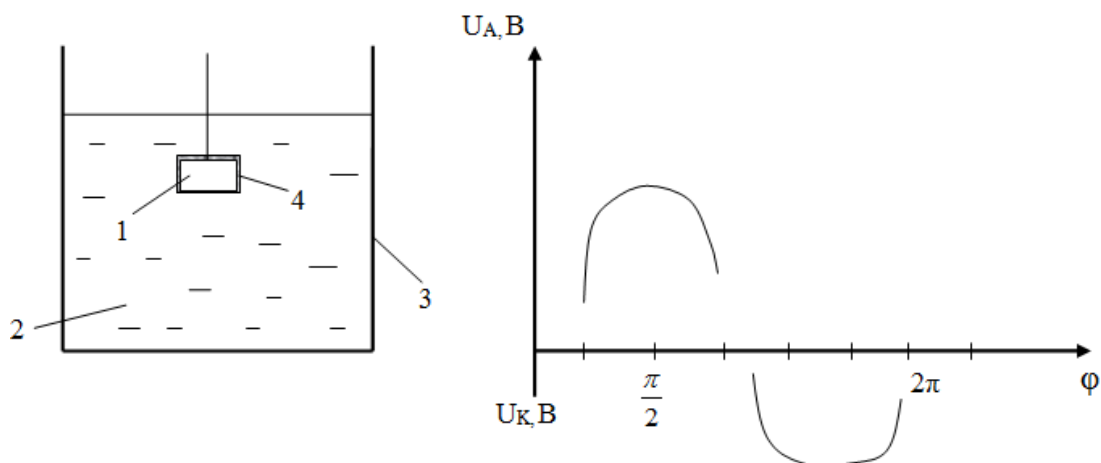


Рисунок 2.1 – Процес нанесення оксидокерамічного покриття:

а – схема установки для іскрового анодування алюмінієвого сплаву:

1 - деталь, на якій формується покрив;

2- електроліт;

3- ванна;

4- іскрові розряди.

б – графік залежності у часі амплітудних значень анодної та катодної напруг

Анодно-іскрове оксидування проводили в електролітах різного складу, компонентами яких були: КОН 3 ... 5 г/л та рідке скло у кількості 2 ... 5 г/л. Забезпечення однорідності складу електроліту здійснювали його перемішуванням повітрям, яке подавалося безпосередньо в електролітну ванну.

Під час дослідження впливу складу електроліту його компоненти та концентрації змінювали відповідно до умов експерименту. Після завершення

процесу зразки промивали спочатку проточною, а потім дистильованою водою, висушували та піддавали подальшому аналізу.

2.3. Методика визначення товщини та твердості покритву

Як показали численні експериментальні дослідження, найбільш зручним для виготовлення мікрошліфів є зразок циліндричної форми діаметром 12 мм і висотою 10 мм. Оскільки досліджуваний виріб являв собою тонку пластину, після вирізання окремих фрагментів на відрізному крузі їх заливали епоксидною смолою з додаванням твердника, що забезпечувало зручність подальшої підготовки та проведення досліджень. У результаті отримували зразок циліндричної форми діаметром 12 мм.

Після затвердіння смоли зразки піддавали шліфуванню, поліруванню та травленню. Досліджувану поверхню попередньо вирівнювали на наждачному крузі. Покриття формували в різних електролітних середовищах, однак у непротравленому стані візуально помітити відмінності між покритвами було неможливо, так само як і виявити зміни у металевій матриці.

Товщину покриттів визначали металографічним методом за допомогою мікроскопа. Для досліджень використовували металографічний мікроскоп МИМ-10, призначений для візуального спостереження та фотографування мікроструктури металів при збільшенні від 20 до 2000 разів, а також для кількісного аналізу фаз і структурних складових сплавів із застосуванням напівавтоматичного інтеграційного пристрою.

Мікроскоп дозволяв проводити дослідження у світлому та темному полях, при прямому й косому освітленні, у поляризованому світлі, а також методами фазового контрасту та інтерференції. Оптична система забезпечувала стандартні збільшення як для візуального спостереження, так і для фотографування на фотоплівку чи фотопластинки. Для фотографування використовували спеціальний експонетричний пристрій.

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З огляду на особливості алюмінію, шліфування виконували вручну. Для цього застосовували наждачний папір із зернистістю 800, розміщений на товстому склі для забезпечення рівномірної та гладкої поверхні. Зразок притискали до паперу заторцьованою стороною і переміщували в одному напрямку до зменшення кількості рисок. Повністю усунути риси не вдавалося через особливості матеріалу. Після цього переходили до дрібнішого абразиву, а шліфування виконували у напрямку, перпендикулярному до слідів попередньої обробки.

Після досягнення необхідної точності поверхню полірували на плоскому крузі, який обертався за допомогою електродвигуна. Круг був покритий товстим склом, на яке накладали тонкий папір із нанесеною полірувальною пастою – спочатку грубою, а потім дрібнодисперсною. Полірування проводили короткими інтервалами, щоб запобігти утворенню западин у структурі матеріалу. Між окремими етапами поверхню шліфа промивали спиртом для видалення дисперсних частинок і запобігання появи додаткових подряпин.

Початковий спосіб полірування не забезпечив задовільного результату, оскільки структура шліфа пошкоджувалась. Тому дослідження повторювали, застосовуючи виключно ручне полірування. Для цього використовували товсте скло, тонкий папір і полірувальну пасту, а обробку проводили протягом короткого часу з періодичним очищенням поверхні спиртом. Полірування тривало до отримання оптимального стану поверхні.

Залежно від складу електроліту на поверхні сплаву Д16 формувалися оксидокерамічні покриття різної товщини.

Після полірування шліфи піддавали травленню. Для цього на відполіровану поверхню дерев'яною паличкою наносили реактив Шульца, до складу якого входили 45 мл азотної кислоти, 10 мл 40 %-вої плавикової кислоти та 45 мл гліцерину. Тривалість травлення становила 5 ... 10 с. Через високу концентрацію реактиву його додатково розбавляли певною кількістю

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

спирту. У результаті травлення отримували чітке зображення як покриття, так і структури металевої основи.

Вимірювання мікротвердості проводили за допомогою приладу ПТМ-3, який широко застосовується в науково-дослідних роботах і виробничому контролі мініатюрних деталей та тонких поверхневих шарів. Прилад має масивний корпус, стояк і кронштейн, що забезпечують високу жорсткість та стійкість конструкції.

Переміщення зразка здійснюється мікрометричними гвинтами з мікроподілками у двох взаємно перпендикулярних напрямках, що є зручним для точного позиціонування. Предметний столик, здатний обертатися на 180° , обладнаний двома жорсткими кінцевими упорами, які дозволяють точно встановити вибрану ділянку під алмазною пірамідою, а після нанесення відбитка – повернути мікроскоп для його вимірювання. Оптична система приладу оснащена потужним джерелом світла та високоякісною оптикою, що забезпечує чітке зображення відбитка.

Мікротвердість визначали на плоскій, ретельно відполірованій і очищеній поверхні. Під час підготовки зразків особливу увагу приділяли уникненню наклепу та перегріву поверхні, оскільки це могло призвести до спотворення результатів вимірювання.

При виборі навантаження враховували площу досліджуваної ділянки та товщину зразка або покриття. Мінімальна товщина зразка повинна була перевищувати довжину діагоналі відбитка не менше ніж у 1,5 рази. Водночас відстань від центра відбитка до краю зразка або до сусіднього відбитка мала бути не меншою за дві діагоналі відбитка [5].

Навантаження P могло змінюватися в межах $0,005 \dots 0,5$ Н. Після його зняття на поверхні залишався відбиток у вигляді піраміди з квадратною основою. Для визначення числа мікротвердості H_m навантаження ділили на умовну площу бічної поверхні відбитка та вираховували за формулою:

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$H_{\mu} = \frac{2P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,8544 \frac{P}{d^2},$$

де P – навантаження на піраміду, Н;

α – кут між бічними гранями піраміди, $\alpha=139^\circ$;

D – діагональ відбитку, мкм.

При визначенні мікротвердості в поверхню досліджуваного зразка під дією навантаження вдавлювали алмазний наконечник пірамідальної форми. Після зняття навантаження на поверхні залишався характерний відбиток у вигляді чотиригранної піраміди.

У дослідженнях використовували навантаження 50 г із витримкою під навантаженням протягом 30 с. Відстань між сусідніми відбитками відповідала подвоєній довжині діагоналі піраміди.

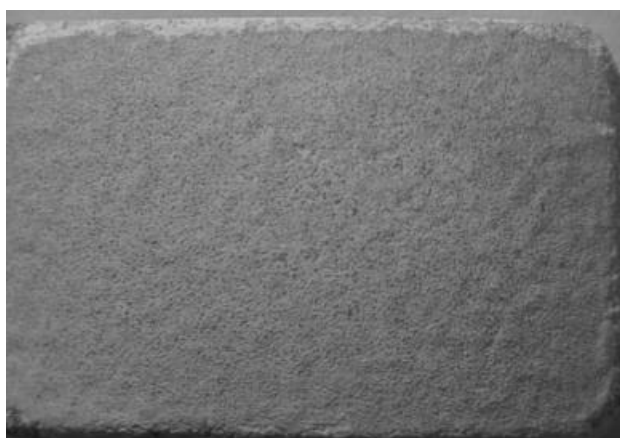
					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

РОЗДІЛ 3

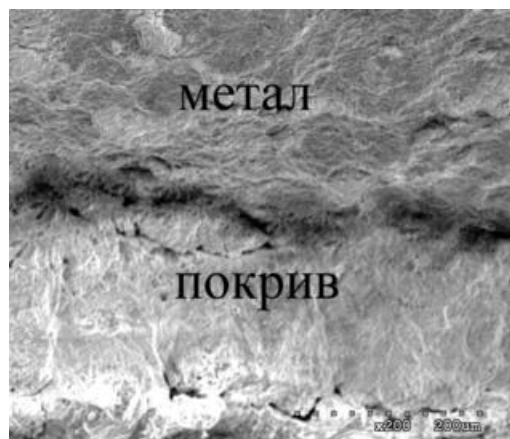
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1. Аналіз мікроструктурних досліджень

Метод плазмоелектролітного оксидування дає можливість формувати покриття з високими механічними характеристиками, добрими діелектричними властивостями та підвищеною теплостійкістю. Покриття, отримані цим способом, також відзначаються низькою пористістю. Це зумовлено тим, що процес синтезу відбувається за високих температур, унаслідок чого пори частково або повністю оплавляються (рисунок 3.1, 3.2).



а)



б)

Рисунок 3.1 – Оксидокерамічний покритв, синтезований в лужному електроліті на алюмінієвому сплаві:

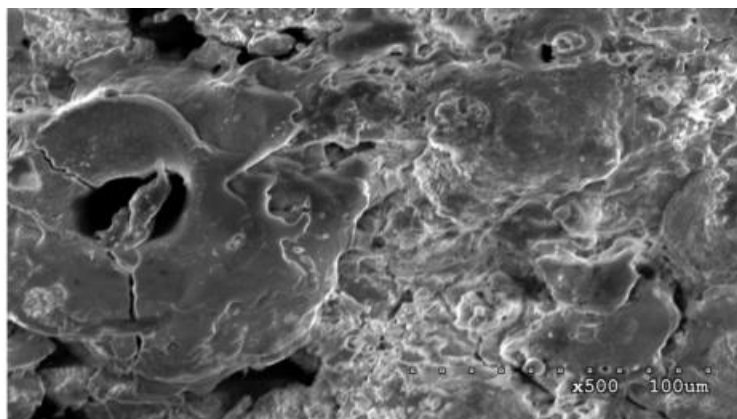
а – загальний вигляд;

б – фрактограма зламу (x10000)

Застосування плазмоелектролітного оксидування (ПЕО) забезпечує низку важливих переваг, серед яких: формування надміцних покриттів, що за твердістю поступаються лише алмазу; нанесення покриттів як на зовнішні, так і на внутрішні поверхні деталей складної конфігурації; отримання різних

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

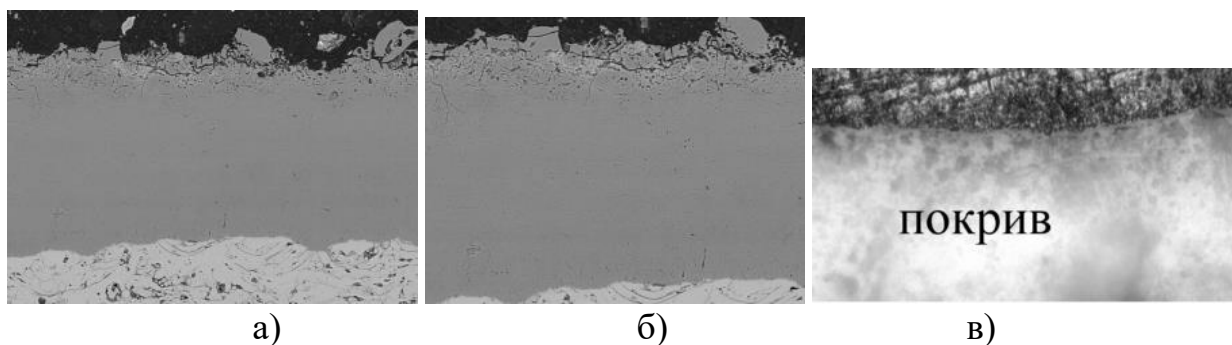
типів покриттів при використанні одного й того ж матеріалу основи; проведення процесу без необхідності попередньої підготовки поверхні; а також підвищення опору корозійній втомі та збільшення межі витривалості виробів з оксидокерамічними покриттями.



в)

Рисунок 3.2 – Оксидокерамічний покритв на алюмінієвому сплаві ($\times 50000$)

Формування оксидного шару на поверхні алюмінієвих сплавів дозволяє суттєво покращити їх експлуатаційні характеристики. На рисунку 3.3 представлена мікроструктура оксидокерамічного покриття, синтезованого на сплаві Д16.



а)

б)

в)

Рисунок 3.3 - Шліф алюмінієвого сплаву з покритвом:

а – до травлення ($\times 100$);

б – до травлення ($\times 200$);

в – після травлення ($\times 100$)

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Оскільки сформований покрив має оксидокерамічну природу, його структура є поліморфною, що добре простежується на мікрофотографії. На зображенні чітко видно межу між металевою основою та оксидним шаром. При цьому дана межа є нерівномірною, на відміну від покриттів, отриманих методом напилення. Така особливість структури свідчить про високу адгезію покриття до металевої матриці.

3.2. Результати визначення твердості покривів на алюмінієвому сплаві, отриманих методом ПЕО

Електричні параметри, а також склад і концентрація електроліту істотно впливають на товщину покриття. Тому для визначення оптимальних режимів формування покривів необхідно враховувати взаємодію цих чинників. Формування оксидного шару на поверхні алюмінієвих сплавів дає змогу значно покращити їхні експлуатаційні властивості. Товщина оксидокерамічного покриття (ОКП) залежить від відстані між робочим і допоміжним електродами, а також від концентрації електроліту.

У результаті проведених досліджень встановлено, що в електроліті з концентрацією 1 г/л КОН товщина ОКП, залежно від відстані між електродами. Результати проведених досліджень представлено в таблицях 3.1 – 3.3. Виявлено, що товщина покриття, який синтезували в електроліті складу 1 г/л КОН товщина покриття змінюється в межах від 42,656 мкм до 64,31 мкм. Водночас виявлено критичну відстань 0,25 м, за якої товщина покриття становить 40,912 мкм.

Підвищення концентрації лугу та додавання рідкого скла до складу електроліту (3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла) сприяє суттєвому збільшенню товщини ОКП. Крім того, зі збільшенням відстані між робочим і допоміжним електродами товщина покриття також зростає.

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Таблиця 3.1 – Товщина ОКП синтезованого в електроліті 1 г/л КОН

Відстань, м	Товщина, мкм
0,1	42,65625
0,25	40,9125
0,5	46,32467
1	64,31

Таблиця 3.2 – Товщина ОКП синтезованого в електроліті 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла

Відстань, м	Товщина, мкм
0,05	77,48085
0,25	75
0,5	82,34519
1	83
2,25	85,60562
4,5	91,89821

Таблиця 3.3 – Товщина ОКП синтезованого в електроліті 5 г/л КОН + 6 г/л рідкого скла

Відстань, м	Товщина, мкм
0,1	81,13846
0,25	72,94032
0,5	81,07958
2,25	81,75
4,5	82,44

У разі подальшого підвищення концентрації електроліту до 5 г/л КОН + 6 г/л рідкого скла отримані значення товщини покритву є дещо меншими порівняно з результатами для електроліту складу 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла.

Густина струму визначає характер і інтенсивність розрядів, а також температурні умови на поверхні сплаву, що безпосередньо впливає на властивості сформованих покриттів. Для сплаву Д16 в електроліті з концентрацією 1 г/л КОН при густині струму 5/5 А/дм² формується покритв товщиною 46,32 мкм (рисунок 3.4). За тих самих умов електроліту, але при співвідношенні густин струму 10/15 А/дм², товщина покритву збільшується до 57,15 мкм.

Формування оксидно-керамічних покриттів на алюмінієвому сплаві в електроліті складу 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла при співвідношенні $I_a/I_k = 5/5$ А/дм² забезпечує збільшення товщини покритву до 82,35 мкм. Підвищення густини струму до співвідношення $I_a/I_k = 10/15$ А/дм² сприяє подальшому зростанню товщини покритву, яка досягає 98,37 мкм.

Зростання концентрації лугу та рідкого скла в електроліті до складу 5 г/л КОН + 6 г/л рідкого скла призводить до зменшення товщини покритву при співвідношенні струмів 5/5 А/дм², проте при співвідношенні 10/15 А/дм² товщина покритву, навпаки, збільшується.

При підвищенні концентрації лугу та рідкого скла до складу електроліту 5 г/л КОН + 6 г/л рідкого скла спостерігається суттєве зниження мікротвердості покритву. Для співвідношення густин струмів 5/5 А/дм² мікротвердість сформованого покритву становить 700 кг/мм². При співвідношенні струмів 10/15 А/дм² значення мікротвердості зростає до 856,35 кг/мм².

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

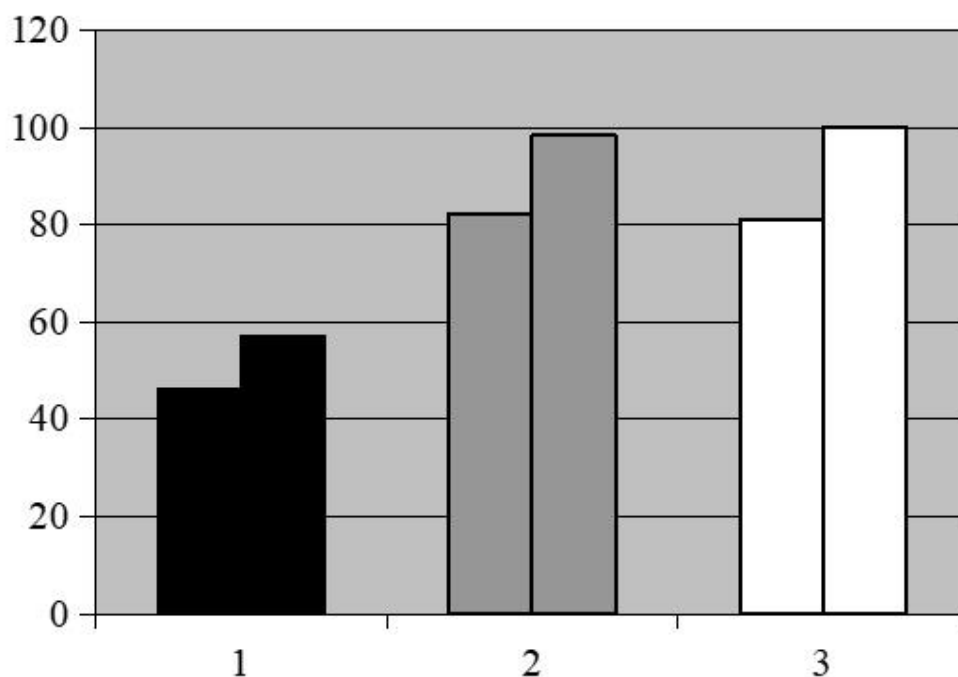


Рисунок 3.4 – Вплив параметрів обробки на товщину покриття, синтезованого на алюмінієвому сплаві в електроліті:

1 – 1 г/л КОН; 2 – 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла;

3 – 5 г/л КОН + 6 г/л рідкого скла

У результаті досліджень встановлено, що зі збільшенням співвідношення густини струмів підвищуються як товщина, так і мікротвердість покриття. Додавання рідкого скла до електроліту, який містить лише луг, також позитивно впливає на ці характеристики. Однак при подальшому збільшенні концентрації електроліту до 5 г/л КОН + 6 г/л рідкого скла спостерігається зменшення товщини та мікротвердості оксидно-керамічного покриття.

3.3. Результати досліджень мікротвердості оксидокерамічних покриттів, синтезованих на алюмінієвому сплаві Д16 на різних відстанях між електродами

Формування покривів методом плазмоелектролітного оксидування сприяє підвищенню мікротвердості поверхні. Мікротвердість покриву алюмінієвого сплаву Д16 залежить від умов обробки, зокрема електричних параметрів, складу та концентрації електроліту, а також відстані між робочим і допоміжним електродами.

У ході проведених досліджень було визначено значення мікротвердості оксидно-керамічних покривів. Отримані результати наведені в таблицях 3.4 – 3.6. Для електроліту з концентрацією 1 г/л КОН значення мікротвердості змінюються в межах від 866,762 кг/мм² до 643,064 кг/мм² залежно від відстані між робочим і допоміжним електродами (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Мікротвердість ОКП, синтезованого в електроліті 1 г/л КОН

Відстань, м	Мікротвердість, кг/мм ²
0,1	708,74354
0,25	866,76281
0,5	702,5296
1	643,06409

Додавання до електроліту рідкого скла та підвищення концентрації лугу до складу 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла сприяє суттєвому зростанню мікротвердості покриву (таблиця 3.5). Зокрема, при відстані між електродами 0,25 м значення мікротвердості досягає 1100 кг/мм².

Подальше збільшення концентрації електроліту до 5 г/л КОН та 6 г/л рідкого скла дало результати досліджень, наведені в таблиці 3.6, які свідчать про зниження мікротвердості зі зростанням концентрації електроліту.

Таблиця 3.5 Мікротвердість ОКП синтезованого в електроліті
3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла

Відстань, м	Мікротвердість, кг/мм ²
0,05	801,87358
0,25	1100
0,5	1031,01229
1	911
2,25	681,33596
4,5	787,30282

Таблиця 3.6 Мікротвердість ОКП синтезованого в електроліті
5 г/л КОН + 6 г/л рідкого скла

Відстань, м	Мікротвердість, кг/мм ²
0,1	706,20804
0,25	948,66226
0,5	700
2,25	591,06642
4,5	815,72107

Отже, для віддалі між електродами, яка становить 0,25 м (5 г/л КОН + 6 г/л рідкого скла) мікротвердість дорівнює 948,66 кг/мм².

При підвищенні співвідношення густин струму в електроліті 1 г/л КОН спостерігається зростання мікротвердості покриву. Зокрема, для співвідношення $I_a/I_k = 5/5$ А/дм² мікротвердість становить 702,52 кг/мм², тоді як при співвідношенні $I_a/I_k = 10/15$ А/дм² вона збільшується до 900,32 кг/мм² (рисунок 3.5).

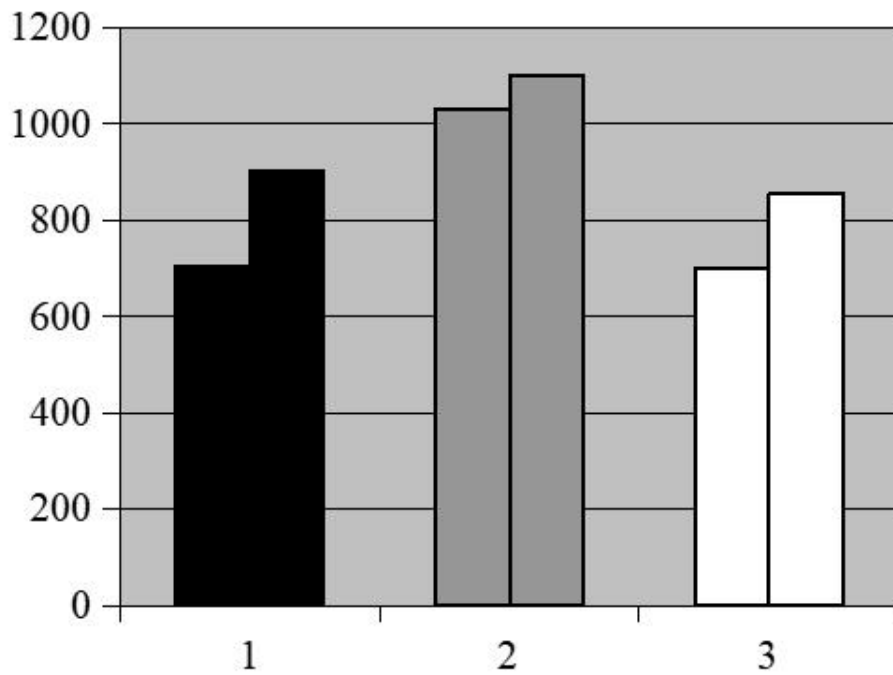


Рисунок 3.5 – Вплив параметрів обробки на мікротвердість покриття:

1 – в електроліті 1 г/л КОН; 2 – 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла;

3 – в електроліті 5 г/л КОН + 6 г/л рідкого скла

Підвищення концентрації електроліту до 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла сприяє подальшому збільшенню мікротвердості покриття для обох співвідношень густин струму – 5/5 А/дм² та 10/15 А/дм². У цьому випадку значення мікротвердості становлять відповідно 1031,01 кг/мм² і 1100,2 г/мм².

3.4. Кореляційні залежності товщини та мікротвердості ОКП на алюмінієвому сплаві від складу електроліту та віддалі між електродами

Товщина покриттів, яка значною мірою визначає їхні функціональні властивості, залежить від електричних параметрів процесу, складу та концентрації компонентів електроліту. Важливим чинником також є відстань

між робочим і допоміжним електродами. Тому дослідження взаємного впливу цих параметрів є необхідним для вибору оптимальних режимів формування покривів.

Синтез покривів проводили в лужних електролітах на основі КОН і рідкого скла. Зокрема, при формуванні покриву в електроліті з концентрацією 1 г/л КОН (рисунок 3.6) на відстані 0,1 м від допоміжного електрода товщина покриву становила 42,6 мкм, тоді як при збільшенні відстані до 1,0 м вона зросла на 21,71 мкм. Таким чином, зі зменшенням відстані між електродами товщина покриття знижується, що можна пояснити збідненням електроліту на менших відстанях.

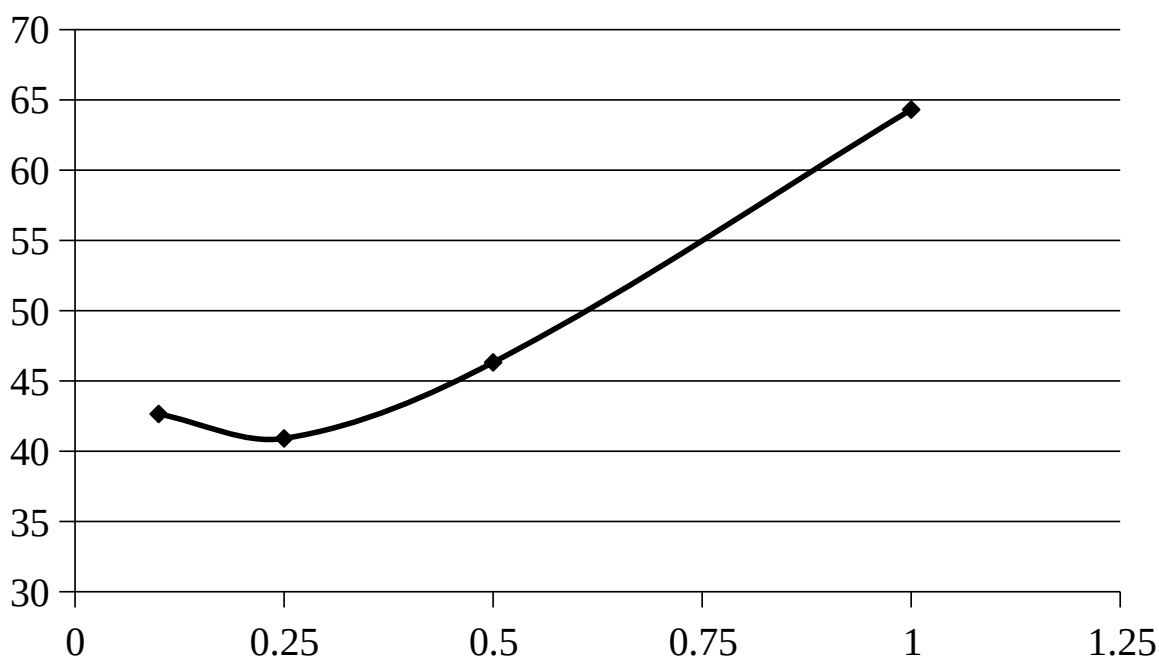


Рисунок 3.6 – Вплив віддалі між електродами на товщину покриву в електроліті 1 г/л КОН

При збільшенні концентрації електроліту до складу 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла спостерігається зростання товщини покриву (рисунок 3.7).

Найменше значення товщини формується при відстані між електродами 0,25 м і становить 75 мкм, тоді як при зменшенні відстані до 0,05 м товщина покриття зростає до 77,48 мкм. За умови збільшення відстані до 4,5 м товщина сформованого шару досягає 91,898 мкм.

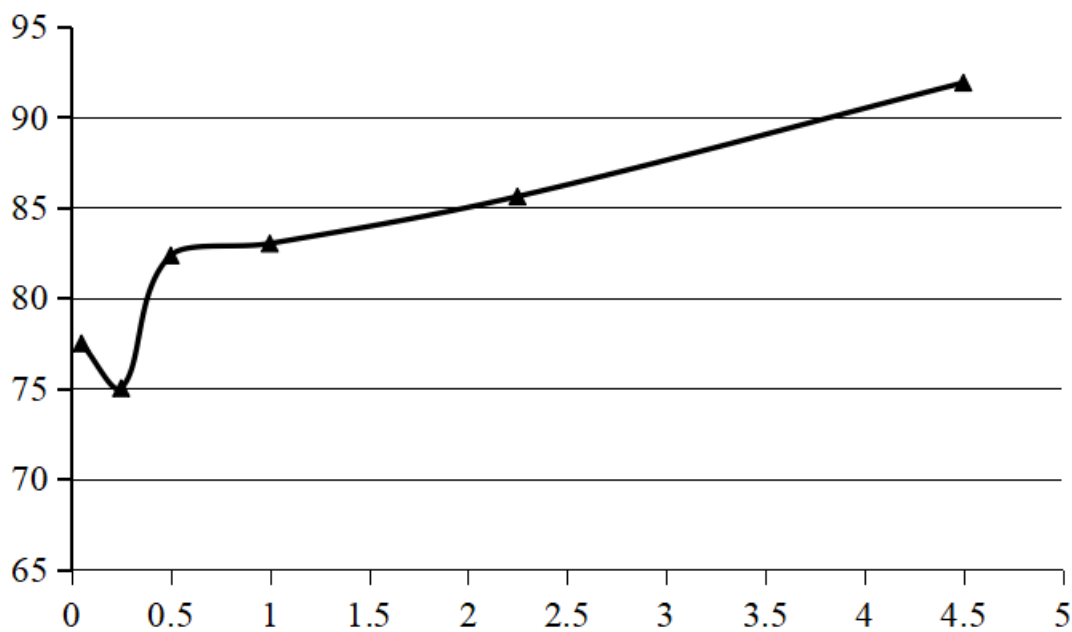


Рисунок 3.7 – Вплив віддалі між електродами на товщину покриття в електроліті 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла

Подальше підвищення концентрації електроліту до 5 г/л КОН + 6 г/л рідкого скла також впливає на товщину покриття (рисунок 3.8). Для відстані між електродами 0,25 м товщина покриття становить 72,94 нм, тоді як при відстані 0,1 м вона збільшується до 81,138 нм. Це можна пояснити значним збідненням електроліту на відстані 0,25 м порівняно з іншими значеннями відстані між електродами.

З подальшим зростанням віддалі між електродами для електроліту такої концентрації покриття формується з більшою товщиною.

Результати експериментальних досліджень зміни товщини від віддалі між електродами представлена на рисунку 3.9.

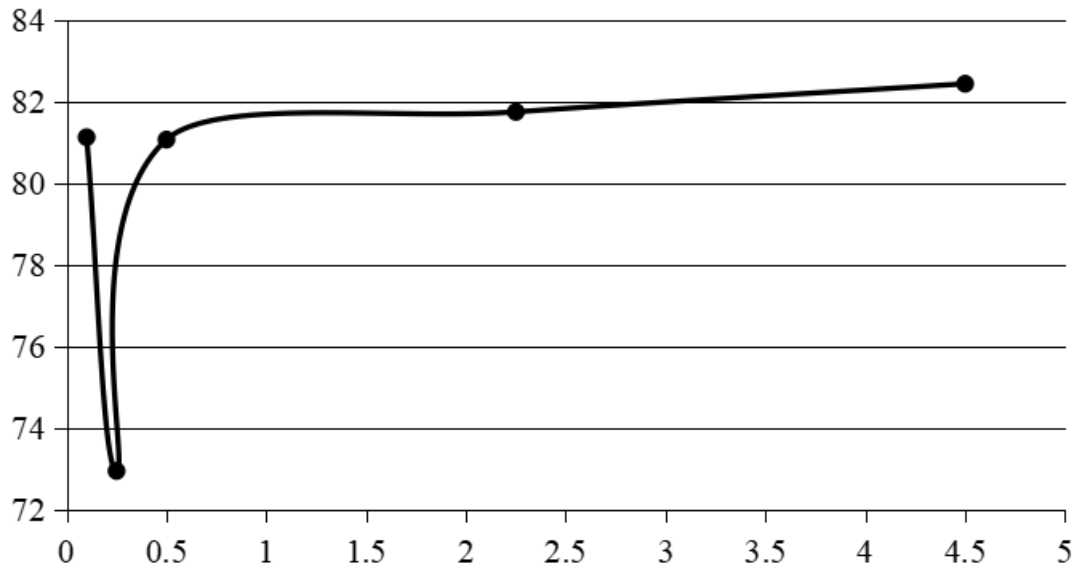


Рисунок 3.8 – Вплив віддалі між електродами на товщину покриття в електроліті 5 г/л КОН + 6 г/л рідкого скла

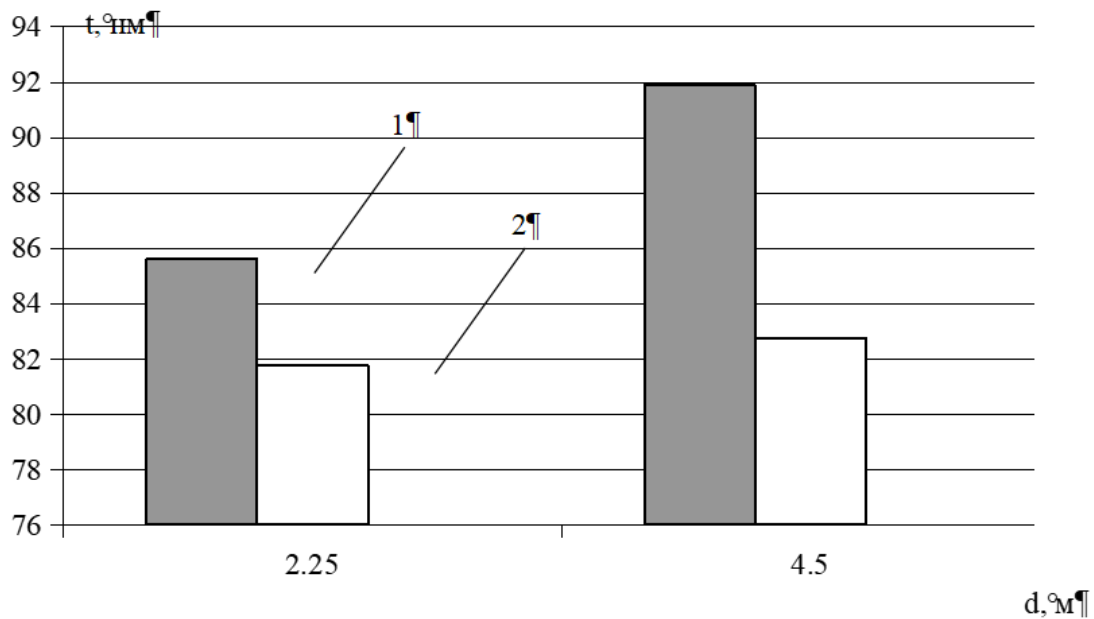


Рисунок 3.9 – Вплив концентрації електроліту на товщину покриття за відстані 2,25 м та 4,5 м:

1 – в електроліті 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла;

2 – 5 г/л КОН + 6 г/л р.с.

На відстані між електродами 2,25 м товщина покритву в електроліті складу 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла становить 85,605 мкм, тоді як при використанні електроліту 5 г/л КОН + 6 г/л рідкого скла вона дещо зменшується і дорівнює 81,75 мкм (рисунок 3.10).

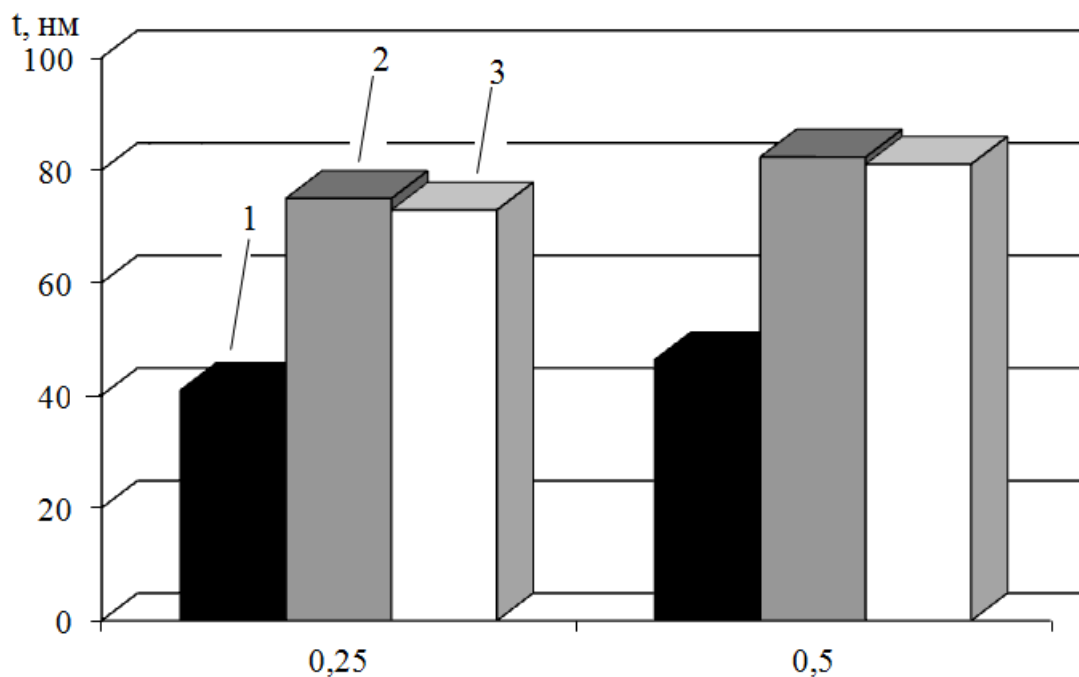


Рисунок 3.10 – Вплив концентрації електроліту на товщину покритву за віддалі 0,25 м та 0,5 м:

1 – електроліт 1 г/л КОН;

2 – 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла;

3 – 5 г/л КОН + 6 г/л рідкого скла

Для відстані між електродами 0,5 м товщина покритву в електроліті 1 г/л КОН становить 46,324 мкм. При застосуванні електроліту 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла товщина покритву збільшується на 36,02 мкм і досягає 82,34519 мкм. Подальше підвищення концентрації електроліту до 5 г/л КОН + 6 г/л рідкого скла приводить до формування покритву товщиною 81,079 мкм при тій самій відстані між електродами.

Під час формування анодно-іскрового покритву на алюмінієвому сплаві в електролітах 1 г/л КОН, 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла та 5 г/л КОН + 6 г/л рідкого скла встановлено, що на критичній відстані між електродами – 0,25 м – спостерігається найменша товщина оксидно-керамічного покритву. Це пояснюється збідненням електроліту в даній зоні.

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

РОЗДІЛ 4

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

4.1. Особливості роботи з високовольтним обладнанням

Під час газотермічного та електродугового нанесення покриттів необхідно дотримуватися встановлених вимог охорони праці та виробничої безпеки.

До виконання робіт із нанесення покриттів газотермічним і електродуговим способами допускаються чоловіки віком від 18 років, які пройшли медичний огляд, відповідне навчання, інструктаж з охорони праці, перевірку знань та отримали практичні навички з обслуговування обладнання. Допуск металізатора до роботи оформлюється наказом по підприємству після проходження вступного інструктажу та видачі посвідчення про перевірку знань з охорони праці. Повторний інструктаж і перевірка знань з охорони праці та виробничої санітарії проводяться не рідше одного разу на квартал із відповідною відміткою в журналі та особистій картці працівника.

Щороку проводиться перевірка знань спеціально створеною комісією під керівництвом відповідальної особи, призначеної роботодавцем. Результати перевірки оформлюються протоколом, номер якого вноситься до посвідчення працівника та засвідчується печаткою організації. Працівники також зобов'язані проходити періодичні медичні огляди та дотримуватися встановленого режиму праці й відпочинку.

Під час процесу напилення на працівника можуть впливати небезпечні та шкідливі виробничі фактори, зокрема підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони, високочастотний шум, ультразвук, надмірна яскравість світла, підвищена температура поверхонь виробів та обладнання, а також нервово-психічні перевантаження.

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для забезпечення безпеки при підготовці поверхні основного металу необхідно застосовувати механізацію та автоматизацію процесів, герметизацію обладнання, вентиляційні системи й місцеві відсмоктувачі, пиловловлювальні установки та блокувальні пристрої. У дробоструменних камерах має бути передбачене блокування пускових пристроїв із завантажувальними механізмами. Використання сухого кварцового піску для очищення деталей не допускається. Камери очищення повинні бути герметичними та обладнаними системами дистанційного керування, а їх запуск має бути заблокований із системою вентиляції. Стиснене повітря перед подачею в очисні камери необхідно пропускати через вологомасловідділювач.

Операції із засипання та прибирання порошків у бункери установок для напилення повинні проводитися із застосуванням місцевої витяжної вентиляції або в спеціальних камерах і кабінах. Під час ручного нанесення покриттів необхідно використовувати портативні місцеві відсмоктувачі, які забезпечують допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони.

При газотермічному нанесенні покриттів необхідно забезпечити інжекцію в газових каналах пальника не менше 0,012 МПа. Усі вузли та деталі систем подачі горючих газів повинні бути герметичними. У місцях споживання кисню та горючих газів необхідно встановлювати газорозбірні пости із запобіжними затворами, що унеможливають поширення зворотного удару в газові магістралі. У разі використання окремих балонів між редукторами та металізатором встановлюються запобіжні пристрої. Конструкція пальника повинна забезпечувати безпечне займання горючої суміші без виникнення зворотного удару.

Під час електродугового нанесення покриттів напруга холостого ходу джерела живлення постійного струму не повинна перевищувати 80 В при ручному процесі та 90 В – при автоматизованому чи механізованому.

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розпилювальні головки електродугових апаратів мають забезпечувати стабільне горіння дуги, а електрометалізатори — бути оснащені захисними пристроями від дії електричної дуги. Переріз струмопровідних проводів повинен забезпечувати безпечну тривалу роботу без нагрівання понад 50 °С. Кріплення рукавів до повітропроводів і штуцерів апарата має бути надійним та виключати можливість зриву.

Ручне нанесення покриттів повинно проводитися у звукоізованих кабінах або на спеціально обладнаних ділянках із використанням шумопоглинальних кожухів. Перебування сторонніх осіб у зоні роботи обладнання під час його експлуатації чи налагодження забороняється, що має бути позначено відповідними знаками безпеки згідно з ГОСТ 12.4.026.

Працівники, які виконують роботи з напилення, повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту. Захисні засоби мають знаходитися безпосередньо на робочому місці металізатора. У разі перевищення допустимого рівня шуму працівники повинні користуватися протишумовими навушниками. При виконанні робіт у закритих ємностях або при розпиленні матеріалів, що виділяють токсичні пари й пил, необхідно застосовувати шоломи-маски з примусовою подачею повітря. Для захисту очей від полум'я та бризок розплавленого металу слід використовувати захисні окуляри зі світлофільтрами.

Спецодяг металізатора має бути зручним, не обмежувати рухів, захищати від іскор, бризок розплавленого металу та виробничих забруднень. Увесь спецодяг підлягає регулярному пранню. Для захисту рук працівники повинні бути забезпечені рукавицями, при цьому використання спецодягу та рукавиць із синтетичних матеріалів забороняється.

Металізатор також повинен знати план ліквідації аварійних ситуацій, інструкцію з експлуатації обладнання, правила пожежної безпеки, користування засобами індивідуального захисту, надання першої медичної допомоги та правила особистої гігієни. Персонал має володіти навичками

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

надання допомоги при отруєннях, опіках, ураженні електричним струмом та інших нещасних випадках.

У місцях проведення робіт повинні знаходитися засоби першої медичної допомоги: стерильний перев'язувальний матеріал, джгути, бинти, лейкопластир, настоянка йоду, нашатирний спирт, засоби для промивання та мазі від опіків. Працівники несуть відповідальність за порушення вимог цієї інструкції відповідно до чинного законодавства України.

4.2. Правила підготовки до початку роботи на виробництві

Перед початком роботи на виробництві, пов'язаному з високотемпературними технологіями, необхідно виконати низку підготовчих заходів. Працівник повинен оглянути, привести в належний стан і одягнути спецодяг та спецвзуття, а також перевірити справність і комплектність засобів індивідуального захисту. Необхідно оглянути робоче місце, прибрати сторонні предмети, що можуть перешкоджати роботі, та забезпечити вільний доступ до проходів.

Перед початком виконання робіт слід підготувати мильний розчин для перевірки герметичності з'єднань обладнання. Також необхідно перевірити наявність і справність апаратури для наплення, рукавів, джерел живлення, інструментів, пристроїв, манометрів та редукторів. Особливу увагу потрібно приділити герметичності всіх роз'ємних і паяних з'єднань, а також наявності підсосу в апаратурі. Повітря або газ, що використовується для транспортування розпилюваного матеріалу, повинні бути очищені від оливи та вологи. Перед початком роботи перевіряють також справність вентиляції, освітлення та первинних засобів пожежогасіння.

Під час виконання робіт з електродугового наплення металів необхідно дотримуватися вимог безпеки та використовувати спецодяг і засоби індивідуального захисту. Перед приєднанням редуктора до вентиля

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

балона слід перевірити наявність пломб або інших позначень на запобіжному клапані, справність манометра та термін його перевірки, стан різьблення штуцерів, наявність прокладок у вентилях і фільтрів у вхідних штуцерах.

Рукави повинні бути надійно закріплені на ніпелях металізаторів за допомогою спеціальних хомутів. Для газових металізаторів необхідно попередньо відрегулювати швидкість подачі порошку або дроту, після чого запалити чергове полум'я та встановити необхідний режим подачі матеріалу. Напилення виконують рівномірним переміщенням металізатора, при цьому відстань від розпилювального сопла до поверхні основного металу повинна становити 150 ... 180 мм.

Під час роботи з електрометалізаторами необхідно спочатку відкрити повітряний кран і правильно укласти дріт на котушку, забезпечивши його безперервне розмотування. Дріт повинен бути чистим, без оксидів і сторонніх плівок. Після заряджання апарата дротом, при відключеній напрузі, виконують налаштування та регулювання розпилювальної головки. Після цього вмикають подачу дроту. Його кінець має розташовуватися по центру повітряного сопла на відстані 2 ... 3 см від зовнішнього торця. Для досягнення оптимальних результатів напилення рекомендується працювати при максимальному тиску стисненого повітря в межах 0,5 ... 0,6 МПа.

Під час нанесення покриттів необхідно уникати нагрівання поверхні, що металізується, понад 70 °С. Експлуатація газотермічних металізаторів забороняється у випадках недостатньої інжекції в газових каналах, порушення герметичності вузлів і деталей або використання неочищеного від вологи й оливи повітря чи газу.

Експлуатація електродугових металізаторів не допускається без захисного екрану на повітряному ковпаку, при несправному обладнанні або без використання засобів індивідуального захисту. Забороняється проводити налаштування й регулювання розпилювальної головки під напругою, а також

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

виконувати ремонт металізаторів та іншого обладнання безпосередньо на робочому місці.

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Сплав Д16 з оксидокерамічним покриттям, нанесеним методом плазмоелектролітного оксидування за своїми властивостями повністю відповідає поставленим вимогам. Незважаючи на те, що матеріал не характеризується надзвичайно високою твердістю, він має достатню міцність, необхідну для надійної роботи деталей, виготовлених із нього.

Для підвищення корозійної стійкості, що є важливим фактором для багатьох вузлів і механізмів, застосовують плакування та анодування. Серед цих методів анодування має суттєві переваги, оскільки сформований покрив характеризується високою адгезією до основи та підвищеною корозійною стійкістю.

Анодування широко використовується для захисту деталей з алюмінієвих сплавів. Суть методу полягає у штучному потовщенні природної оксидної плівки електролітичним способом.

Результати проведених досліджень показали, що максимальні значення товщини та мікротвердості оксидно-керамічного покриття досягаються за умов використання електроліту складу 3 г/л КОН + 2 г/л рідкого скла при співвідношенні струмів 10/15 А/дм².

Таким чином, після проведення плазмоелектролітного оксидування та формування оксидно-керамічних покриттів отримують сплав із поверхнею, характеристики якої відповідають технічним вимогам.

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Никифорчин Г.М., Клапків М.Д., Повстяна Н.Ю., Посувайло В.М. Корозійна стійкість цирконієвих сплавів і їх конверсійних оксидокерамічних покривів // Наукові нотатки. – 2005. № 9. – С. 78–82.
2. Богуслаев В.А., Качалина Н.Е., Мозговой В.Ф., Калинин В.Т. Авиационно-космические материалы и технологии. – Запорожье, изд. ОАО “Мотор Сич”, 2007г. – 383 с.
3. М. Д. Клапків. Стан електролітної плазми в умовах синтезу оксидів на алюмінієвій основі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1995. - №4. С. 85 – 89.
4. Н. М. Nykyforchyn, W. Dietzel, M. D. Klapkiv. Synthesis of oxideceramic coating on magnesium alloys and their corrosion properties / Hight Temp. Material Prosess. 7, 2003. - P. 214 – 246.
5. Dietzel W., Klapkiv M., Nykyforchyn H., Posuvailo V., Blawert C. Porosity and corrosion properties of electrolyte plasma coatings on magnesium alloys//Physicochemical Mechanics of Materials. – 2004. – t.40, №5. – P. 13-17.
6. Никифорчин Г. М., Повстяна Н. Ю. *, Клапків М. Д., Посувайло В. М. Корозійна тривкість цирконієвих та титанових сплавів і їх конверсійних оксидокерамічних покривів // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛДТУ, 2004. – Випуск 15. – С.227 – 232.
7. Клапків М. Д., Посувайло В. М., Бассараб А., Повстяна Н. Ю. Підвищення ресурсу деталей машин шляхом нанесення оксидокерамічних покриттів в електролітній плазмі//Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних засобів і поїздів. – 2004. – №8. – с. 58 – 64.
8. Ayad S, Boot-Handford R, Humphries MJ, Kadler KE, Shutleworth A. The extracellular matrix facts book. San Diego: Academic Press; 1994.
9. Tjong SC, Chen H. Mater Sci Eng R 2004;45:1–88.

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

10. Catledge S, Baker P, Arvin J, Vohra Y. Diam Relat Mater 2000;9(8):1512–7.
11. Rakoch A.G., Gladkova A.A., Linn Z., Strekalina D.M. The evidence of cathodic micro-discharges during plasma electrolytic oxidation of light metallic alloys and micro-discharge intensity depending on pH of the electrolyte // Surface and Coatings Technology. – 2015. – Vol. 269. – P. 138-144.
12. Hussein R.O., Nie X., Northwood D.O. An investigation of ceramic coating growth mechanisms in plasma electrolytic oxidation (PEO) processing // Electrochimica Acta. – 2013. – Vol. 112. – P. 111-119.
13. Гуляєв А.П. Металознавство. Підручник для вузів. – К.: Металургія, 2016. – 544 с.
14. Clyne T.W., Troughton S.C. A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals // International Materials Reviews. – 2019. – Vol. 64, № 3. – P. 127-162.

					БР 2626.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51