

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Хіміко-технологічний факультет
Кафедра технології електрохімічних виробництв**

«На правах рукопису»
УДК 97.113

До захисту допущено:
В.о. завідувача кафедри
_____Олексій КОСОГІН

«_____» грудня_2024_р._

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньою програмою «Хімічні технології неорганічних, електродних
матеріалів та водоочищення»
зі спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія»
на тему: «Вплив імпульсного режиму струму на характер та
властивості твердих анодних плівок на поверхні алюмінію»**

Виконав: студент II курсу, групи ХЕ-31мп
Візир Владислав Олександрович
Керівник:
Бик Михайло Володимирович, к.х.н., доц.

Рецензент:

ст. викл. кафедри ТНР,В та ЗХТ, к.т.н.

Крimeць Григорій Володимирович

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент

Київ – 2024 рік

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Хіміко-технологічний факультет
Кафедра технології електрохімічних виробництв

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньою програмою.
Спеціальність – 161 Хімічні технології та інженерія
Освітня програма «Хімічні технології неорганічних, електродних матеріалів та водоочищення»

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.О. завідувача кафедри
_____Олексій КОСОГІН
«_____» _____ грудня _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту
Візиру Владиславу Олександровичу

1. Тема проєкту «Вплив імпульсного режиму струму на характер та властивості твердих анодних плівок на поверхні алюмінію», керівник проєкту Бик Михайло Володимирович, к.х.н., доцент, затверджені наказом по університету від 08. 11. 2024р. №_5022-с
2. Термін подання студентом дисертації 09.12.2024р. _____
3. Об'єкт дослідження: тверда анодна оксидна плівка на поверхні алюмінію.
4. Вихідні дані: матеріали з практики, зарубіжні та вітчизняні монографії та періодичні видання.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - пошук та аналіз існуючих методів одержання твердих анодних оксидних плівок на поверхні алюмінію .
 - дослідження анодної плівки одержаної на поверхні алюмінію марки АД-31 у сульфатному електроліті;
 - дослідження впливу імпульсного режиму струму, частоти та тривалості імпульсу, тривалості електролізу на характер і товщину одержаної анодної плівки.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація магістерської дисертації.

7. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап проекту	Бик Михайло Володимирович, доцент, к.х.н		

8. Дата видачі завдання 2 вересня 2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1.	Пошук літератури, ознайомлення з основними поняттями	02.09.2024 – 08.09.2024	Виконано
2.	Виконання науково-дослідної частини	11.09.2024 – 20.09.2024	Виконано
3.	Оформлення експериментальних даних	21.09.2024 – 26.09.2024	Виконано
4.	Написання розділу технологічних розрахунків	27.09.2024 – 12.10.2024	Виконано
5.	Написання розділу стартап - проекту	13.10.2024 – 03.10.2024	Виконано
6.	Компонування магістерської дисертації	04.10.2024 – 03.12.2024	Виконано
7.	Оформлення пояснювальної записки	03.12.2024 – 04.12.2024	Виконано

Студент

Владислав ВІЗИР

Керівник

Михайло БИК

РЕФЕРАТ

«Вплив імпульсного режиму струму на характер та властивості твердих анодних плівок на поверхні алюмінію»

Візир В.О. – Київ: «КПІ імені Ігоря Сікорського», ХТФ, ХЕ-31мп.

Магістерська дисертація, 2024 рік. Кількість сторінок - 92, таблиць - 17, рисунків - 18, джерел - 16.

У магістерській дисертації було здійснено пошук та огляд літературних джерел на тему твердого анодування алюмінію використовуючи імпульсний режим струму. Розглянуто методи отримання твердого анодованого покриття, здійснено їх порівняння, проаналізовано, який характер твердої оксидної плівки утворюються в залежності від умов електролізу. Досліджено стан сучасних методів використання імпульсного режиму струму. Проведено дослідження процесів твердого анодування марки АД-31. Знайдено режими анодування за яких утворюється максимально тверда та без пориста анодна плівка. Проведені дослідження для визначення властивостей анодної оксидної плівки. Обрано електроліт та умови для отримання зносостійких плівок на поверхні алюмінію.

Ключові слова: імпульсний струм, тверде анодування алюмінію, оксидна плівка, бар'єрний/безпористий шар.

ABSTRACT

"Influence of Pulsed Current Mode on the Nature and Properties of Hard Anodic Films on Aluminum Surfaces"

Vizyr V.O. – Kyiv: "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute," Faculty of Chemical Technology, Department of Electrochemical Engineering, HE-31mp. Master's Thesis, 2024. Number of pages – 92, tables – 17, figures – 18, sources – 16.

The master's thesis involves a review and analysis of literature on the topic of hard anodizing of aluminum using a pulsed current mode. Methods for obtaining hard anodized coatings are examined and compared, and the nature of the hard oxide film formed under various electrolysis conditions is analyzed. The current state of methods using pulsed current mode is investigated. The processes of hard anodizing for alloy AD-31 are studied, and the anodizing conditions for obtaining the hardest and pore-free anodic film are identified. Research is conducted to determine the properties of the anodic oxide film. The electrolyte and conditions for obtaining wear-resistant coatings on the aluminum surface are selected.

Keywords: pulsed current, hard anodizing of aluminum, oxide film, barrier/pore-free layer.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	10
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	22
2.1. Проведення анодування	24
2.2. Визначення властивостей анодної оксидної плівки	27
2.2.1. Визначення корозійної стійкості оксидної плівки.....	27
2.2.2 Визначення пористості оксидної плівки	28
2.2.3. Визначення товщини оксидної плівки.....	28
2.2.4 Визначення твердості анодної плівки методом Віккерса	28
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	31
3.1. Одержання амплітудних характеристик струму	31
3.2. Результати процесу твердого анодування	33
3.3. Результати визначення властивостей твердої анодної оксидної плівки.....	40
3.3.1. Результати визначення корозійної стійкості оксидної плівки	40
3.3.2. Результати визначення пористості оксидної плівки.....	42
3.3.3. Результати визначення товщини оксидної плівки.....	44
3.3.4. Вимірювання твердості анодної плівки	45
3.4. Приклад використання анодування в військовій промисловості і авіації.....	47
РОЗДІЛ 4. ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ	49
4.1. Визначення дійсного фонду часу роботи обладнання	50
4.2. Визначення виробничої програми обладнання	51
4.3. Вибір виду обладнання для нанесення гальванічного покриття, розрахунок його кількості та габаритних розмірів	51
4.4. Розрахунок конструктивних розмірів ванни і коефіцієнту завантаження обладнання.....	53
4.5. Баланс струму на гальванічній ванні.....	54
4.6. Складання балансу напруги для гальванічної ванни	56
4.7. Вибір джерела струму для гальванічної ванни	60
4.8. Визначення джоулевої теплоти та складання балансу енергії на ванні.....	60
4.9. Розрахунок витрат матеріалів.....	62
4.10. Розрахунок витрат нерозчинних катодів.....	63
4.10.1. Витрати хімічних реактивів.....	64
РОЗДІЛ 5 СТАРТАП-ПРОЄКТ.....	67
5.1. Резюме об'єкту досліджень	67
5.2. Аналіз зовнішнього та внутрішнього середовища стартапу	68
5.3. Визначення потенційних споживачів та карта бізнес процесів	77
5.4. Фінансові складові проекту	78

ВИСНОВКИ.....	88
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	90

ВСТУП

Алюміній і його сплави є одними з найпоширеніших конструкційних матеріалів завдяки їхній малій густині, високій міцності та корозійній стійкості. Для підвищення експлуатаційних властивостей алюмінію, таких як твердість, зносостійкість та корозійна стійкість, широко застосовуються методи анодування. Серед них особливої уваги заслуговує процес твердого анодування, який дозволяє створювати міцні оксидні покриття, що суттєво розширюють сфери застосування алюмінієвих виробів.

Традиційне анодування алюмінію, що застосовує постійний струм, має обмеження у створенні однорідних та безпористих плівок, здатних витримувати високі механічні навантаження. Натомість використання імпульсного режиму струму стало новим напрямком у технології анодування, що відкриває можливості для керування мікроструктурою та фізико-механічними властивостями утворених плівок. Завдяки змінному характеру струму забезпечується інтенсивніше протікання електрохімічних процесів, які дозволяють отримувати плівки з більш високою твердістю, безпористістю та зносостійкістю.

Актуальність теми полягає в необхідності дослідження процесів, що впливають на формування твердих анодних плівок при використанні імпульсного режиму струму, та оптимізації технологічних параметрів для отримання найбільш якісних покриттів. Глибоке розуміння залежності між режимом струму та характеристиками оксидної плівки сприятиме створенню нових способів удосконалення поверхонь алюмінію для застосування в промисловості, авіації, електроніці та інших сферах.

Мета дослідження: дослідження впливу імпульсного режиму струму на процеси формування анодної плівки на поверхні алюмінію, вивчення властивостей

утворених покриттів та визначення оптимальних параметрів анодування для досягнення максимальних експлуатаційних характеристик.

Завданнями дослідження є:

- аналіз наукової літератури щодо процесів анодування алюмінію за імпульсного режиму струму;
- експериментальне дослідження впливу параметрів імпульсного струму на характеристики анодних плівок;
- порівняння властивостей покриттів одержаних за різних режимів електролізу;
- визначення умов для отримання твердих, безпористих та зносостійких оксидних плівок.

Очікувані результати можуть знайти застосування в галузях, де важливі довговічність та надійність матеріалів, що мають підвищену зносостійкість.

Об'єкт дослідження – тверді анодні оксидні плівки з використанням імпульсного режиму струму утворені в результаті електролізу.

Предмет дослідження – процеси формування твердих анодних оксидних плівок на поверхні алюмінію за умов імпульсного режиму струму, а також їх фізико-механічні та структурні властивості залежно від параметрів електролізу.

Методи досліджень – рентгенофлуорисцентний аналіз складу матеріалу, електронномікроскопічні дослідження, корозійні дослідження, визначення твердості.

Наукова новизна. Новизна роботи полягає в отриманні нових даних щодо процесів анодного окислення алюмінієвих сплавів із використанням імпульсного режиму струму. Встановити вплив імпульсних параметрів на формування пористої оксидної плівки із високою твердістю, що поєднує механічну та корозійну стійкість.

Зокрема, досліджено умови, за яких анодна плівка може утворюватися без пористого шару (бар'єрного типу) або із контрольованою пористістю. Це відкриває можливості для подальшого електрохімічного модифікування плівки (наприклад, для забарвлення або додаткового зміцнення) як єдиного технологічного процесу.

Отримані результати дозволяють оптимізувати процес формування плівок із покращеними експлуатаційними властивостями, включно зі здатністю поглинати світло, що є актуальним для застосування у спеціалізованих галузях, таких як оптика, авіабудування та виробництво енергоефективних матеріалів.

Практичне значення отриманих результатів: запропоновано технологічний процес анодування алюмінієвих сплавів у режимі імпульсного струму, що забезпечує формування високоякісних твердих анодних плівок із покращеними механічними та корозійними властивостями.

Результати досліджень можуть бути використані для оптимізації виробництва деталей з алюмінію, зокрема для галузей, де потрібна підвищена зносостійкість і довговічність покриттів. Запропонований процес може знайти застосування у виробництві елементів військової техніки, авіабудування, космічних технологій та оптичних систем. Використання даного підходу дозволить суттєво подовжити термін експлуатації виробів, забезпечуючи їхню надійність у складних умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1. Методи отримання оксидної плівки

Оксидування – це процес отримання на алюмінії оксидних плівок внаслідок електрохімічної або хімічної обробки [1]. Алюміній і його сплави є популярними матеріалами в багатьох галузях через їхні унікальні властивості, такі як мала густина, висока міцність, чудова електропровідність і стійкість до корозії. Однак для збільшення корозійної стійкості та забезпечення тривалого терміну експлуатації цих матеріалів застосовують спеціальні методи обробки поверхні, серед яких основними є хімічне оксидування та електрохімічне анодування. Ці методи спрямовані на формування оксидної плівки, яка відіграє роль бар'єра між металом і зовнішнім середовищем. Кожен із цих методів має свої переваги та недоліки, що визначають їх доцільність для різних застосувань.

Хімічне оксидування

Основним принципом хімічного оксидування є використання спеціальних хімічних розчинів для утворення оксидного шару на поверхні металу. Хімічне оксидування вважається економічно вигідним і простим у реалізації методом. Воно дозволяє обробляти внутрішні поверхні труб, складнопрофільні конструкції та великогабаритні вироби, що робить цей метод зручним для застосування в промисловості. Також такі плівки часто використовують в електротехніці, так як утворена плівка має токопровідність на відміну від плівок які утворюються під час електрохімічного анодування.

Однак цей метод має свої обмеження. Захисний шар, утворений хімічним оксидуванням, зазвичай дуже тонкий (0,5–5 мкм) і не забезпечує достатньої корозійної стійкості, особливо в агресивних середовищах. Через це такі плівки не придатні для експлуатації в умовах високої вологості або контакту з хімічно

активними речовинами. Натомість ці плівки демонструють високу адгезію до лакофарбових матеріалів і часто використовуються як основа для емалей і фарб [1].

Хімічні методи включають обробку алюмінію у слаболужних розчинах хроматів, розчинах, що містять фосфатну кислоту, а також у розчинах із домішками сполук фтору. Наприклад:

1. Карбонатно-хроматне оксидування утворює плівки товщиною 1–3 мкм.

- Na_2CO_3 40-60 г/л
- Na_2CrO_4 10-20 г/л
- NaOH 2-3 г/л

$\tau = 3-10$ хв; $t = 80-100$ °С.

2. Оксидно-фосфатні плівки, отримані в кислотних розчинах, демонструють кращу механічну стійкість і електроізоляційні властивості, досягаючи товщини 3–4 мкм. Використовуються як ґрунт перед нанесенням лакофарбних покриттів [1].

Типовий склад електроліту:

- H_3PO_4 40-60 г/л
- CrO_3 5-10 г/л
- HF 3-5 г/л

$\tau = 5-20$ хв; $t = 20-25$ °С.

3. Фторидно-хроматні розчини забезпечують отримання щільних і тонких плівок із низьким електричним опором, які використовуються для захисту від корозії деталей, що не потребують електроізоляції.

Типовий склад електроліту:

- CrO_3 3-4 г/л
- NH_4HF 3-5 г/л
- $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 0,5-3 г/л

$\tau = 5-25$ хв; $t = 15-25$ °C.

4. Слаболужні розчини плівки мають товщину 2-3 мкм, невелику міцність, руйнуються під дією гарячої води.

Типовий склад електроліту:

- CrO_3 3-4 г/л
- Na_2SiF_6 3-5 г/л

$\tau = 5-20$ хв; $t = 20-25$ °C.

Хімічне оксидування є доступним методом, але його обмеження щодо товщини плівки і механічної стійкості значно звужують сфери застосування цього методу в умовах агресивного середовища.

Електрохімічне анодування

Електрохімічне анодування є більш складним, але ефективним методом отримання оксидних плівок на поверхні алюмінію. Процес анодування відбувається при електролізі на аноді в кисневмісному електроліті. Це дозволяє формувати штучний оксидний шар із контрольованою товщиною і структурою. Анодування забезпечує такі переваги, як:

- Підвищена твердість.
- Зносостійкість.
- Термостійкість.
- Електроізоляційні властивості.

Природні оксидні плівки, що утворюються на алюмінії внаслідок контакту з повітрям, мають товщину кілька нанометрів і легко пошкоджуються. Анодування вирішує цю проблему, дозволяючи отримати плівки товщиною до 300 мкм, залежно від обраних параметрів процесу [1]. Основними недоліками методу є потреба в джерелах живлення, спеціальному обладнанні, кваліфікованих робітниках, контролі технологічного режиму, що несе вищі витрати на обробку.

У даній роботі обрано метод електрохімічного анодування з використанням імпульсного режиму струму, оскільки він дозволяє отримати оксидні покриття з покращеними властивостями, які забезпечують довговічність і високу ефективність у промислових умовах.

1.2. Класифікація анодних плівок в залежності від їх подальшого використання:

- тонкі бар'єрні плівки товщиною 0,1...1 мкм. Використовуються для виготовлення електроізоляційних матеріалів(покриттів);
- анодні плівки середньої товщини 1...50мкм. Використовуються для захисту виробів від корозії та для їх декоративної обробки;
- товсті анодні плівки 50...300 мкм. Застосовуються для захисту поверхні від зносу та стирання, для теплоізоляції, електроізоляції виробів.[2]

Бар'єрні плівки формуються в нейтральних електролітах, таких як боратні, фосфатні або тартратні розчини, у яких оксид алюмінію важко розчинний. Ці плівки мають високу щільність і товщину до сотень нанометрів. Їхня структура забезпечує низький рівень електропровідності, що робить їх ідеальними для електроізоляційних застосувань. Використовуються у виробництві електролітичних конденсаторів.

Основними характеристиками бар'єрних плівок є:

- Однорідність і щільність.
- Висока адгезія до алюмінію.
- Низька пористість.

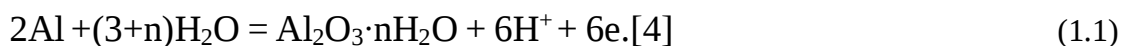
Формування бар'єрних плівок зазвичай відбувається за низької густини струму (0,01–1 А/дм²), що сприяє повільному зростанню шару [3].

Анодні плівки середньої товщини та високої товщини утворюються в кислих електролітах, таких як сульфатна, щавлева або фосфорна кислоти. Основними особливостями цих плівок є:

- Наявність пор, які дозволяють модифікувати плівку (фарбування, ущільнення).
- Висока товщина (до 300 мкм).
- Механічна міцність і хімічна стійкість.

1.3. Механізм формування анодних плівок на алюмінії

Алюміній належить до групи металів, що швидко утворюють пасивний шар на своїй поверхні. У процесі анодування алюмінію в більшості кислотних або нейтральних електролітів на поверхні металу формується тонкий і щільний шар гідроксидів алюмінію з нестехіометричним складом, що зазвичай описується формулою $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$:



Кисень у формі іонів проникає через оксидну плівку, викликаючи подальше окислення металу [4]. Зі збільшенням товщини плівки проникнення кисневих іонів через пори стає складнішим, що вимагає додаткової енергії для подолання опору. Цю енергію забезпечують шляхом підвищення напруги у ванні. Утворений щільний

шар плівки, товщиною приблизно 0,1 мкм, відомий як бар'єрний шар. Якщо напругу у ванні не збільшувати, ріст плівки припиняється.

Подальший розвиток процесу оксидування значною мірою визначається здатністю електроліту розчиняти оксид алюмінію (Al_2O_3). Хімічне розчинення плівки Al_2O_3 за реакцією:



Збільшення товщини оксидної плівки можливе за умови, що швидкість її формування перевищує швидкість розчинення. На початкових етапах анодування швидкість окислення металу є вищою за швидкість розчинення плівки, але з часом її зовнішній шар, що контактує з електролітом, стає більш пористим і пухким. Це збільшує площу взаємодії плівки з електролітом і, відповідно, прискорює процес її розчинення. У певний момент швидкість утворення та розчинення оксидного шару зрівнюються, і подальший ріст плівки припиняється.

Чим вища розчинювальна здатність електроліту, тим тоншою буде отримана оксидна плівка. Ця здатність визначається такими факторами, як природа кислоти, її концентрація, температура розчину та інші умови процесу. Регулюючи ці параметри, можна керувати товщиною плівки та її пористістю. Наприклад, у сірчанокислому розчині (H_2SO_4) при температурі нижче 0 °C можна отримати оксидні плівки товщиною 100–300 мкм, тоді як при 18–25 °C утворюються плівки товщиною близько 20 мкм. Водночас товщина бар'єрного шару залишається незмінною.

Товщина оксидних плівок значною мірою залежить від хімічного складу та структури алюмінієвих сплавів. Основні закономірності цього процесу можна сформулювати так: чистий алюміній анодується легше та ефективніше порівняно зі сплавами; збільшення кількості легуючих елементів у сплаві ускладнює

формування товстих плівок; сплави з високим вмістом кремнію не придатні для декоративного анодування, оскільки кремній не анодується і залишається в плівці у вигляді сірого або чорного порошку. Елементи, такі як магній (Mg), залізо (Fe), марганець (Mn) та мідь (Cu), у сплавах зазвичай присутні у вигляді інтерметалевих сполук, які розчиняються швидше, ніж алюміній. Це призводить до утворення шорстких і неоднорідних оксидних покриттів на таких сплавах.

Властивості оксидних плівок визначаються їх товщиною, пористістю та вмістом домішок. Наприклад, твердість і зносостійкість плівок зростають із зменшенням їх пористості. Наявність домішок у плівці негативно впливає на її твердість, роблячи покриття менш стійким до механічного впливу. Водночас пористі плівки мають вищу адсорбційну здатність і добре піддаються забарвленню.

Діелектричні властивості оксидних плівок залежать від їх товщини та методу формування. Товстіші плівки зазвичай мають кращі електроізоляційні властивості, але їх формування вимагає ретельного контролю процесу анодування.

Властивості оксидних плівок значною мірою залежать від складу електролітів, що використовуються під час анодування. Серед основних середовищ виділяють [5]:

1.4. Водні електроліти

1. Сульфатний електроліт:

- Найпоширеніший через низьку вартість і ефективність.
- Формує прозорі пористі плівки з мінімальним діаметром пор (≤ 100 нм).
- Недоліки: крихкість плівок, потреба в заповненні пор [5].

Типовий склад електроліту та режим електролізу:

- H_2SO_4 200-250 г/л

$$i_a = 0,5-5 \text{ А/дм}^2; \tau = 30-60 \text{ хв}; t = 5-23 \text{ }^\circ\text{C}; U = 15-30 \text{ В.}$$

2. Хроматний електроліт:

Забезпечує еластичність і високу корозійну стійкість, майже не зменшує товщину виробу за рахунок меншого переходу алюмінію в оксид.

Обмеження: висока температура, велика напруга 20-50В, токсичність Cr^{6+} , мала товщина пліок, висока вартість.[5].

Типовий склад електроліту та режим електролізу:

- CrO_3 30-90 г/л

$$i_a = 0,5-3 \text{ А/дм}^2; \tau = 30-60 \text{ хв}; t = 20-40 \text{ }^\circ\text{C}; U = 20-50 \text{ В.}$$

3. Оксалатний електроліт:

- Використовується для утворення електроізоляційних плівок.

- Дозволяє формувати плівки великої товщини з меншим охолодженням в межах $20-30^\circ\text{C}$, але менш тверді ніж у сульфатному.

- Дає можливість використання як постійного так і змінного струму, а також їх накладення.

Типовий склад електроліту та режим електролізу:

- $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 40...60 г/л

$$i_a = 2,5-3,5 \text{ А/дм}^2; \tau = 30-60 \text{ хв}; t = 15-30 \text{ }^\circ\text{C}; U = 20-80 \text{ В.}$$

1.5. Неводні електроліти:

Розплави солей і газоподібна плазма використовуються для анодування алюмінію та його сплавів завдяки їх здатності формувати тверді оксидні плівки з унікальними характеристиками. Наприклад:

1. Розплави солей:

- У цих середовищах оксидні плівки формуються за високих температур (понад 300°C), що сприяє створенню дуже щільних і твердих шарів.
- Кампанелла та Конте вивчили використання лужних нітратів, які забезпечують високу корозійну стійкість та відсутність пористої структури.
- Недоліками методу є висока енергозатратність, корозія обладнання та складність у контролі процесу.

2. Анодування в газоподібній плазмі:

- Цей підхід широко застосовується для створення діелектричних покриттів у мікроелектроніці.
- Плазмові методи дозволяють утворювати надтонкі плівки, але вимагають складного обладнання та суворого контролю параметрів.

1.6. Плазмо-електролітичне анодування

Плазмо-електролітичне оксидування (ПЕО), також відоме як мікродугове оксидування, є інноваційним методом анодування, що дозволяє створювати товсті, пористі плівки з винятковими механічними властивостями [6]. ПЕО-покриття мають високу твердість, адгезію до основи і термічну стійкість. У цьому методі анодна обробка проводиться за високої напруги, що призводить до утворення плазмових розрядів на поверхні металу [6].

Основні переваги ПЕО:

- Формування плівок із товщиною до 200 мкм.
- Висока механічна міцність і зносостійкість.
- Екологічна безпечність порівняно з іншими методами.

Однак ПЕО має свої обмеження:

- Висока вартість обладнання.
- Потреба в ретельній оптимізації процесу.

ПЕО є перспективним методом для застосувань, де потрібні покриття з високими експлуатаційними характеристиками.

1.7. Імпульсне анодування

Останні дослідження приділяють велику увагу імпульсному анодуванню як інноваційному підходу до формування оксидних плівок. Цей метод полягає в чергуванні високих і низьких напруг або пауз у процесі анодування, що забезпечує низку переваг:

- Зниження перегріву електроліту.
- Підвищення якості плівок за рахунок кращого контролю розчинення оксиду.

- Можливість уникнення утворення тріщин і дефектів.

Імпульсне анодування дозволяє досягти вищої швидкості росту плівки та поліпшення її фізико-механічних властивостей. Такахаші та інші встановили, що цей метод покращує кінетику анодування завдяки ефекту відновлення плівки під час пауз [7].

Недоліки імпульсного анодування включають необхідність у більш складному обладнанні, але його перспективи значні для промислових застосувань.

Порівняння методів анодування:

У таблиці 1 наведено основні характеристики методів анодування алюмінію.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика методів анодування алюмінію

Метод	Товщина плівки (мкм)	Міцність	Вартість	Екологічна безпе́чність
Хімічне оксидування	0,5–4	Низька	Низька	Середня
Електрохімічне	5–200	Висока	Середня	Висока
Плазмо- електролітичне	до 200	Дуже висока	Висока	Висока
Імпульсне	5–300	Висока	Середня	Висока

Це порівняння демонструє переваги електрохімічних методів для отримання плівок із високими експлуатаційними властивостями. Для дослідження в цій роботі

обрано метод імпульсного анодування, оскільки він поєднує високу якість покриття з можливістю оптимізації параметрів процесу.

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Обладнання: електролітична ванна, титанові електроди, алюмінієві токопідводи, джерело постійного струму, джерело імпульсного струму, кріостат, шланги, 2 хімічних насоси, нержавіючий гофрований теплообмінник, ванна з нагрівачем до 95°C, осцилограф, вольтметр, товщиномір.

Електроліти, що використовувались у дослідній частині занесені у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

Склад електролітів та розчинів, використані при проведенні досліджень:

№ з/п	Склад розчину та концентрація	Застосування
1.	«Alufinish E122» – 40 г/л	Знежирення
2.	NaOH – 50 г/л	Травлення
3	H ₂ SO ₄ 44,5% (100мл/л) + H ₂ O ₂ 35% (0,05мл/л)	Освітлення
4.	H ₂ SO ₄ – 254 г/л	Анодування
5.	Дистильована вода	Ущільнення
6.	Алюмініон 2% – 10 мл; TiO ₂ – 15...20 г; H ₂ O ₂ – 5 мл.	Визначення пористості оксидної плівки
7.	HCl – 25 мл; K ₂ Cr ₂ O ₇ – 3 г; H ₂ O – 75 мл.	Визначення корозійної стійкості
8.	CH ₃ COOH – 60 г/л; CuSO ₄ – 5 г/л; ZnCl ₂ – 15 г/л.	Визначення пористості оксидної плівки

В якості деталі, на якій будуть проводитись усі технологічні операції, взято трубу довжиною 3000 мм, що являє собою направляючу для випуску ракет блоку Б-13.

Матеріалом деталі є сплав алюмінію АД-31Т1Н випускається згідно з вимогами ГОСТ 4784-2023. Згідно з ДСТУ сплав АД-31Т1Н за складом складається з:

1. **Алюміній (Al)** – основа сплаву, становить 98,3–99,3%.
2. **Магній (Mg)** – до 0,6%.
3. **Кремній (Si)** – 0,2–0,6%.
4. **Залізо (Fe)** – до 0,5%.
5. **Марганець (Mn)** – до 0,1%.
6. **Хром (Cr)** – до 0,1%.
7. **Цинк (Zn)** – до 0,1%.
8. **Титан (Ti)** – до 0,1%.
9. **Інші домішки:** допустимі домішки: нікель (Ni), мідь (Cu), літій (Li) та інші елементи у незначних концентраціях, що не перевищують 0,05% для кожного елемента і 0,1% у сукупності [8].

Площа деталі становить 100 дм².

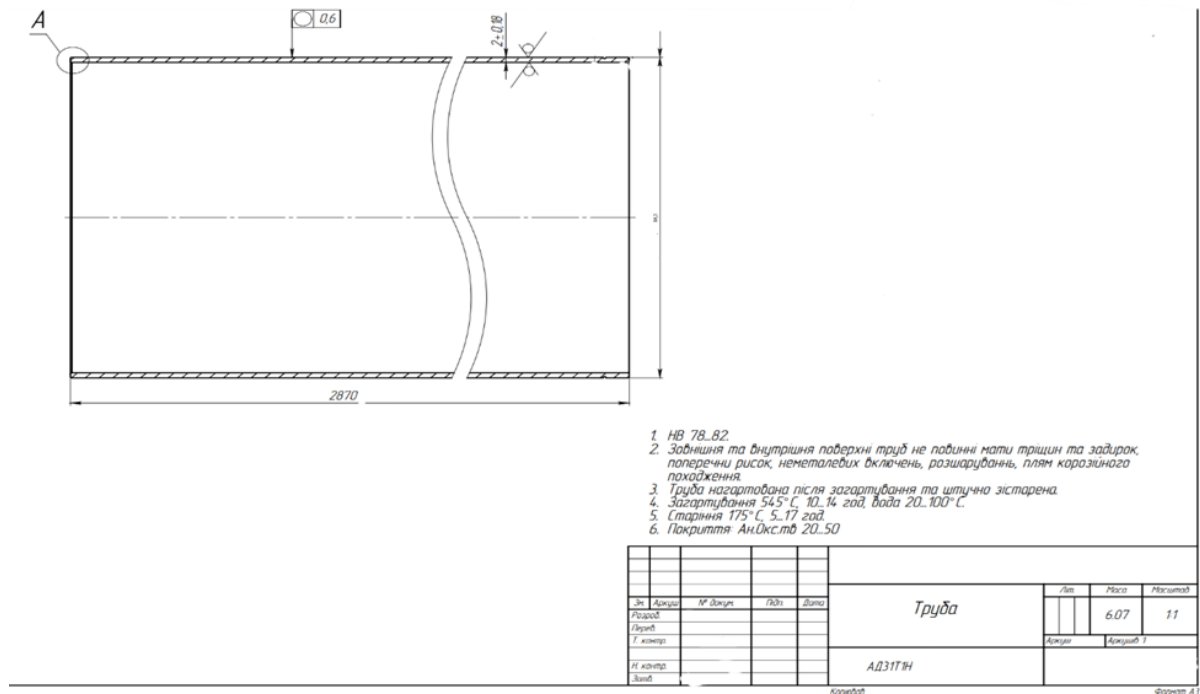


Рисунок 2.1. – Креслення деталі

2.1. Проведення анодування

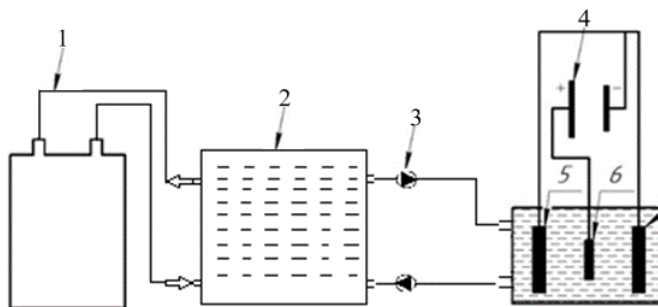
Перед нанесенням оксидного шару, деталь необхідно підготувати.

Підготовка деталей включає у себе:

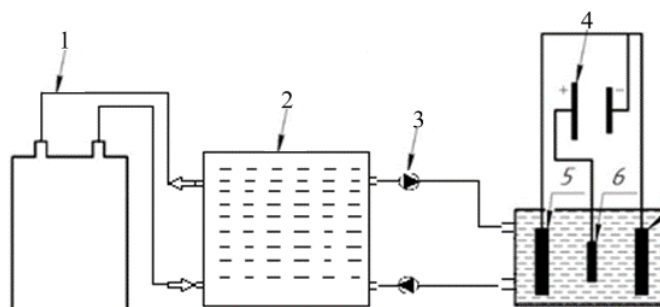
- Знежирення хімічне;
- Травлення;
- Освітлення;

Розчини, що використовувались в процесах підготовки та при анодуванні, занесені в таблицю 2.1.

Після здійснення підготовчих операцій, деталь безпосередньо піддається процесу анодування із застосування установок зображених на рисунку 2.2. та 2.3.



1 – кріостат; 2 – ванна з теплообмінником для охолодження; 3 – насос;
4 – джерело постійного струму; 5 – катоди; 6 – деталь; 7 – робоча комірка;
Рисунок 2.2 – Схема установки для анодування в постійному режимі
струму



1 – кріостат; 2 – ванна з теплообмінником для охолодження; 3 – насос;
4 – джерело імпульсного струму; 5 – катоди; 6 – деталь; 7 – робоча комірка;
Рисунок 2.3 – Схема установки для анодування в імпульсному режимі
струму

Вигляд гальванічної ванни яка використовувалась для твердого анодування зображена на рисунку 2.4.

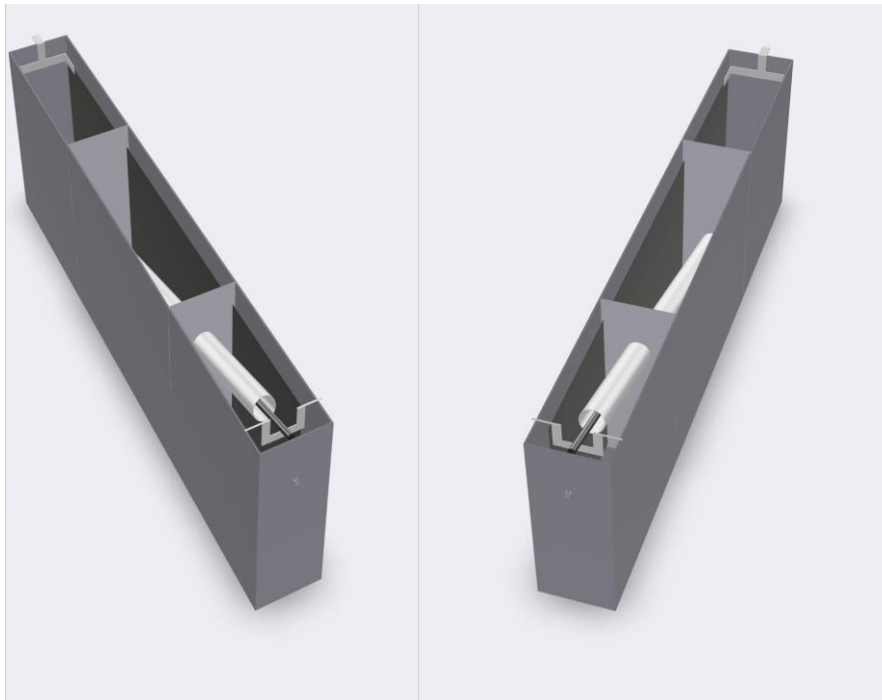


Рисунок 2.4. – 3D модель гальванічної ванни.

Вигляд установки, яка була використана в промисловості, зображена на рисунку 2.5



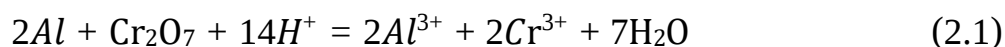
Рисунок 2.5 – Вигляд зібраної промислової установки анодування.

Для зменшення температури робочого електроліту та підтримки його у певному діапазоні температур застосовується кріостат (1), що охолоджує антифриз у ванні (2), завдяки двом насосам (3), що здійснюють перекачування кислоти через шланги та теплообмінник за рахунок чого здійснюється охолодження кислоти. Значення температури визначається на початку та в кінці дослідів завдяки контактному термометру. Значення напруги фіксується постійно за допомогою вбудованого вольтметра в джерело струму. Сила струму для всіх дослідів становила 200 А. В якості підвіски для деталі використовується індивідуально виготовлені кріплення. Катоди виготовлені із титану.

2.2. Визначення властивостей анодної оксидної плівки

2.2.1. Визначення корозійної стійкості оксидної плівки

Крапельний метод є одним з найпоширеніших способів випробування стійкості оксидних плівок на алюмінії та його сплавах до корозії [9]. Відповідно до цього методу на суху поверхню анодованої деталі наносилась крапля розчину, що містить соляну кислоту, біхромат калію (див. табл. 2.1). Під час розчинення оксидної плівки розчин проникає до поверхні металу, відбувається відновлення біхроматних іонів за наступною реакцією [9]:



Хороша корозійна стійкість плівки проявляється тоді, коли іони Cr^{3+} забарвлюють розчин із оранжевого в зелений не раніше, ніж через 60-80 хв.

2.2.2 Визначення пористості оксидної плівки

Для визначення пористості оксидних плівок було використано два методи [9]. Один із них полягає в нанесенні на анодовану деталь розчину на основі ацетатної кислоти (табл. 2.1). Через декілька хвилин на анодованому зразку алюмінію здійснювалось спостереження щодо появи рожевих кристалів міді.

Другий метод полягає у нанесенні пасти на основі 2%-го алюмініону, двоокису титану та пероксиду водню. Усі компоненти перемішували до утворення однорідної маси, після чого наносили рівномірним шаром на анодовану поверхню зразка. Наявність пор підтверджувалась на поверхні появою червоних точок.

2.2.3. Визначення товщини оксидної плівки

Визначення товщини оксидної плівки, утвореної на анодованому зразку, здійснювалось двома методами:

- 1) За допомогою спеціалізованого товщиноміру “PosiTector 6000” з датчиком для вимірювання на немагнітних металах.
- 2) За допомогою сканувального електронного мікроскопу (СЕМ) під назвою “Tescan Vega 3”

2.2.4 Визначення твердості анодної плівки методом Віккерса

Метод Віккерса – це популярний метод визначення мікротвердості матеріалів, який застосовується для тонких шарів, включаючи анодні плівки. Його основна перевага полягає в універсальності та високій точності для крихких і тонких зразків[10].

Принцип роботи:

Метод базується на вимірюванні відбитка, що залишає алмазний індентор (пірамідальної форми) після вдавлювання у поверхню зразка під контрольованим навантаженням.

Важливим для вимірювання є:

- Форма індентора: правильна чотиригранна піраміда з кутом 136° між протилежними гранями.
- Навантаження: від кількох грамів (для мікротвердості) до кількох десятків кілограмів (для макротвердості).
- Вимірювання: визначають довжину діагоналей залишеного відбитка.

Процедура визначення:

1. Підготовка зразка:

- Поверхня зразка повинна бути рівною, чистою та відполірованою, щоб забезпечити точність вимірювань.
- У випадку анодної плівки потрібно враховувати її товщину: вона має бути достатньою, щоб уникнути проникнення індентора до основного матеріалу.

2. Вдавлювання індентора:

- Алмазний індентор під певним навантаженням (наприклад, 0.01–1 кг) притискається до поверхні анодної плівки на кілька секунд.
- Тривалість дії навантаження зазвичай становить 10–15 секунд.

3. Вимірювання відбитка:

- За допомогою мікроскопа визначають довжини двох діагоналей відбитка (d_1 і d_2), після чого обчислюють середнє значення діагоналі $d = (d_1 + d_2) / 2$.

4. Розрахунок твердості:

Твердість Віккерса (HV) обчислюється за формулою:

$$HV = (1854 \times F) / d^2 [10]$$

де F — прикладене навантаження (у Ньютонах), d — середня довжина діагоналі відбитка (у мікронах). Коефіцієнт 1854 враховує форму індентора.

РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Досліджено процес анодування алюмінієвого сплаву АД31Т1Н у сульфатному електроліті за однакових температур $0...+5$ та на різних блоках живлення з постійним та імпульсним режимом струму. Також з використанням осцилографу одержано амплітудні характеристики струму для процесу анодування та проведено експерименти для визначення властивостей одержаної анодної оксидної плівки.

3.1. Одержання амплітудних характеристик струму

Амплітудні характеристики отримані за допомогою осцилографу Siglent SDS 1052DL+. Осцилограмма знімалася з частотою 5 наносекунд.

Розглянемо отриману осцилограмму для постійного струму (Рис. 3.1).

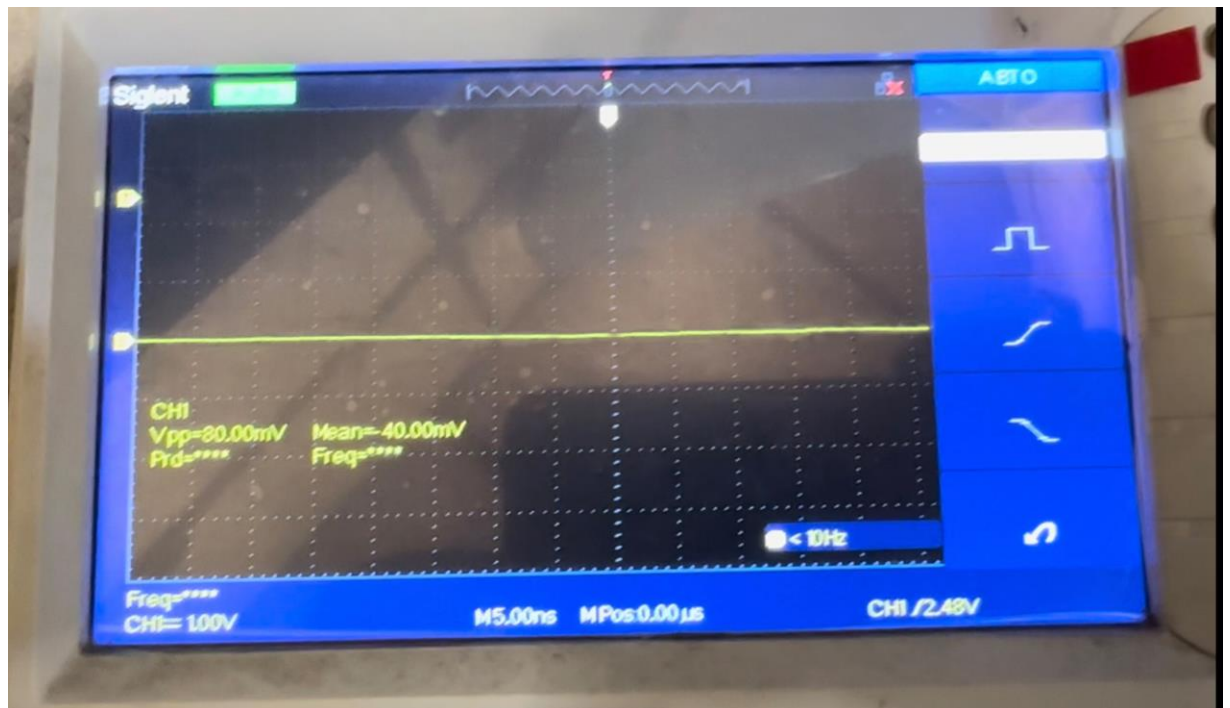


Рисунок 3.1. Осцилограма постійного режиму струму.

З рисунку 3.1 видно що для режиму постійного струму амплітудних коливань не має, струм не коливався та являв собою пряму лінію.

Розглянемо отримані осцилограми для імпульсного струму з частотою отримання даних 1 наносекунда та 250 мілісекунд (рисунок 3.2.)

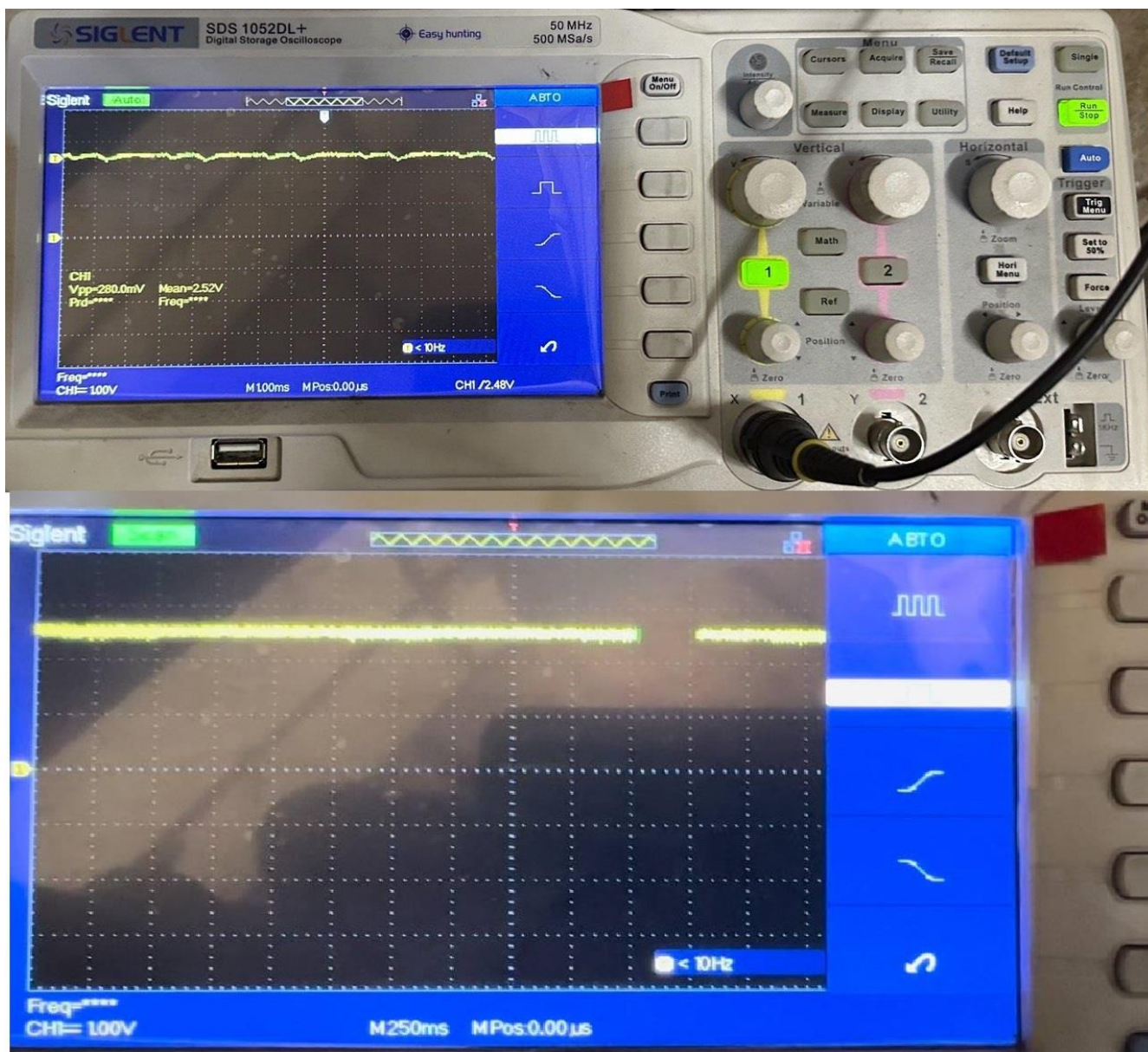


Рисунок 3.2. Осцилограма для імпульсного режиму струму.

З рисунку 3.2. видно, що є амплітудні коливання в межах 280 мВ.

3.2. Результати процесу твердого анодування

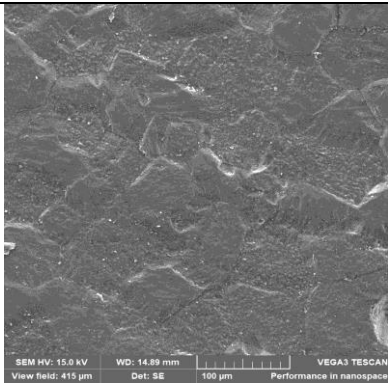
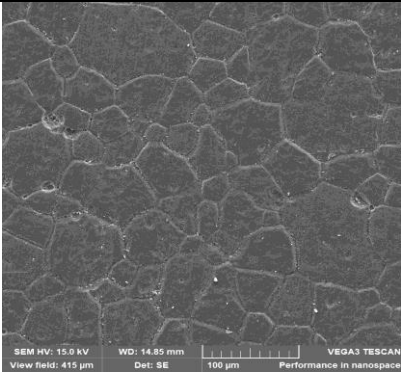
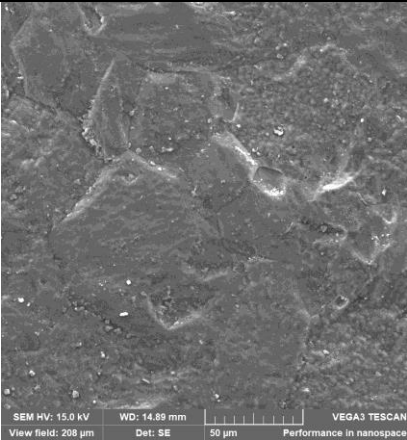
Анодування проводили у розчині сульфатної кислоти з концентрацією 250 г/л. Параметри за якими відбувався процес наведено в таблиці 3.1. (Позначення літерою І-імпульсний режим, П- постійний струм). Результати анодування занесені у таблицю 3.2.

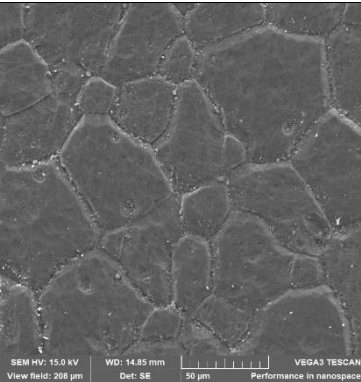
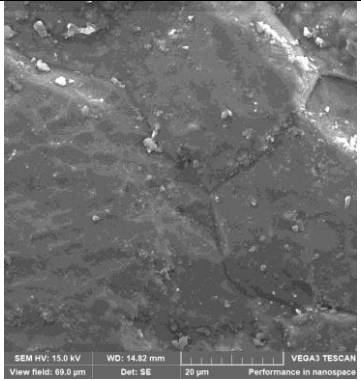
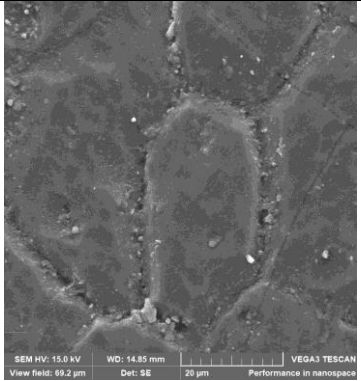
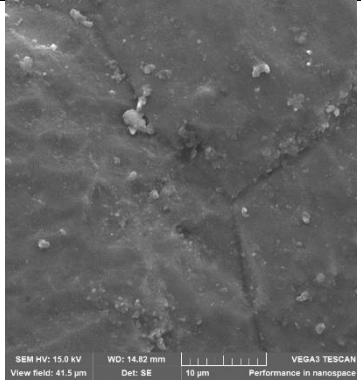
Таблиця 3.1

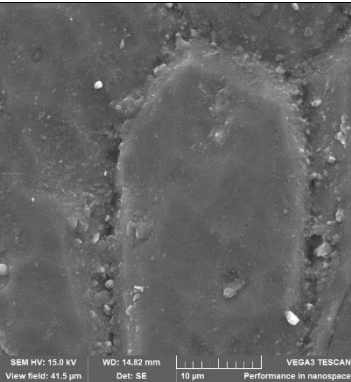
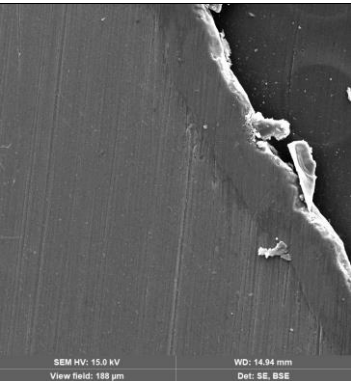
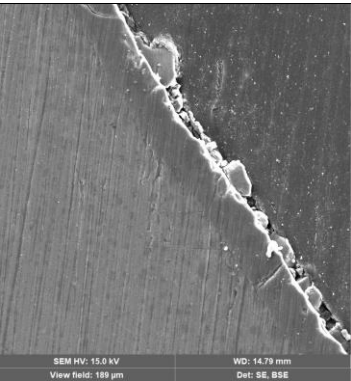
№ дослід	Параметри за яких відбувалось анодування деталі				
	Середовище для анодування: H_2SO_4 – 250 г/л				
	Сила струму: $I, A = 2,0$				
	U_1, V На початку експерименту	U_2, V В кінці експерименту	$t_1, ^\circ C$ На початку експерименту	$t_2, ^\circ C$ В кінці експерименту	$\tau, \text{хв}$
1.І	23,1	28	0	3,4	100
2.П	22,5	30	0	4,2	100
3.І	24,2	28	0	3,2	100
4.П	23,3	30	0	4,3	100
5.І	22	28	0	3,5	100
6.П	23	30	0	4,3	100
7.І	22,3	28	0	3,3	100
8.П	20,0	30	0	4,0	100
9.І	23,3	28	0	3,6	100
10.П	24,2	30	0	4,6	100

Таблиця 3.2

Електронні зображення твердої анодної плівки на поверхні алюмінію

1.І.		
2.П.		
3.І.		

4.П.	 SEM HV: 15.0 kV WD: 14.85 mm VEGA3 TESCAN View field: 208 µm Det: SE 50 µm Performance in nanospace
5.И.	 SEM HV: 15.0 kV WD: 14.82 mm VEGA3 TESCAN View field: 99.0 µm Det: SE 20 µm Performance in nanospace
6.П.	 SEM HV: 15.0 kV WD: 14.85 mm VEGA3 TESCAN View field: 99.2 µm Det: SE 20 µm Performance in nanospace
7.И.	 SEM HV: 15.0 kV WD: 14.82 mm VEGA3 TESCAN View field: 41.5 µm Det: SE 10 µm Performance in nanospace

8.П.			
9.І.			
10.П.			

Досліди №1, 3, 5, 7, 9 (Імпульсне анодування) аналіз структури отриманих плівок:

Імпульсний режим струму значно вплинув на процес формування анодної плівки, суттєво покращивши її структуру, фізико-хімічні властивості та експлуатаційні характеристики. Аналіз зразків, отриманих у процесі анодування за використанням імпульсного струму, виявив низку важливих переваг у порівнянні зі зразками, створеними в постійному режимі.

По-перше, плівка, сформована за імпульсного струму, має більш гладку та рівномірну структуру. На поверхні немає значних дефектів або тріщин, що можуть

спостерігатися при інших режимах анодування. Завдяки таким характеристикам плівка демонструє високу однорідність, що є критично важливим для забезпечення її експлуатаційних властивостей.

По-друге, отриманий оксидний шар має щільну, безпористу структуру. Ця властивість досягається завдяки періодичним коливанням струму. Такий режим сприяє утворенню якісного бар'єрного шару, який забезпечує високий рівень корозійної стійкості та механічної міцності.

Додатково, результати експериментів показали, що за однаковий час анодування імпульсний режим дозволив сформувати плівку, товщина якої в середньому на 20% перевищує товщину шару, отриманого при постійному струмі. Це свідчить про підвищену ефективність процесу анодування в імпульсному режимі, що може бути пов'язано з покращеною кінетикою транспортування іонів у шарі оксиду.

Отримана анодна плівка має високі показники твердості та зносостійкості, що було підтверджено серією експериментів, спрямованих на дослідження механічних властивостей (детальніше в розділі 3.3). Таким чином, імпульсний режим струму не лише підвищує ефективність формування оксидного шару, але й забезпечує отримання анодної плівки високої якості, яка володіє покращеними фізико-механічними та хімічними характеристиками. Це робить її оптимальним вибором для застосувань, які вимагають тривалого терміну експлуатації та високої твердості покриття.

Досліди №2, 4, 6, 8, 10 (анодування при постійному струмі) аналіз структури отриманих плівок:

На зразках, отриманих у результаті анодування за постійного режиму струму, спостерігається чітка багатокутна структура, яка є характерною для оксидних покриттів на алюмінієвій основі. Ця структура має виразно окреслені межі між

зернами, що вказує на зернисту організацію плівки. Таке розташування зерен типове для оксидів алюмінію, які формуються в умовах постійного струму, коли процес росту плівки проходить рівномірно, але без періодичних пауз, характерних для імпульсного режиму.

Межі зерен виступають як лінії поділу між окремими ділянками плівки, що сформувалися під час анодування. Ці межі є не лише видимими під мікроскопом, але й мають важливе функціональне значення. З одного боку, вони сприяють стабільному формуванню плівки, розділяючи ділянки оксиду. З іншого боку, межі зерен можуть стати зонами концентрації механічних напружень. Це пов'язано з тим, що різні ділянки плівки можуть мати дещо відмінні властивості через варіації в умовах росту, такі як локальна зміна електрохімічного потенціалу або нерівномірність розчинення оксиду в електроліті.

Підвищена концентрація напружень на межах зерен може призводити до утворення мікротріщин, особливо в умовах механічного впливу або термічних коливань. Це є потенційним недоліком плівок, отриманих у постійному режимі струму, оскільки тріщини можуть знижувати загальну міцність і корозійну стійкість покриття.

На представленому зразку, зокрема на фото з дослідів №10, чітко видно пори, які розташовані в структурі анодної плівки. Наявність пор свідчить про пористість покриття, яка є вищою порівняно зі зразками, отриманими в імпульсному режимі струму. Така пористість утворюється через особливості розчинення оксиду алюмінію в електроліті під час анодування в постійному режимі. Оскільки у цьому режимі відсутні паузи, які могли б сприяти стабілізації бар'єрного шару, оксидний шар поступово розчиняється, формуючи пори.

Пори можуть мати різний діаметр і глибину залежно від параметрів анодування, таких як температура, концентрація електроліту та густина струму. У

випадку постійного струму вони зазвичай більші та менш рівномірно розподілені порівняно з плівками, отриманими в імпульсному режимі. Це створює як переваги, так і недоліки:

- **Переваги:** Висока пористість сприяє адсорбційним властивостям плівки, що робить її придатною для подальшого фарбування або нанесення захисних матеріалів.
- **Недоліки:** Більша пористість знижує твердість і зносостійкість покриття, що обмежує його застосування в умовах високих механічних або хімічних навантажень.

У порівнянні з плівками, сформованими в імпульсному режимі, зразки з постійного режиму мають менш щільну та більш пористу структуру. Це зумовлено відсутністю циклічного характеру анодування, коли періоди високого та низького струму дозволяють стабілізувати бар'єрний шар і мінімізувати пористість.

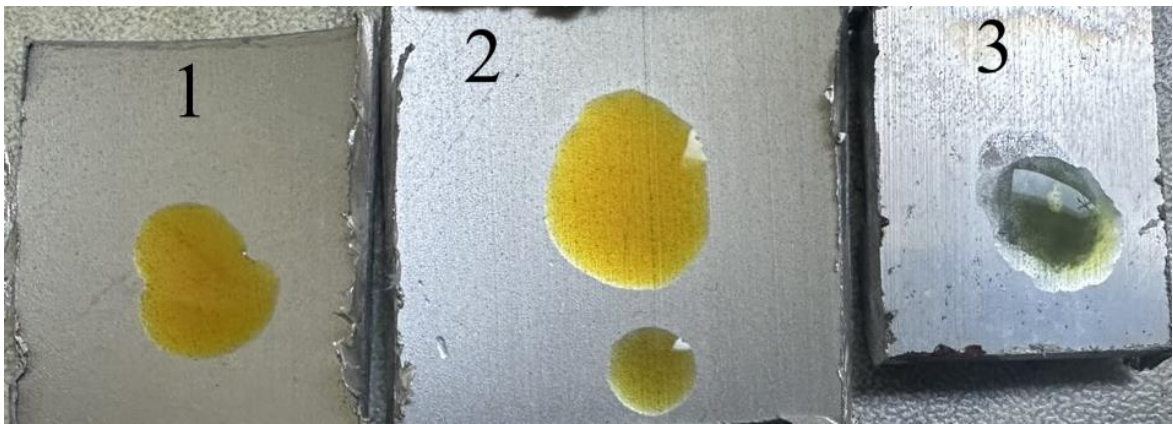
Зразки з постійного режиму мають менш гладку поверхню, що може бути наслідком нерівномірного росту оксиду через постійний вплив струму та одночасне розчинення шару в електроліті. Водночас, підвищена пористість робить ці плівки більш придатними для декоративного анодування, де важливе значення має можливість заповнення пор барвниками.

Плівки, отримані в постійному режимі струму, демонструють виразну зернисту структуру з чітко окресленими межами зерен і наявністю пор. Хоча така структура має певні недоліки, пов'язані зі зниженням механічної міцності та підвищеною ймовірністю утворення тріщин, вона також відкриває можливості для застосування цих плівок у декоративних цілях або в умовах, де важлива висока адсорбційна здатність.

3.3. Результати визначення властивостей твердої анодної оксидної плівки

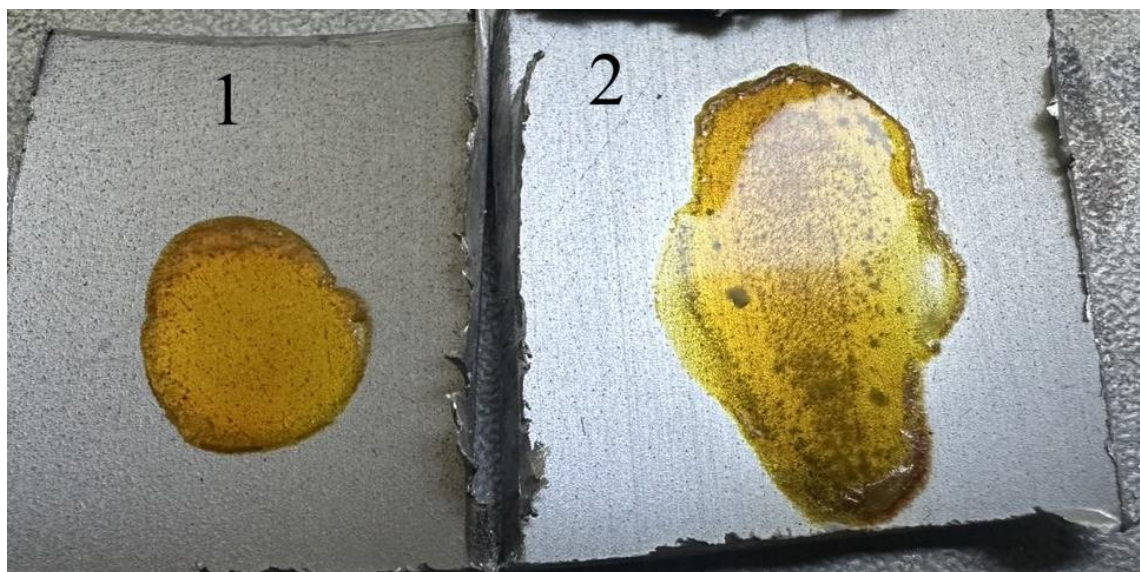
3.3.1. Результати визначення корозійної стійкості оксидної плівки

Для визначення корозійної стійкості крапельним методом, було нанесено краплю оранжевого розчину (табл. 2.1) на анодовані деталі. Також наноситься для порівняння, крапля розчину на частину зразка який не піддавався анодуванню. Результати зображені на рисунку 3.3.



- 1 – анодована поверхня з використанням імпульсного струму;
2 – анодована поверхня з використанням постійного струму;
3- неанодована поверхня.

Рисунок 3.3 – Визначення корозійної стійкості, час 0 хв.

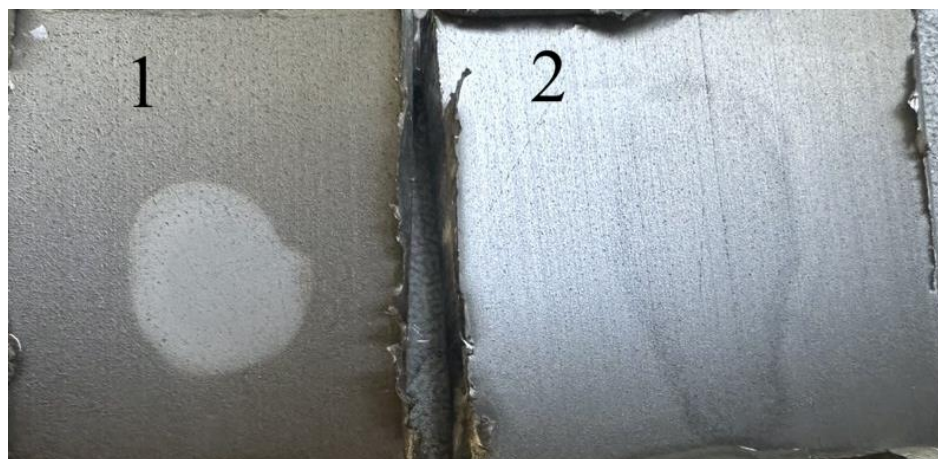


1 – анодована поверхня з використанням імпульсного струму;

2 – анодована поверхня з використанням постійного струму;

Рисунок 3.4 – Визначення корозійної стійкості, час 120 хвилин

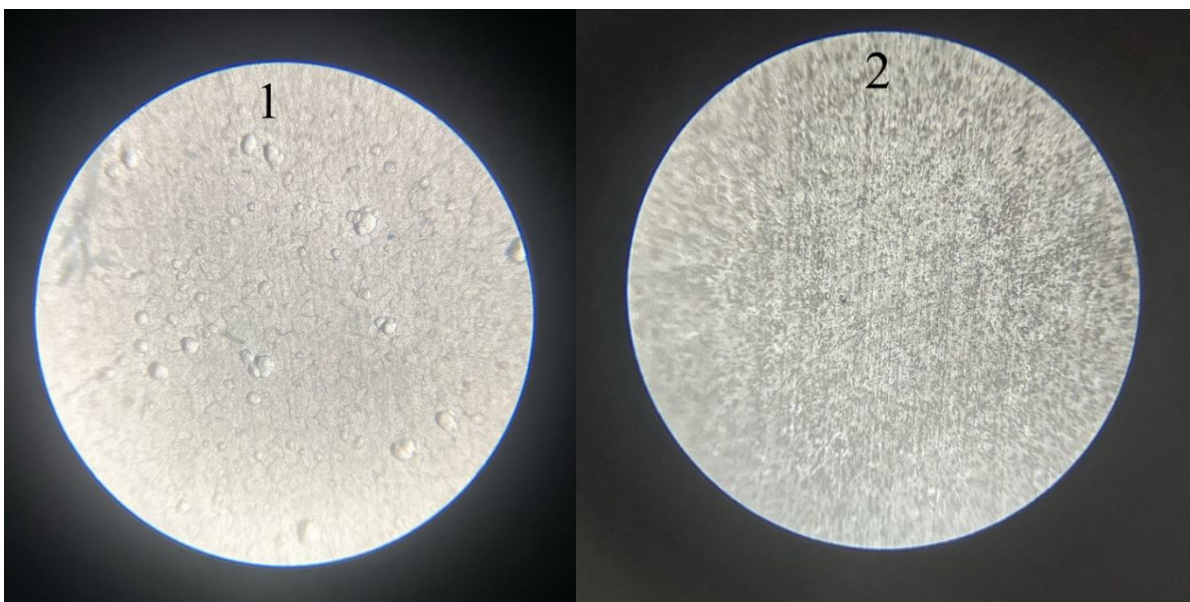
Висока корозійна стійкість плівки проявляється при умові, якщо розчин із оранжевого переходить в зелений не раніше, ніж через 60 хв. У нашому випадку пройшло 120 хвилин, зміна кольору відбулась на зразку з використанням постійного струму.



1 – анодована поверхня з використанням імпульсного струму;

2 – анодована поверхня з використанням постійного струму;

Рисунок 3.5 – Вигляд поверхні після корозійних випробувань.



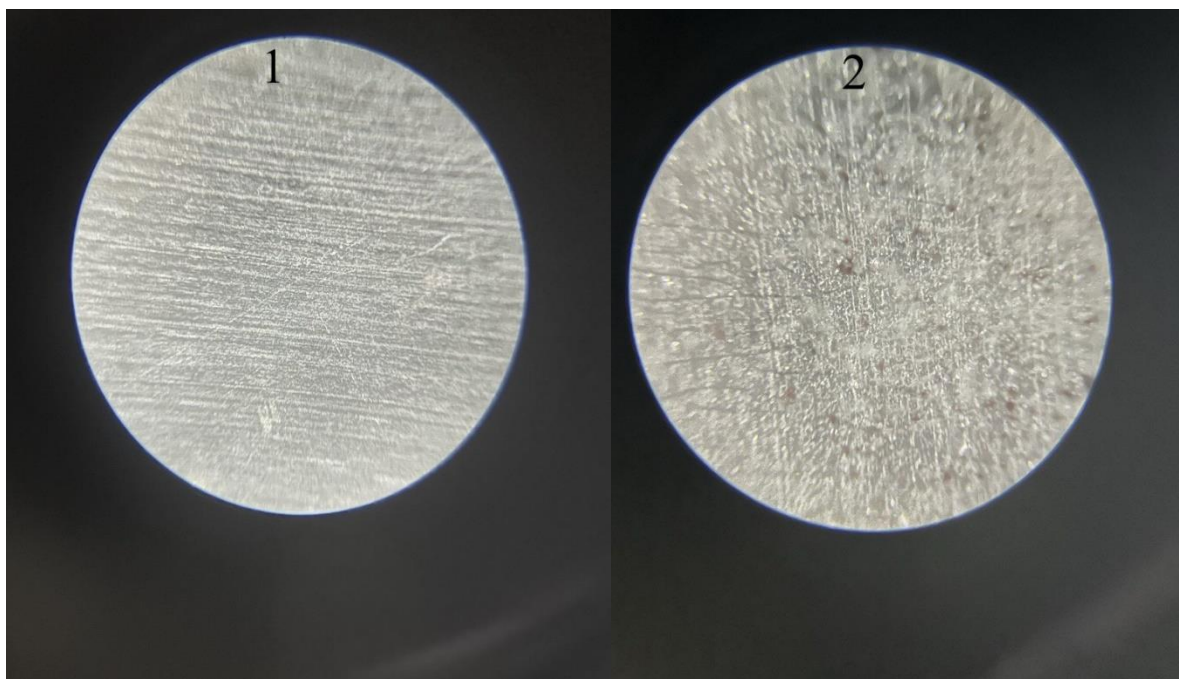
1 – анодована поверхня з використанням імпульсного струму;

2 – анодована поверхня з використанням постійного струму;

Рисунок 3.6 – Вигляд поверхні під мікроскопом після корозійних випробувань.

3.3.2. Результати визначення пористості оксидної плівки

Для визначення пористості оксидної плівки застосували два метода. Перший спосіб полягає у нанесенні на анодовану поверхню розчину із ацетатною кислотою і солями міді (табл. 2.1).

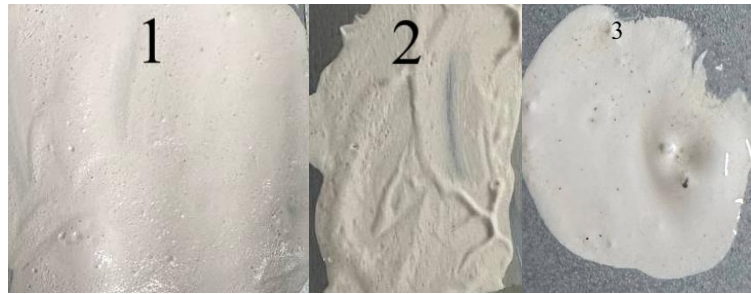


1 – на початку дослід; 2 – через 3 хвилини.

Рисунок 3.7.– Визначення пористості оксидної плівки зразка, який анодувався на прямому струмі

Через 3 хвилини безбарвна крапля не набула червоного кольору але через мікроскоп було помічено наявність кристалів міді червоного кольору (рисунок 3.7), що свідчить про наявність пор в отриманій оксидній плівці за постійного струму. Зразок який анодувався на імпульсному струмі ніяких змін не зазнав.

Другий спосіб полягає у нанесенні на анодовану поверхню пасти (табл. 2.1). При наявності пор мають з'явитись кольорові точки, які було помічено на зразку з використанням прямого струму та показано на рисунку 3.8.



1 – анодована поверхня з прямим струмом; 2 – анодована поверхня з імпульсним струмом, 3- неанодована поверхня.

Рисунок 3.8 – Порівняння вигляду пасти для визначення пористості

3.3.3. Результати визначення товщини оксидної плівки

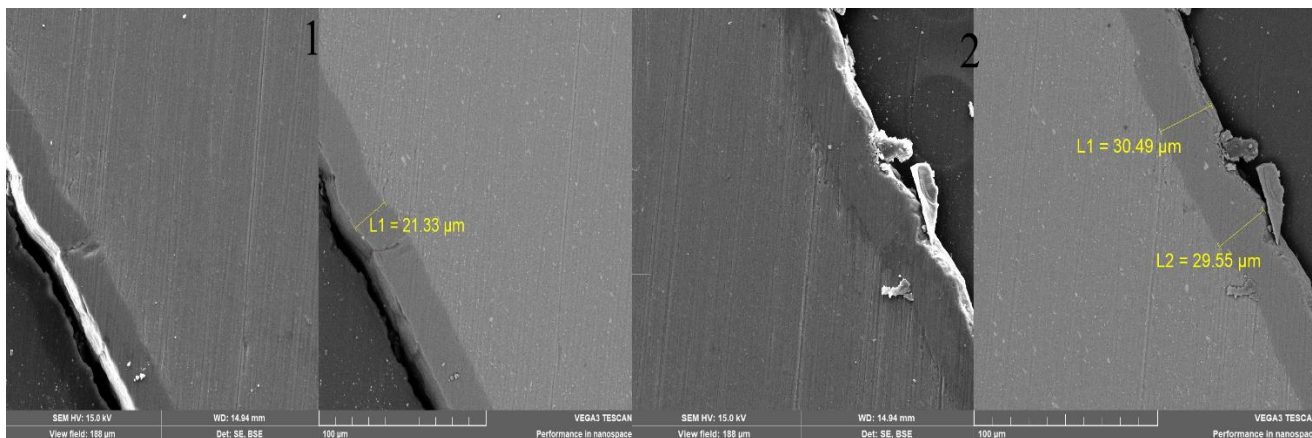
Для визначення товщини оксидної плівки застосували два метода. Перший спосіб полягає у використанні товщиноміру “PosiTector 6000” з датчиком для вимірювання на немагнітних металах зображений на рисунку 3.9.



1-зразок анодований на прямому струмі; 2-анодований зразок з використанням імпульсного струму.

Рисунок 3.9 - Результати вимірювання товщини анодної плівки з використанням товщиноміру “PosiTector 6000”.

Другий спосіб полягає у використанні сканувального електронного мікроскопу (СЕМ) під назвою “Tescan Vega 3”. Результати вимірювань наведено на рисунку 3.10.

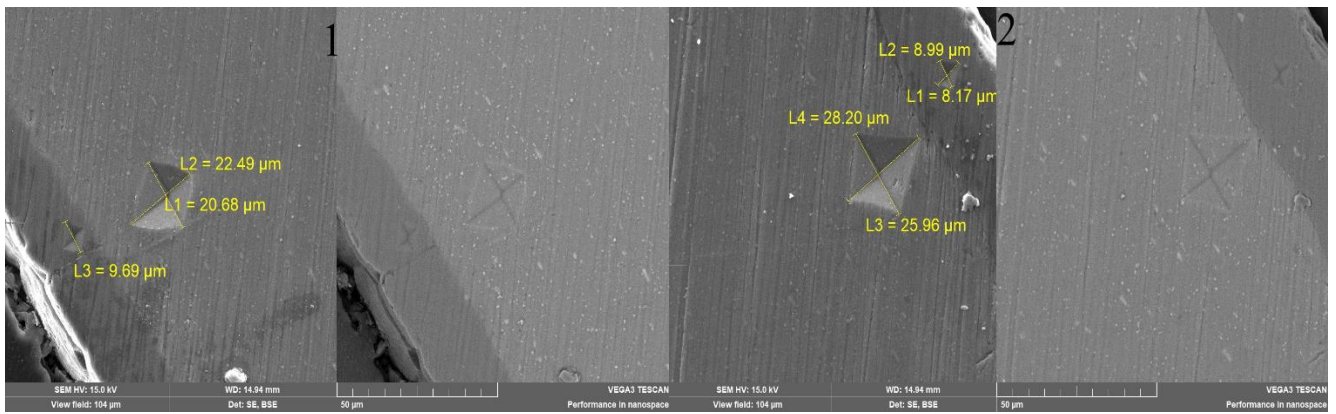


1-зразок анодований на прямому струмі; 2-анодований зразок з використанням імпульсного струму.

Рисунок 3.10 - Результати вимірювання товщини анодної плівки з використанням сканувального електронного мікроскопу.

3.3.4. Вимірювання твердості анодної плівки

Для визначення твердості використано метод Віккерса також з застосуванням сканувального електронного мікроскопу. Результати вимірювання зображені на рисунку 3.11.



1-зразок анодований на прямому струмі; 2-анодований зразок з використанням імпульсного струму.

Рисунок 3.11 - Результати вимірювання твердості анодної плівки з використанням сканувального електронного мікроскопу.

Розрахунок твердості проводили за формулою:

$$1) d = (d1 + d2) / 2$$

$$2) HV = (1854 \times F) / d^2; F=20\Gamma$$

Для зразка №1:

$$d=(9,69+9,69)/2=9,69$$

$$HV=(1854 \times 20)/9,69^2=394 \text{ кг/мм}^2$$

Для зразка №2:

$$d=(8,99+8,17)/2=8,58$$

$$HV=(1854 \times 20)/8,58^2=503 \text{ кг/мм}^2$$

3.4. Приклад використання анодування в військовій промисловості і авіації

Тверде анодування широко використовується в оборонній промисловості для підвищення міцності, корозійної стійкості та довговічності виробів, зокрема труб для пускового блоку Б-13, які використовуються для запуску ракет С-13. Труба є критично важливим компонентом пускового пристрою, оскільки забезпечує направлення ракети під час її старту, а також витримує значні механічні та термічні навантаження, що виникають у момент запуску. Застосування твердого анодування в цьому випадку дозволяє значно покращити експлуатаційні властивості труб, завдяки формуванню на їхній поверхні оксидного шару з високою твердістю та стійкістю до зношування. Оксидна плівка, сформована під час анодування, забезпечує захист від впливу агресивних середовищ, таких як висока вологість, продукти згоряння ракетного палива або хімічні реагенти, які можуть потрапляти на поверхню під час експлуатації.

Плівка має щільну структуру, яка значно підвищує стійкість матеріалу до корозії та механічних впливів. Крім того, термічна стабільність оксидного шару дозволяє трубі витримувати високі температури без втрати своїх властивостей, що є критичним для запуску ракет. Технологія анодування також дозволяє зменшити вагу конструкції завдяки використанню легкого алюмінію як базового матеріалу, зберігаючи при цьому необхідну міцність. Зменшення ваги конструкції важливе для військової техніки, де мінімізація маси впливає на ефективність і мобільність.

Тверде анодування також забезпечує гладкість внутрішньої поверхні труби, що мінімізує тертя під час руху ракети і забезпечує точність її запуску. Отриманий оксидний шар може додатково ущільнюватися для підвищення його експлуатаційних властивостей. У результаті використання твердого анодування забезпечує підвищення надійності та довговічності труб для блоку Б-13, що дозволяє знизити витрати на технічне обслуговування та заміну деталей, а також

покращує загальну ефективність пускових установок. Анодовані труби демонструють високу стійкість до зношування, тривалий термін служби та стабільну роботу навіть у складних кліматичних і експлуатаційних умовах, що робить їх ідеальними для використання у військовій галузі.

РОЗДІЛ 4. ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ

Для промислового впровадження розробленої технології одержання анодованого алюмінію запропоновано технологічну карту, що наведена у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Технологічна карта процесу твердого анодування сплаву АД31Т1Н

№	Операція	Склад розчину і концентрація		Режим		
		Назва та хімічна формула компонентів	г/дм ³	Час, хв	t, °С	i, А/дм ²
1	2	3	4	5	6	7
010	Монтаж деталей на підвіску					
020	Хімічне знежирення	Alufinish E122	40	10-15	40-60	
030	Промивання у теплій воді			0,25-0,5	40-60	
040	Промивання у холодній воді			0,25-0,5	18-25	
050	Травлення	Гідроксид натрію NaOH	50	10-15	25-40	
060	Промивання у холодній воді			0,25-0,5	18-25	
070	Освітлення	H ₂ SO ₄ 44,5% + H ₂ O ₂ 35%	140+50	10-15	15-30	
080	Промивання у холодній воді			0,25-0,5	18-25	
090	Анодування електрохімічне	Сульфатна к-та H ₂ SO ₄	250	100	0-5	2

100	Промивання у холодній воді		0,25-0,5	18-25	
110	Промивання у теплій воді		0,25-0,5	40-60	
120	Ущільнення у гарячій воді		30	90-95	
130	Демонтаж деталей з підвіски				
140	Контроль якості				

4.1. Визначення дійсного фонду часу роботи обладнання

Час роботи обладнання, яке проектується, визначається технологічною схемою процесу, режимом роботи підприємства, та особливостями технологічного обладнання.

Номінальний річний фонд часу роботи обладнання T_n при переривчастому виробництві розраховують з кількості календарних днів у році $T_k = 365$ та за вирахуванням вихідних $T_c = 105$ [11]. Вихідні дні не враховуємо, оскільки під час дії військового стану всі святкові дні скасовані. Також не враховується час у передсвяткові дні. При п'ятиденному робочому тижні тривалістю 40 год, по 8 годин на день, та двозмінній роботі номінальний річний фон становитиме:

Кількість робочих днів:

$$T_p = T_k - T_c = 365 - 105 = 260 \text{ днів.}$$

Тривалість роботи обладнання на день:

$$8 \text{ год} \times 2 \text{ зміни} = 16 \text{ год/день.}$$

Номінальний річний фонд часу роботи обладнання:

$$T_n = 260 \times 16 = 4160 \text{ годин.}$$

Дійсний річний фонд часу роботи обладнання T_d (год) визначається, виходячи із T_n з урахуванням загальних річних витрат часу на неминучі простої обладнання $K_{пр}$, які для однозмінної роботи становлять 2% [12]:

$$T_d = T_n - K_{пр} \cdot T_n = 4160 - 0,02 \cdot 4160 = 4077 \text{ год}$$

4.2. Визначення виробничої програми обладнання

Для розрахунку річної виробничої програми P_p річне виробниче завдання P_z необхідно збільшити на величину виправного браку виробів, який складає зазвичай 0,5...3 % від P_z . Прийнемо річну виробничу програму 3000 м² і значення браку $K_{бр} = 3\%$ та здійснимо розрахунок річної виробничої програми:

$$P_p = P_z + K_{бр} \cdot P_z = 1000 + 0,03 \cdot 1000 = 1090 \text{ м}^2/\text{рік}$$

Добова виробнича програма $P_{доб}$ складає:

$$P_{доб} = \frac{1090}{260} = 4,19 \text{ м}^2/\text{день}$$

4.3. Вибір виду обладнання для нанесення гальванічного покриття, розрахунок його кількості та габаритних розмірів

Для розрахунку необхідної кількості обладнання, необхідно знати:

- річну виробничу програму, $P_p = 1000 \text{ м}^2/\text{рік}$;
- з урахуванням браку $1090 \text{ м}^2/\text{рік}$;
- товщину покриття на деталях, $\delta = 25 \text{ мкм}$;

- площа деталі, $S_d = 100 \text{ дм}^2; 1 \text{ м}^2$;

Тривалість обробки однієї завантажувальної підвіски τ розраховується за формулою:

$$\tau = \tau_m + \tau_{об}$$

де $\tau_{об}$ - час обслуговування, необхідний для завантаження деталей у ванну та їх вивантаження, приймаємо 10 хв; τ_m - технологічний час (час обробки деталей у ванні).

Технологічний час τ_m , за який здійснюється анодування деталі, був визначений експериментально. За 100 хв електролізу, вдалось нанести 25 мкм оксидної плівки, що задовільняє технологічні потреби.

Тривалість обробки із завантаженням становить:

$$\tau = 100 + 10 = 110 \text{ хв}$$

$\tau_{об}$ - час обслуговування, що затрачається на завантаження та вивантаження деталей із ванни.

Розрахувавши дійсний річний фонд часу роботи обладнання T_d та тривалості обробки одного завантаження ванни τ , проводиться визначення кількості оброблюваних завантажень n :

$$T_d = 4160 \text{ год} \times 60 = 249600 \text{ хв.}$$

$$n = \frac{T_d}{\tau \cdot 1,1} = \frac{249600}{110 \cdot 1,1} = 2062$$

де $K_{об}$ – коефіцієнт, який враховує затрати часу для початкового запуску обладнання, кінцевого вивантаження та на допоміжні операції. При роботі у одну зміну становить 1,1 [12].

Звідси разове завантаження усіх ванн Y_c

$$Y_c = \frac{P_p}{n} = \frac{1000}{2062} = 0,48 \text{ м}^2$$

4.4. Розрахунок конструктивних розмірів ванни і коефіцієнту завантаження обладнання

Обираємо внутрішні розміри ванни: 3400x400x1050 мм.

Креслення ванни:

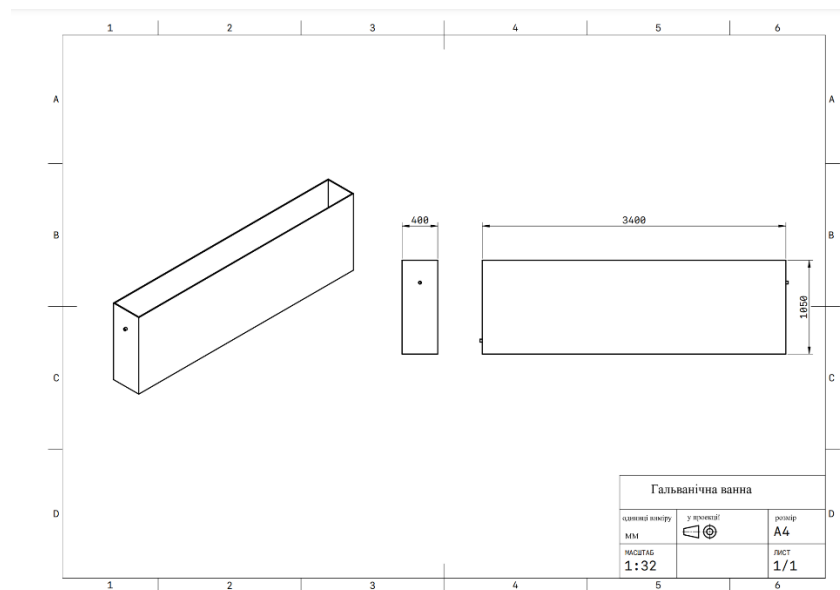


Рисунок 4.1 - Креслення гальванічної ванни для анодування.

Загальні кількість деталей, що завантажуються в одну ванну:

$$n_d = 1$$

Розраховуємо сумарну поверхню деталей S_n , які завантажують на підвіску:

$$S_n = S_d \cdot n_d = 100 \cdot 1 = 1 \text{ м}^2,$$

де S_d – поверхня однієї деталі, м^2 ; n_d – кількість деталей на підвісці.

Визначаємо поверхню одноразового завантаження у ванну:

$$S_{oz} = S_n \cdot N_n = 100 \cdot 1 = 1 \text{ м}^2$$

де N_n – кількість підвісок, які одночасно завантажують в ванну. При використанні спеціально виготовленої конструкції для однопозиційної ванни $N_n = 1$.

Кількість ванн необхідних для виконання річної програми:

$$n_v = \frac{Y_c}{S_{oz}} = \frac{0,48}{1} = 0,48 \approx 1 \text{ шт.}$$

Річна продуктивність обраного обладнання:

$$Q_{річн} = n_{макс} \cdot S_{oz} = 2278 \cdot 1 = 2278 \text{ м}^2/\text{рік}$$

Розраховане значення річної продуктивності показує, що з річною нормою нанесення покриття, підібране обладнання справляється.

Коефіцієнт завантаження:

$$K_{зав} = \frac{P_p}{P_p^*} = \frac{1090}{2278} \approx 0.478 \text{ (або 47.8\%)}.$$

4.5. Баланс струму на гальванічній ванні

Розрахунок сили струму на ванні здійснюється для подальшого вибору джерела живлення постійним струмом. Сила струму на однопозиційній ванні визначається за наступною формулою I , А:

$$I = K \cdot i_k \cdot S_{oz},$$

де коефіцієнт K враховує втрати електрики на осадження металу на контактах підвісного пристрою, обираємо рівним $K = 1,1$ [12].

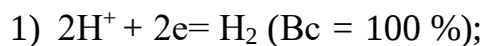
Значення анодної густини струму $i_a = 2 \text{ А/дм}^2$ (200 А/м^2). Сила струму на гальванічній ванні анодування складає:

$$I = K \cdot i_a \cdot S_{\text{ОЗ}} = 1,1 \cdot 200 \cdot 1 = 220 \text{ А}$$

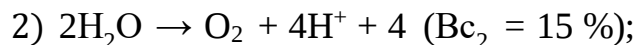
Баланс електрики складаємо на одну годину роботи ванни, кількість електрики визначаємо в ампер-годинах. Результати розрахунків зведено у таблицю балансу електрики.

У сульфатному електроліті анодування на електродах перебігають такі електрохімічні процеси:

На катоді:



На аноді:



Сила струму, яка витрачається на кожну реакцію:

На катоді:

$$I_1 = \frac{I \cdot \text{Вс}}{100} = \frac{200 \cdot 100}{100} = 200 \text{ А}$$

На аноді:

$$I_2 = \frac{I * B_c}{100} = \frac{200 * 85}{100} = 170A$$

$$I_3 = \frac{I * B_c}{100} = \frac{200 * 15}{100} = 30A$$

Результати розрахунків заносимо у таблицю 4.2.

Таблиця 4.2

Баланс електрики ванни нанесення покриття на одну годину роботи.

Надходження	Q, А·год	%	Витрати	Q, А·год	%
На катоді: Від зовнішнього джерела струму	200	100	Виділення H ₂ за реакцією 1	200	100
Разом	200	100	Разом	200	100
На аноді: Від зовнішнього джерела струму	200	100	Утворення Al ₂ O ₃ за реакцією 2 Виділення O ₂ за реакцією 3	170 30	100
Разом	200	100	Разом	200	100

4.6. Складання балансу напруги для гальванічної ванни

Напруга на ванні визначається за формулою:

$$U = E_a - E_k + \Delta U_{ом} + \Delta U_I + \Delta U_k$$

де $(E_a - E_k)$ – різниця електродних потенціалів анода і катода під струмом;
 $\Delta U_{ом}$, ΔU_I , ΔU_k – омичне падіння напруги в електроліті, у провідниках першого
 роду та в контактах.

Середню густину струму в міжелектродному просторі визначаємо за формулою:

$$i_{ср} = \sqrt{i_a + i_k},$$

У процесі електролізу на катоді утворюється водень, бульбашки якого заповнюють міжелектродний простір, тому при визначенні падіння напруги в електроліті враховуємо вплив газонаповнення на омичний опір. У цьому разі $\Delta U_{ом}$ визначаємо за формулою:

$$\Delta U_{ом} = K \cdot i_{ср} \cdot i_{к-п} \cdot \rho_e,$$

де K – коефіцієнт, який враховує збільшення опору за рахунок газонаповнення, величину K приймаємо рівною 1,15 [12]; $i_{ср}$ – середня густина струму в міжелектродному просторі, А/м²; $i_{к-п}$ – відстань між катод і краєм підвіски з деталями, м.

Тоді напруга на ванні:

$$U = \frac{(E_a - E_k + \Delta U_{ом})}{0,9}$$

Сума падіння напруги в електродах, провідниках першого роду та в контактах ванни $\Delta U_I + \Delta U_k$ приймають у межах величини, яка не перевищує 10 % загальної напруги на ванні U , В визначається як:

$$\Delta U_I + \Delta U_k = 0,1 \cdot U$$

Мінімальна напруга на джерелі струму $U_{дс}$ складається із суми напруги на

вані U та падіння напруги в шинопроводах від джерела струму до ванни, яке приймемо не більшим 10 % від $U_{\text{ДС}}$.

Отже, мінімальну напругу на джерелі струму розраховуємо за формулою:

$$U_{\text{ДС}} = 1,1 \cdot U_6$$

Вихідні дані для розрахунку балансу напруги:

- катодна густина струму $i_k = 100 \text{ А/м}^2$;
- анодна густина струму $i_a = 200 \text{ А/м}^2$;
- потенціал катода $E_k = -1,2 \text{ В}$; потенціал анода $E_a = 13,5 \text{ В}$ [12];
- питомий електричний опір електроліту $\rho_e = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ [12];
- відстань між катодом і ближнім краєм підвіски $l_{\text{к-п}} = 0,2 \text{ м}$.

Знаходимо різницю потенціалів катода і анода:

$$E_a - E_k = 13,5 - (-1,2) = 14,7 \text{ В}$$

При середній густині струму, яка проходить через електроліт:

$$i_{\text{ср}} = \sqrt{i_a \cdot i_k} = \sqrt{200 \cdot 100} = 141,42 \text{ А/м}^2$$

Падіння напруги в електроліті становитиме:

$$\Delta U_{\text{ом}} = K \cdot i_{\text{ср}} \cdot l_{\text{к-п}} \cdot \rho_e$$

де K – коефіцієнт, який ураховує збільшення опору за рахунок газонаповнення, величини K знаходиться у межах 1,01...1,25 [12].

$$\Delta U_{\text{ом}} = 1,2 \cdot 141,42 \cdot 0,2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} = 0,849 \text{ В}$$

Напруга на ванні дорівнює:

$$U = \frac{(E_a - E_k + \Delta U_{om})}{0,9} = \frac{14,7 + 0,849}{0,9} = 17,27 \text{ В}$$

Падіння напруги в контактах і провідниках першого роду складає:

$$\Delta U_l + \Delta U_k = 0,1 \cdot U = 0,1 \cdot 17,27 = 1,727 \text{ В}$$

Мінімальна напруга на джерелі струму становить:

$$U_{дс} = 1,1 \cdot U = 1,1 \cdot 17,27 = 18,997 \text{ В}$$

Результати розрахунків зводимо у таблицю 4.3.

Таблиця 4.3

Баланс напруги на ванні анодування.

Надходження	U, В	%	Витрати	U, В	%
Напруга на ванні	17,27	100	Різниця потенціалів під струмом $E_a - E_k$	14,7	84,99
			Падіння напруги в електроліті ΔU_{om}	0,849	5,01
			Падіння напруги на електродах, контактах і провідниках $\Delta U_l + \Delta U_k$	1,727	10,00
Разом	17,27	100	Разом	17,27	100

4.7. Вибір джерела струму для гальванічної ванни

Джерело імпульсного струму вибираємо, виходячи із сили струму і напруги на ванні із врахуванням падіння напруги в шинопроводах. Оскільки, сила струму $I = 200 \text{ А}$, напруга на ванні $U = 17,28 \text{ В}$, було обрано імпульсний випрямний агрегат Elteck Flatpack 200A/28B, який має наступні характеристики:

- номінальна напруга – 28 В;
- номінальний струм – 200 А.

Для вибраного випрямного агрегату визначають коефіцієнт завантаження

$$K = \frac{N_{\text{дс}}}{N_{\text{пас}}}$$

де $N_{\text{дс}}$ - потужність, необхідна для виконання завданої програми, $N_{\text{дс}} = U \cdot I \cdot 10^{-3}$, кВт; $N_{\text{пас}}$ - паспортна потужність імпульсного агрегату (5,6 кВт).

Тоді, потужність необхідна для виконання завданої програми складає:

$$N_{\text{дс}} = 17,27 \cdot 200 \cdot 10^{-3} = 3,454 \text{ кВт}$$

Отже, коефіцієнт завантаження вибраного випрямного апарату складає:

$$K = \frac{3,454}{5,6} = 0,61$$

4.8. Визначення джоулевої теплоти та складання балансу енергії на ванні

Електрична енергія $W_{\text{заг}}$, яка підводиться до електролізера, перетворюється в хімічну енергію $W_{\text{хім}}$ та в теплову енергію (джоулеву теплоту) $W_{\text{дж}}$:

$$W_{\text{заг}} = W_{\text{хім}} + W_{\text{дж}}$$

Баланс енергії складає на одну годину роботи ванни, з урахуванням 3%

часу на простій обладнання.

Електрична енергія, яка витрачається на перебіг процесу в одній ванні, визначається за формулою

$$W_{\text{зар}} = U \cdot I \cdot t \cdot 3600 \cdot 10^{-3} = 17,27 \cdot 200 \cdot 1,40 \cdot 3600 \cdot 10^{-3} = 17408.16 \text{ кДж}$$

де U - напруга га ванні, I - струм на ванні, t - час роботи ванни

$$W_{\text{хім}} = \sum \nu_i \cdot \Delta H_i^0 \cdot Bc = -3.6 \cdot I \cdot \tau \cdot 10 \cdot \frac{\nu_i}{(z_i \cdot F)}$$

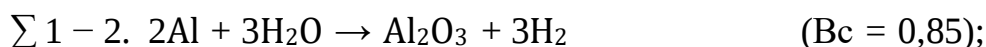
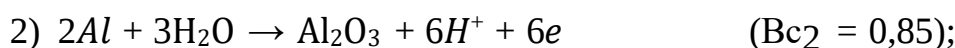
де ΔH_i^0 - зміна ентальпії усіх електрохімічних процесів, яка розраховується за значенням ентальпії вихідних та кінцевих продуктів реакції за температури, яка відповідає процесу анодування з урахуванням стехіометричних коефіцієнтів ν_i та виходу за струмом Bc , z_i - кількість електронів, які приймають участь у реакції.

При розрахунку $\sum \Delta H_i^0$ для усіх процесів, як перебігають одночасно приймаємо однакову направленість реакції. Тоді

$$\sum \Delta H_i = \sum \nu_{i\text{кін}} \cdot \Delta H_{i\text{кін}} - \sum \nu_{i\text{вих}} \cdot \Delta H_{i\text{вих}}$$

При одночасному перебігу декількох електрохімічних процесів враховуємо витрати хімічної енергії на всі процеси, що мають місце в системі, яку розглядаємо:

Катодна (1), анодна (2) та сумарна (1-2) реакції утворення оксидної плівки мають вигляд:



$$\Delta H_{1-2} = \Delta H_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 3\Delta H_{\text{O}_{\text{H}^2}} - (2\Delta H_{\text{O}_{\text{Al}}} + 3\Delta H_{\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}})$$

$$\Delta H_{1-2} = (-2582,1) + 3 \cdot 0 - (3 \cdot (-285,8) + 2 \cdot 0) = -1724,7 \text{ кДж/моль}$$

Побічні реакції мають вигляд:



$$\begin{aligned} \Delta H_{3-4} &= 2\Delta H_{\text{O}_{\text{H}^2}} + \Delta H_{\text{O}_{\text{O}_2}} - 2\Delta H_{\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}} = 0 + 0 - 2 \cdot (-285,8) \\ &= 571,6 \text{ кДж/моль} \end{aligned}$$

$$W_{\text{дж}} = 3,6 \cdot 200 \cdot 1,40 \cdot 14,96 = 3,6 \cdot 200 \cdot 20,944 \approx 10515,2 \text{ кДж}$$

$$W_{\text{хім}} = W_{\text{заг}} - W_{\text{дж}} = 17408,16 - 10515,2 = 6892,96 \text{ кДж}$$

Таблиця 4.4

Баланс енергії на ванні анодування

Надходження	кДж	%	Витрати	кДж	%
Електрична енергія від джерела струму	17408	100	Джоулева теплота	10515,2	65
			Хімічна енергія	6892,96	45
Разом	17408	100	Разом	17408	100

4.9. Розрахунок витрат матеріалів

Розрахунок витрат матеріалів є важливим етапом планування виробничого процесу, спрямованим на визначення річної потреби у сировині та матеріалах для забезпечення ефективного функціонування підприємства. Цей розрахунок включає обчислення необхідної кількості вихідної сировини та додаткових матеріалів, які

використовуються для нанесення заданого виду покриття. Враховуються технічні особливості процесу, норми витрат матеріалів, відсоток втрат у процесі виробництва, а також очікуваний обсяг продукції. Такий підхід дозволяє оптимізувати витрати, запобігти дефіциту ресурсів, забезпечити безперебійний технологічний процес та досягти необхідної якості покриття.

4.10. Розрахунок витрат нерозчинних катодів

Розрахунок витрат нерозчинних катодів на початковий запуск обладнання

Витрати нерозчинних катодів на запуск обладнання (K_2) визначаємо за формулою:

$$G_{az} = K_1 \cdot K_2 \cdot n_{aui} \cdot l_B \cdot h_B \cdot \delta_a \cdot d_a \cdot n_B,$$

де $K_1 = 0,6$ – коефіцієнт, який враховує співвідношення сумарної ширини анодів до довжини ванни; $K_2 = 0,8$ – коефіцієнт, який враховує співвідношення анодів та висоти ванни; $n_{aui} = 3$ – кількість катодних штанг у ванні; $l_B = 3,40$ м – внутрішня довжина ванни; $h_B = 1,05$ м – внутрішня висота ванни; $d_a = 4500$ кг/м³ – густина матеріалу анодів; $\delta_a = 0,002$ м – товщина анодів; $n_B = 1$ – кількість ванн даного типу.

Отже, нерозчинних катодів на запуск обладнання складають:

$$G_{az} = 0,6 \cdot 0,8 \cdot 3 \cdot 3,40 \cdot 1,05 \cdot 4500 \cdot 0,002 \cdot 1 = 7,88 \text{ кг}$$

Витрати катодів на виконання річної програми

Дані витрати приймаємо близько 0, але розраховуємо на одну повну заміну катодів один раз на рік тобто 8 кг.

4.10.1. Витрати хімічних реактивів

Витрати хімічних реактивів на початковий запуск обладнання

Витрати кожного компонента електроліту G_i (кг) визначаємо за формулою:

$$G_i = C_i \cdot V_B \cdot K_{\text{зап}} \cdot n_B,$$

де C_i – концентрація кожного компонента електроліту, кг/м³; V_B – об'єм ванни 1160 л = 1,16 м³; $K_{\text{зап}}$ – коефіцієнт заповнення ванни, n_B – кількість ванн даного типу.

Для запуску обладнання анодування витрати реагентів складають:

$$G_{H_2SO_4} = 250 \cdot 1,16 \cdot 1,9 \cdot 1 = 551 \text{ кг}$$

Для запуску обладнання хімічного знежирення витрати реагентів складають:

$$G_{\text{Alufinish E122}} = 40 \cdot 0,1 \cdot 1,9 \cdot 1 = 7,6$$

Для запуску обладнання травлення витрати реагентів складають:

$$G_{NaOH} = 50 \cdot 0,1 \cdot 1,9 \cdot 1 = 9,5 \text{ кг};$$

Для запуску обладнання освітлення витрати реагентів складають:

$$G_{H_2SO_4} = 50 \cdot 0,1 \cdot 1,9 \cdot 1 = 9,5 \text{ кг}$$

$$G_{H_2O_2} = 20 \cdot 0,1 \cdot 1,9 \cdot 1 = 3,8 \text{ кг}$$

Витрати хімічних реактивів для виконання виробничої програми

Розрахунок витрат кожного компонента здійснюється за формулою, кг:

$$G_{ip} = C_i \cdot V_{BT},$$

де $V_{\text{вт}}$ – сумарний об’єм електроліту, який виноситься із ванни за виконання річної виробничої програми, м^3 .

Величину $V_{\text{вт}}$ можна визначити як:

$$V_{\text{вт}} = 1,15 \cdot S_n \cdot A_e,$$

де S_n – сумарна поверхня деталей, яка обробляється м^2 ; коефіцієнт 1,15 – враховує площу занурюваної частини підвісок; A_e – норма витрат електроліту, який виноситься з деталями, $\text{м}^3/\text{м}^2$.

Сумарний об’єм електроліту, який виноситься із ванни за виконання виробничої програми:

Анодування

$$V_t = 1,15 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 57,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$A_e = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 [13]$$

Хімічне знежирення

$$V_t = 1,15 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} = 69 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$A_e = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 [13]$$

Хімічне травлення

$$V_t = 1,15 \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3} = 80,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$A_e = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 [13]$$

Хімічне освітлення

$$V_t = 1,15 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} = 69 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$A_e = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 [13]$$

Сумарний об’єм винесеного електроліту становить:

$$\begin{aligned} V_{\text{втсум}} &= V_{\text{втаноод.}} + V_{\text{втфарб.}} + V_{\text{втзнежир.}} + V_{\text{вт травл.}} = \\ &= 57,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 + 69 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 + 80,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 + 69 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \end{aligned}$$

Розрахунок витрат хімічних реагентів на тверде анодування для виконання виробничої програми:

$$G_{H_2SO_4} = 250 \cdot 10^3 \cdot 2,85 \cdot 10^{-4} = 71,25 \text{ кг};$$

Для виконання виробничої програми хімічного знежирення витрати реагентів складають:

$$G_{Alufinish \text{ E122}} = 50 \cdot 10^3 \cdot 3,41 \cdot 10^{-4} = 17,05 \text{ кг};$$

Для виконання виробничої програми хімічного травлення витрати реагентів складають:

$$G_{NaOH} = 250 \cdot 10^3 \cdot 3,98 \cdot 10^{-4} = 99,5 \text{ кг};$$

Для виконання виробничої програми хімічного освітлення витрати реагентів складають:

$$G_{H_2SO_4} = 28 \cdot 10^3 \cdot 69 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 = 200 \text{ кг}$$

$$G_{H_2O_2} = 14 \cdot 10^3 \cdot 69 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 = 100 \text{ кг}$$

РОЗДІЛ 5 СТАРТАП-ПРОЄКТ

5.1. Резюме об'єкту досліджень

Об'єкт дослідження: тверді анодні оксидні плівки з використанням імпульсного режиму струму утворені в результаті електролізу

КВЕД-2010: 25.61 Оброблення металів та нанесення покриття на метали, а саме нанесення покриття на метали.

Місце розробки у інноваційному ланцюжку цінності: етап розробки.

Плановий обсяг випуску продукції: 1090 м²/рік

Споживач: основними споживачами являються виробники зброї та боєприпасів. КВЕД-2010: Клас 25.40.

Таблиця 5.1

Резюме об'єкту дослідження

Показник	Характеристика
1. Сутність ідеї	Отримати тверді анодні оксидні покриття з покращеною зносостійкістю.
2. Наявність аналогів або прототипів	Порошкове покриття, метод хімічного занурення.
3. Основна потреба, яку задовільнить реалізований стартап	Отримання покриття, що має високу зносостійкість і тривалу експлуатацію.
4. Ступінь розробленості технології реалізації	впровадження
5. Очікувана потужність стартапу	Мале підприємство
6. За масштабом виробництва	Серійне
7. За рівнем спеціалізації	Вузькопрофільне
8. За ресурсами, що споживатимуться	Матеріаломістке
9. За чисельністю персоналу	Мале

10. Органи управління при реалізації стартапу	Національні
11. Бажане географічне розташування: • потужностей стартапу; • офісу стартапу; • збутової мережі; • постачальників сировини	• Бровари; • Бровари; • Україна; • Україна, країни за кордоном.
12. Джерела фінансування	Особисті
13. Наявність посередників при реалізації (так, ні, орієнтовні посередники, форми оплати їх діяльності)	Ні
14. Методи просування результатів розробки на ринок	Реклама в мережі інтернет

5.2. Аналіз зовнішнього та внутрішнього середовища стартапу

Для оцінки загроз і можливостей, які впливають на діяльність стартапу, важливо провести аналіз зовнішнього середовища (зовнішнього та зовнішньо-оперативного). Основними факторами зовнішнього середовища є політичні, економічні, географічні, демографічні, культурні аспекти та науково-технічний прогрес. Нижче подано таблицю аналізу загроз і можливостей зовнішнього середовища (табл. 5.2). [14].

Таблиця 5.2

Аналіз загроз і можливостей зовнішнього середовища

Фактор	Загрози	Можливість
Політика		
Зміна розташування підприємства:	Зміна місця розташування підприємства в умовах воєнних дій потребує значних витрат часу та ресурсів.	Переміщення до регіонів із кращим доступом до ресурсів та ринків збуту.

Закриття кордонів через воєнні дії	Обмеження доступу до зарубіжних ресурсів.	Пошук нових постачальників або альтернативних джерел ресурсів.
Нестабільність законодавства	Ускладнення планування та ведення діяльності.	Можливість адаптації до нових умов і отримання переваг від змін у регуляторному середовищі.
Економіка		
Зростання цін на сировину та енергоносії:	Підвищення витрат.	Збільшення цін на продукцію для компенсації витрат.
Модернізація підприємства	Значні витрати на модернізацію виробництва.	Підвищення ефективності роботи підприємства завдяки новим технологіям.
Додаткові грошові заохочення працівників	Додаткові витрати на стимулювання працівників.	Формування позитивного настрою в колективі, що підвищує ефективність роботи.
Актуальність розробки	Ризик втрати частини ринку через застарілий продукт чи технологію.	Оновлення продукції або вдосконалення процесів може підвищити її конкурентоспроможність.
Демографія		
Освітня міграція	Зменшення кількості вступників до місцевих навчальних закладів через війну.	Навчання за кордоном дозволяє фахівцям здобувати сучасні знання і впроваджувати їх на локальному рівні.
Кар'єрні очікування населення	Великі очікування щодо зарплат створюють додаткове фінансове навантаження.	Зростає доступність висококваліфікованих кадрів, а економічна ситуація знижує середній рівень зарплат.
Вікові групи населення	Старіння населення скорочує активну частину трудових ресурсів.	Впровадження програм перекваліфікації для старших вікових груп створює додаткові можливості.
Науково-технічний прогрес		

Автоматизація виробництва	Скорочує кількість робочих місць і потребує великих капіталовкладень.	Зниження витрат на оплату праці та підвищення ефективності роботи підприємства.
Стандарти якості	Впровадження стандартів якості вимагає додаткових інвестицій.	Підвищення рівня продукції дозволяє збільшити її вартість і зміцнити позиції на ринку.
Модернізація технологій	Удосконалення технологій потребує часу та фінансових ресурсів.	Нові розробки можуть залучити більше покупців і підвищити прибуток.
Заміна застарілої номенклатури	Оновлення номенклатури та впровадження нових маркувань пов'язане із витратами.	Це сприяє формуванню довіри споживачів до продукції.
Географія		
Розташування країни	Розташування країни-сусіда у стані військового конфлікту створює додаткові ризики.	Розширення ринків збуту через співпрацю з іншими країнами-сусідами.
Урбанізація	Зменшення площ для забудови через урбанізацію.	Зростає кількість фахівців, доступних для працевлаштування в міських зонах.
Родовища сировини	Обмежена кількість місцевих сировинних ресурсів спричиняє високу конкуренцію.	Зручні логістичні умови для закупівлі та транспортування ресурсів.
Логістика	Віддаленість від портів або міжнародних транспортних хабів може підвищити логістичні витрати.	Розвиток локальної інфраструктури відкриває можливості для скорочення витрат.

Тепер проаналізуємо фактори зовнішнього-оперативного середовища (табл. 5.3) [14].

Таблиця 5.3

Аналіз загроз і можливостей зовнішнього-оперативного середовища

Фактор	Загрози	Можливість
Постачальники		
Підвищення вартості матеріалів	Зростання витрат на закупівлю.	Укладення довгострокових угод для стабільності цін.
Віддаленість постачальників	Збільшення часу на доставку.	Налагодження зв'язків із локальними постачальниками для швидшої доставки.
Монополізація ринку постачальниками	Зниження можливості отримати конкурентні умови.	Створення власної системи постачання або залучення нових постачальників.
Стабільність ланцюгів постачання	Нестабільність у постачаннях через зовнішні обставини	Диверсифікація постачальників для зменшення ризиків перебоїв.
Конкуренти		
Домінування на ринку великих брендів	Складність у боротьбі за частку ринку.	Розробка унікального продукту або послуги, що виділяється на ринку.
Активні маркетингові кампанії конкурентів	Зниження впізнаваності вашого бренду.	Використання інноваційних рекламних рішень для збільшення зацікавленості до вашої продукції.
Зниження цін конкурентами:	Тиск на рентабельність бізнесу.	Проведення акцій та розширення програм лояльності для збереження клієнтів.
Швидке оновлення асортименту конкурентами	Ризик втратити актуальність продукції.	Впровадження регулярного моніторингу ринку для швидкої адаптації до змін.
Споживачі		
Зростання запитів на екологічність	Необхідність додаткових витрат для відповідності	Розробка екологічно чистих продуктів, що можуть підвищити лояльність клієнтів.

продукції	стандартам.	
Виявлення браку	Витрати на заміну товару або компенсації.	Аналіз причин дефектів для вдосконалення продукції та збільшення довіри споживачів.
Зростання вимог до доставки	Необхідність прискореної та надійної логістики.	Оптимізація логістичних процесів для розширення географії обслуговування клієнтів.
Зміна вподобань споживачів	Ризик втрати лояльності клієнтів через недостатнє оновлення продукту.	Постійне дослідження ринку для розробки продукції, яка відповідає новим потребам клієнтів.
Посередники		
Зростання кількості посередників	Ускладнення координації через збільшення учасників у процесі.	Розширення охоплення ринку та збільшення кількості потенційних покупців.
Маркетингові послуги	Додаткові витрати на оплату послуг сторонніх компаній.	Розширення клієнтської бази завдяки професійному просуванню продукції.
Логістичний посередник	Ненадійність або відсутність компетенції посередника може призвести до проблем із доставкою товарів.	Ефективна організація ланцюгів постачання, що покращує своєчасність і якість доставки.
Репутація посередника	Співпраця з ненадійним партнером може негативно вплинути на імідж компанії.	Залучення авторитетних посередників сприяє зростанню довіри клієнтів до продукції та компанії.

Значну увагу слід приділити зовнішньому середовищу, зокрема співпраці з посередниками. В умовах війни виникають серйозні ризики перебоїв у постачанні сировини, що може негативно вплинути на виробничі процеси. Для мінімізації цих ризиків необхідно розробити стратегію ефективної логістики, залучити кілька

посередників, зокрема міжнародних, які забезпечать стабільність постачання. Водночас важливо враховувати, що співпраця з посередниками може включати певні ризики, як ненадійність логістичних партнерів чи складнощі у координації з великою кількістю сторін. Однак, використання послуг авторитетних партнерів та професійних маркетингових посередників може суттєво підвищити довіру клієнтів, збільшити клієнтську базу та покращити імідж компанії. Особливу увагу слід звернути на репутацію посередників, щоб уникнути негативних наслідків для бренду.

Щодо внутрішнього середовища, війна призвела до значного скорочення кількості висококваліфікованих кадрів через війну. У таких умовах актуальним є залучення молодих спеціалістів, таких як студенти, у якості стажерів. Це дозволяє не лише зменшити витрати на оплату праці, але й створити перспективний кадровий резерв, який у майбутньому стане основою для стабільного розвитку підприємства. Крім того, молоді фахівці можуть привнести нові ідеї та підходи, що сприятимуть інноваціям.

Аналіз внутрішнього середовища виявив як сильні, так і слабкі сторони компанії. Сильні сторони можна використовувати для розширення діяльності та покращення конкурентоспроможності, а слабкі — потребують уваги для усунення ризиків. Успіх стартапу залежить від здатності підприємства швидко адаптуватися до змін зовнішнього середовища, ефективно управляти співпрацею з посередниками та раціонально використовувати внутрішні ресурси для досягнення стратегічних цілей (табл. 5.4). [14]

Таблиця 5.4

Переваги і недоліки внутрішнього середовища

Переваги	Недоліки
Імпульсний режим забезпечує підвищену твердість та зносостійкість анодних плівок.	Висока складність обладнання для генерації точних імпульсів струму.
Плівки, отримані в імпульсному режимі, мають покращену корозійну стійкість.	Збільшені енергетичні витрати через специфіку імпульсного режиму.
Можливість налаштування характеристик плівки залежно від вимог до продукту.	Необхідність ретельної оптимізації параметрів для уникнення дефектів покриття.
Зменшення утворення мікротріщин завдяки контрольованим імпульсам.	Виділення газів під час процесу потребує спеціалізованих систем витяжки.
Актуальність технології для галузей, де важливі довговічність та якість покриття (авіація, воєнна промисловість, будівництво).	Високі витрати на дослідження, тестування та адаптацію технології до різних галузей.
Наявність досвідчених фахівців та можливість залучення молодих спеціалістів через програми стажування.	Брак підготовлених кадрів через війну та необхідність додаткового навчання молодих працівників.
Власна база для вдосконалення процесів та можливість автоматизації для підвищення ефективності.	Високі витрати на тестування, сертифікацію та оновлення обладнання.

Завдяки методу Шонфільда здійснимо порівняння методів створення анодних плівок на алюмінієві сплави за такими важливими факторами, як енергоефективність, довговічність та однорідність плівок.

Таблиця 5.5

Оцінка основних характеристик проєкту та компаній конкурентів

№	Фактор	Вагомість хар-ки для споживача	Оцінка характеристики товару для компаній- конкурентів		
			Традиційний постійний струм	Комбінований струм	Імпульсний струм, розробка студента
1.	Енергоефективність процесу, кВт	0,25	3, 3, 4	4, 4, 3	5, 5, 5
2.	Довговічність плівок, років	0,4	3, 4, 3	4, 4, 4	5, 4, 5
3.	Однорідність плівки, %	0,35	3, 4, 3	4, 4, 3	5, 5, 5

Здійснимо візуалізацію отриманих даних, для подальшого їх аналізу (рис. 5.1)

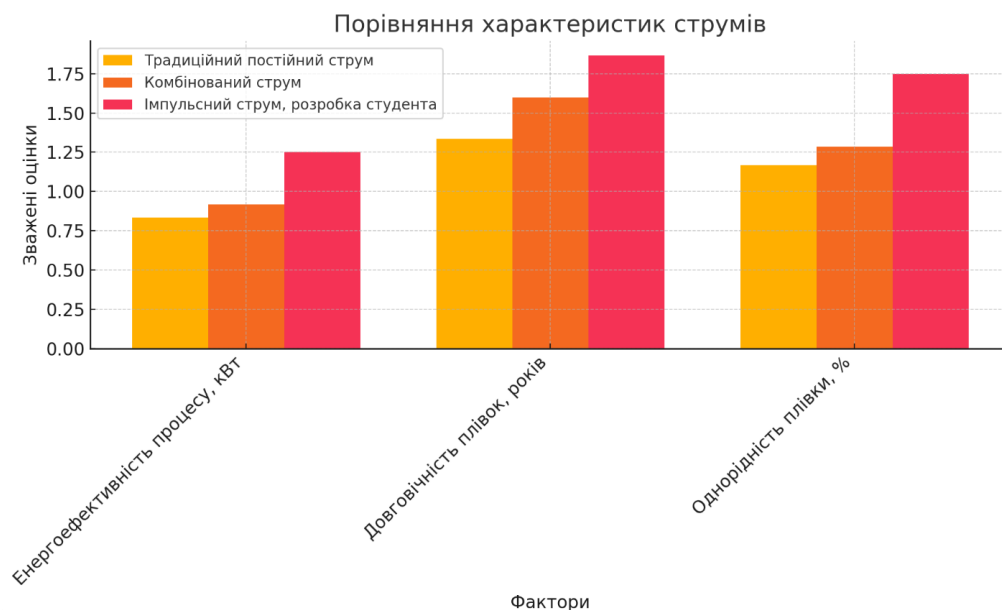


Рисунок 5.1 – Візуалізація даних методом Шонфільда

Запропонована технологія є лідером за ключовими параметрами, а саме «довговічність плівки» та «однорідність плівки». У поєднанні з найкращим показником за фактором «енергоефективність процесу», ця технологія є конкурентною на ринку анодних покриттів алюмінію та його сплавів.

Однак, для досягнення найкращих результатів та зміцнення позицій на ринку, необхідно продовжувати вдосконалення процесу. Зокрема, слід шукати рішення для оптимізації витрат на впровадження технології, що дозволить знизити собівартість і зробити її ще більш доступною для потенційних клієнтів.

Завдяки високим показникам за ключовими факторами, ця технологія має всі шанси стати лідером у сфері виробництва високоякісних анодних покриттів.

5.3. Визначення потенційних споживачів та карта бізнес процесів

Розроблена технологія впливу імпульсного режиму струму на характер та властивості твердих анодних плівок на поверхні алюмінію має вузькоспеціалізоване застосування, орієнтоване на потреби високотехнологічних галузей. Основними потенційними споживачами є військова та авіаційна галузі, які потребують матеріалів з високою міцністю, довговічністю та стійкістю до корозії.

У військовій галузі технологія може бути адаптована для виготовлення бронетехніки, літальних апаратів, морських суден та безпілотників. Вона також може бути використана для покриття деталей зброї, що забезпечує їх зносостійкість навіть у екстремальних умовах експлуатації.

В авіаційній галузі технологія є незамінною для покриття деталей літаків, вертольотів, а також космічних апаратів. Високоякісні анодні плівки забезпечують стійкість до корозії та механічних навантажень, що критично важливо для авіаційної техніки. Покриття, виготовлені за цією технологією, дозволяють значно продовжити термін служби конструкцій і підвищити їхню надійність.

На даний момент, в умовах війни, головним споживачем продукції, виготовленої за цією технологією, є держава. Співпраця з державою може бути реалізована через механізм держоборонзамовлення, що дозволить інтегрувати технологію у військове виробництво та сприяти зміцненню обороноздатності країни.

Крім того, дана технологія має великий потенціал для виходу на міжнародний ринок, де можливе партнерство з іноземними оборонними підприємствами, авіаційними корпораціями та постачальниками. У перспективі співпраця з

міжнародними військовими та авіаційними виробниками відкриває можливості для використання технології у виробництві стратегічно важливої техніки. Це забезпечить не лише розширення ринків збуту, а й підвищення статусу підприємства як інноваційного лідера у галузі анодного покриття.

5.4. Фінансові складові проєкту

Для визначення оптимальної ціни на продукт проєкту необхідно провести розрахунок вартості інноваційної пропозиції за допомогою базових методів ціноутворення.

Інформація щодо загальної кількості обладнання, необхідного для реалізації технологічного процесу, представлена в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6

Розрахунок вартості придбання та монтажу нового обладнання

№	Назва обладнання	Кількість одиниць	Вартість, грн/од
1.	Ванна промивання в холодній воді	4	12 000
2.	Ванна промивання в теплій воді	2	25 000
3.	Ванна хімічного знежирення	1	40 000
4.	Ванна травлення	1	35 000
5.	Ванна освітлення	1	35 000
6.	Ванна електрохімічного анодування	1	120 000
7.	Хімічний насос	1	54 000
8.	Будівлі і споруди	—	400 000
9.	Трубопровід	—	60 000
10.	Нематеріальні активи	—	80 000
Всього			861 000

Розрахуємо амортизацію основних фондів:

- Амортизація будівель та споруд:

$$A_{\text{б.с.}} = \frac{H_{\text{б.с.}}}{T_{\text{ек}}} = \frac{400\,000}{200} = 20\,000 \text{ грн/рік}$$

- Амортизація приладів та обладнання:

$$A_{\text{обл.}} = \frac{H_{\text{обл.}}}{T_{\text{ек}}} = \frac{382\,000}{5} = 76\,400 \text{ грн/рік}$$

- Амортизація нематеріальних активів:

$$A_{\text{нм.ак.}} = \frac{H_{\text{нм.ак.}}}{T_{\text{ек}}} = \frac{80\,000}{12} = 6\,667 \text{ грн/рік}$$

- Амортизація трубопроводів:

$$A_{\text{тр.}} = \frac{H_{\text{тр.}}}{T_{\text{ек}}} = \frac{60\,000}{12} = 5\,000 \text{ грн/рік}$$

- Всього:

$$A = 20\,000 + 76\,400 + 6\,667 + 5\,000 = 108\,067 \text{ грн/рік}$$

Для розрахунку витрат електроенергії врахуємо наступні складові:

- Джерело імпульсного струму для анодування;
- Хімічний насос;
- Система вентиляції;
- Освітлення.

Сумарна потужність обладнання для даного виробництва становить 20 кВт, що відносить підприємство до другого класу напруги. У цьому випадку вартість електроенергії становить 160 грн/кВт·год [15].

Добові витрати електроенергії, при роботі у одну 8-годинну зміну, розраховуються за формулою:

$$W_{\text{доб}} = 20 \cdot 8 = 160 \text{ кВт·год}$$

Річні витрати електроенергії, за умови роботи підприємства 260 днів на рік, складатимуть:

$$E_{річ} = 160 \cdot 160 \cdot 260 = 6\,656\,000 \text{ грн/рік}$$

Організаційна схема підприємства, що функціонує як гальванічний цех, представлена на рисунку 5.2.

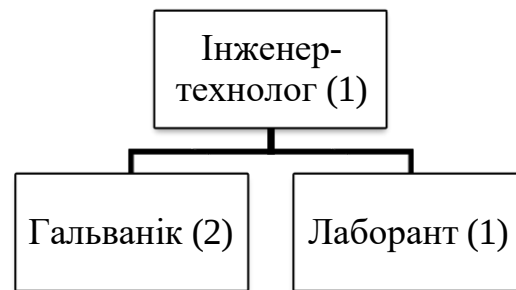


Рисунок 5.2 – Схема організації гальванічного цеху

Із 1 квітня 2024 року набрав чинності Закон України «Про Державний бюджет України на 2024 рік».

Зазначеним документом встановлено мінімальну заробітну плату: – у місячному розмірі: з 1 квітня – 8000 грн грн; – у погодинному розмірі: з 1 квітня – 48 грн [16].

Таблиця 5.7

Фонд заробітної плати цеху гальванічних покриттів.

Посада	К-сть осіб	Тарифний розряд	Тарифний коефіцієнт	Тарифна ставка, грн./год.	Заробітна плата, грн	
					За день	За рік
Інженер-технолог	1	22	4,06	194.88	1 559	405 350
Гальванік	2	16	2,79	133.92	2 143	557 107
Лаборант	1	11	1,97	94.56	757	196 685
Всього	4	—			4 458	1 159 142

Нарахування в єдиний соціальний внесок (ЄСВ):

$$H=3П \cdot 0.22=1\,159\,142 \cdot 0.22 = 254\,011 \text{ грн/рік}$$

Фонд оплати праці (ФОП):

$$\text{ФОП}=3П+ЄСВ=1\,159\,142 + 254\,011 = 1\,413\,154 \text{ грн}$$

Для визначення оборотних засобів підприємства проведемо розрахунок матеріалів, необхідних для технологічного процесу (табл. 5.8).

Таблиця 5.8

Річні витрати матеріалів для розглянутої технології.

Найменування	Ціна, грн/кг (л)*	Витрата на рік, кг (л)*	Вартість, грн
Сульфатна кислота 22%	19,8*	1000*	19 800
Alufinish E122	350	20	7 000
Натрій їдкий	28,4	100	2 840
Сульфатна кислота 44,5%	39,6	200*	7 920
H ₂ O ₂ 35%	93	100*	9 300
Титанові катоди ВТ-10	1 450	8	11 600

Вода	30 грн/м ³	8 000м ³	240 000
Електроенергія	8 грн/кВт	16 000 кВт	128 000
Всього			424 460

Для визначення загальних оборотних засобів (ОбЗ) підприємства використовуємо формулу:

$$O_{\text{бз}} = V_{\text{сир.}} + E_{\text{річ.}} + \text{ФОП} + N$$

Де:

$V_{\text{сир.}}$ — вартість сировини,
 $E_{\text{річ.}}$ — річні витрати на електроенергію,
 ФОП — фонд оплати праці,
 N — нарахування на ЄСВ.

Підставляючи дані:

$$O_{\text{бз}} = 424\,460 + 6\,656\,000 + 1\,413\,154 + 254\,011 = 8\,747\,625 \text{ грн/рік}$$

Витрати на майбутню науково-дослідну роботу (НДР) становитимуть 10% від собівартості виробництва, тоді НДР становитиме:

$$\text{НДР} = 0,1 \cdot (A + O_{\text{бз}}) = 0,1 \cdot (108\,067 + 8\,747\,625) = 885\,569 \text{ грн/рік},$$

Звідси, собівартість проекту складає:

$$C = A + O_{\text{бз}} + \text{НДР} = 108\,067 + 8\,747\,625 + 885\,569 = 9\,741\,261 \text{ грн/рік}$$

Капіталовкладення:

$$K = O_{\text{ф}} + O_{\text{бз}} = 861\,000 + 8\,747\,625 = 9\,608\,625 \text{ грн}$$

Собівартість одиниці продукції:

$$C_{\text{од}} = \frac{C}{P_p} = \frac{9\,741\,261}{1090} = 8940 \text{ грн}$$

, де P_r — це річна програма, яку підприємство повинно реалізувати за цією технологією в квадратних метрах на рік.

Для визначення ринкової вартості аналогічного покриття проведено аналіз ринку гальванічних покриттів. Встановлено, що вартість твердого анодного покриття на одну трубу від блоку Б-13 складає 28000 грн гривень за квадратний метр.

Запланований рівень рентабельності при реалізації продукту:

$$P = 70\%$$

Гранична собівартість становить:

$$P = \frac{\Pi}{C} = \frac{Ц - C}{C}, \text{ звідки}$$

$$0,70 = \frac{28\,000 - C}{C}, \text{ тоді}$$

$$C = 8400 \text{ грн/м}^2$$

Коефіцієнт економічної ефективності:

$$E = \frac{\Pi}{K} = \frac{(28000 - 8400) \cdot 1090}{9\,608\,625} = 2.22\%$$

Період повернення капіталовкладень:

$$T = \frac{1}{E} = \frac{1}{2.22} = 0,45 \text{ роки}$$

Проведемо розрахунок вірогідної вартості технологічного процесу на ринку, використовуючи три різні методи [14].

Витратний метод розрахунку вартості технологічного процесу ґрунтується на оцінці витрат і визначається як середній рівень прибутку для конкретного

продукту.

$$\Pi = C + \text{фіксований відсоток прибутку (від собівартості)};$$

$$C = 9\,741\,261 \text{ грн};$$

$$\Pi = C \cdot 0,04 = 9\,741\,261 \cdot 0,04 = 389\,650 \text{ грн};$$

$$\Pi = 10\,130\,911 \text{ грн};$$

$$\Pi_{\text{вир.}} = \frac{10\,130\,911}{1090} = 9\,294 \text{ грн/м}^2$$

Агрегатний метод застосовується для товарів із складових елементів:

$$\Pi_{\text{агр.}} = \frac{A + \text{ОБЗ} + \text{ФОП}}{P_p} = \frac{108\,067 + 8\,747\,625 + 1\,413\,154}{1090} = 9\,421 \text{ грн/м}^2$$

На підставі точці беззбитковості ($\Pi = 0$):

$$\Pi_{\text{т.без.}} = \frac{C}{P_p} = \frac{9\,741\,261}{1090} = 8\,937 \text{ грн/м}^2$$

Параметричний метод – це підхід, який дозволяє враховувати якісні характеристики товару, їхню значущість та оцінку цих характеристик з боку споживача.

$$\Pi_{\text{парам}} = \Pi_{\text{базові моделі}} \times \frac{\text{Балова оцінка нової моделі}}{\text{Балова оцінка базової моделі}}$$

Проведемо оцінку різних технологій анодування алюмінієвих сплавів за такими критеріями:

1 – енергоефективність процесу;

2 – довговічність покриття;

3 – однорідність плівки.

Для аналізу розглянемо наступні методи анодування:

- **А** – технологія з використанням традиційного постійного струму;
- **Б** – комбінований метод (поєднання постійного і імпульсного струму);
- **С** – інноваційна розробка студента, що використовує імпульсний режим струму.

Таблиця 5.9

Оцінки вагомості показників для підприємств

Показник	Вагомість показників для підприємств		
	А	Б	С
1	1,25	1,10	0,85
2	1,20	1,35	1,50
3	1,40	1,30	1,60

Середнє значення ціни на ринку – 28 000 грн/м²

Розрахуємо ціну за параметричним методом:

$$C_{\text{парам.}} = 8400 + \frac{0,85+1,50+1,60}{1,25+1,20+1,40} = 8401 \text{ грн/м}^2$$

Формування оптимальної ринкової ціни

Методи ціноутворення	Прогнозна ціна, грн/м ²	Плановий прибуток, грн	Максимально допустима собівартість, грн
Витратний	9 294	894	8 400
Параметричний	8401	1	
Агрегатний	9 421	1 021	
На підставі точки безбитковості	8 937	537	
Оптимальні величини	9 294	894	

У межах дослідження було проведено економічне обґрунтування оптимальної ціни на вироби, покриті анодними плівками. На основі отриманих результатів, найбільш доцільним було обрано агрегатний метод ціноутворення.

Ринкова ціна виробу з анодною плівкою, визначена за цим методом, становить 9 421 грн/м², що дозволяє забезпечити максимальний річний прибуток. Розрахунок проводився за формулою:

$$\text{Пріч.} = \text{Цагр.} \cdot \text{Рр}$$

де:

Цагр. — агрегатна ціна за квадратний метр, що дорівнює 9 421 грн/м²;

Рр — річний обсяг реалізації, який становить 1 090 м².

$$\text{Пріч.} = 9\,421 \cdot 1\,090 = 10\,268\,890 \text{ грн/рік.}$$

Розрахунок демонструє, що річний прибуток становить:

Таким чином, результати економічного аналізу підтверджують ефективність використання імпульсного режиму струму, що сприяє створенню високоякісних

анодних плівок на поверхні алюмінію, покращуючи їх властивості, конкурентоспроможність та забезпечуючи високий рівень прибутковості при їх реалізації.

Висновки

У магістерській дисертації проведено комплексне дослідження процесів твердого анодування алюмінію марки АД-31 в сульфатному електроліті, з акцентом на використанні імпульсного режиму струму. Основною метою роботи було вивчення впливу імпульсного режиму струму на властивості оксидної плівки та визначення оптимальних параметрів для отримання високоякісних покриттів.

Результати досліджень показали, що імпульсний режим струму значно впливає на характеристики анодних плівок. Зокрема, плівки, отримані в імпульсному режимі, відзначаються підвищеною твердістю (на 20–30% більше порівняно з постійним струмом), щільною безпористою структурою та більш рівномірною поверхнею. Це забезпечує високу корозійну стійкість, міцність і зносостійкість покриттів, що підтверджено серією експериментальних випробувань.

Було встановлено, що завдяки циклічному характеру імпульсного струму покращується кінетика процесу анодування, зростає товщина плівки, і знижуються ризики утворення дефектів. Плівки отримані в постійному режимі, мали вищу пористість, що обмежує їх використання в умовах високих механічних або корозійних навантажень.

Практичне значення роботи полягає у впровадженні технології анодування з використанням імпульсного струму для створення зносостійких покриттів. Це відкриває нові можливості для застосування анодних плівок у воєнній промисловості, авіації, електроніці та інших галузях. Наприклад, запропонована методика дозволяє значно покращити експлуатаційні властивості алюмінієвих деталей, таких як направляючі для ракетних пускових блоків, підвищуючи їхню довговічність та стійкість до агресивних середовищ.

Отримані результати та розроблені технологічні рішення роблять вагомий внесок у розвиток електрохімічних технологій та можуть бути використані для оптимізації виробничих процесів у галузях, де важлива надійність і довговічність матеріалів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Методичні вказівки до лабораторної роботи за темою «Електрохімічне оксидування алюмінію і його сплавів» для студентів спеціальності «Технічна електрохімія» денної та заочної форм навчання / уклад.: О.І. Пилипенко. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – 36 с.
2. Aerts, T. (2009). *Study of the Influence of Temperature and Heat Transfer during Anodic Oxide Growth on Aluminum* (Doctoral dissertation, Vrije Universiteit Brussel).
3. Якименко Г. Я. Технічна електрохімія. – Ч.3. Гальванічні виробництва: підруч. / Якименко Г. Я., Артеменко В. М. За ред. Б. І. Байрачного. – Харків : НТУ «ХП», 2006. – 272 с.
4. Хімічна корозія та захист металів : навчальний посібник / [П. І. Стоєв, С. В. Литовченко, І. О. Гірка, В. Т. Грицина]. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. – 216 с.
5. Технологія нанесення неметалевих покриттів та виробництво плат друкованого монтажу [Електронний ресурс] : підручник / Л. А. Яцюк, О. В. Косогін, Д. Ю. Ущатовський, О. В. Ліночева, Ю. Ф. Фатєєв; Електронні текстові дані (1 файл: 6,9 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. – 330 с.
6. Дослідження впливу параметрів плазмо-електролітного оксидування на функціональні властивості гетерооксидних покриттів / І. І. Степанова [та ін.] // Вісник Національного технічного університету "ХП". Сер. : Хімія, хімічна технологія та екологія = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Chemistry, Chemical Technology and Ecology : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХП", 2023. – № 2 (10). – С. 3-8.
7. Student, M.; Pohrelyuk, I.; Padgurskas, J.; Rukuiža, R.; Hvozdet's'kyi, V.; Zadorozhna, K.; Veselivska, H.; Student, O.; Tkachuk, O. Abrasive Wear

- Resistance and Tribological Characteristics of Pulsed Hard Anodized Layers on Aluminum Alloy 1011 in Tribocontact with Steel and Ceramics in Various Lubricants. *Coatings* 2023, 13, 1883
8. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=54205 (date of access: 06.12.2024).
 9. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Корозія металів», розділ «Неметалеві покриття» для студентів спеціальності 25.03.00 «Технологія електрохімічних виробництв» усіх форм навчання / Укл.: В. Ф. Панасенко, Ю. Ф. Фатєєв, Л. А. Яцюк, Т. І. Мотронюк. – К.: КПІ, 1994. – 36 с.
 10. Холявко В. В. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів галузі знань 13 – Механічна інженерія спеціальності 132 – Матеріалознавство денної та заочної форм навчання / В. В. Холявко, І. А. Владимирський, О. О. Жабинська. – Київ: Центр учбової літератури, 2016. – 100 с
 11. Норми тривалості робочого часу на 2023 рік URL: <https://www.buhoblik.org.ua/kadry-zarplata/vremya/4282-normativnostirobochogo-chasu-2023.html>. (date of access: 06.12.2024).
 12. Методичні вказівки до виконання дипломного проекту з гальванотехніки освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр”. Напрямок 6.091600 “Хімічна технологія та інженерія”. Професійна спрямованість “Технічна електрохімія”. / Уклад. Л.А. Яцюк, В.П. Чвірук, В.Ф.Панасенко, Т.І. Мотронюк, О.В. Лінючева, О.І. Букет. – К: НТУУ "КПІ", 2019. – 54 с.
 13. Технологічні та енергетичні розрахунки з гальванотехніки при дипломному проектуванні. навчальний посібник. Для студентів спеціальності 7.091603 - ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОХІМІЯ / Уклад. Л.А. Яцюк, В.П. Чвірук, В.Ф. Панасенко, І.Ф. Хірх-Ялан, Т.І. Мотронюк, М.І. Донченко, О.І. Букет, О.В. Лінючева. – К.: НТУУ"КПІ", 2008. - 100с.

14. О.А. Підлісна, Ю.В. Тюленєва. Економічна частина магістерської дисертації: розроблення стартап-проекту: [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія»; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 0,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 32 с.
15. Рівні цін на універсальні послуги для побутових та малих непобутових споживачів URL: <https://koec.com.ua/page?root=23> (date of access: 06.12.2024).
16. Закон України «Про Державний бюджет України на 2023 рік» URL: <https://dp.tax.gov.ua/media-ark/news-ark/638718.html> (date of access: 06.12.2024).