

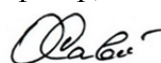
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ О. М. БЕКЕТОВА**

Інститут ННІ Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра Хімії та інтегрованих технологій
Освітній рівень перший (бакалаврський)
Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри ХітІТ

професор, докт. техн. наук Саввова О. В.



«22» 06 2026 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Тема роботи: «Електрохімічні процеси одержання функціональних оксидних покриттів на титані»

Шифр роботи ХіТк 2022-1 3
(група, номер теми за наказом)

Виконавиця Владико Олександра Олександрівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник доцент Пилипенко Олексій Іванович
(посада, прізвище, ім'я, по батькові)

Харків 2026

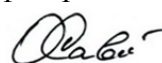
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ О. М. БЕКЕТОВА**

Інститут ННІ Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра Хімії та інтегрованих технологій
Освітній рівень перший (бакалаврський)
Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри ХтаІТ

професор, докт. техн. наук Саввова О. В.



«22» 06 2026 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА ЗДОБУВАЧІ**

Владико Олександрі Олександрівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: «Електрохімічні процеси одержання функціональних оксидних покриттів на титані»

керівник роботи: Пилипенко Олексій Іванович, кандидат технічних наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом вищого закладу освіти від «08» травня 2026 р. № 399-03

2. Строк подання студентом роботи 20 червня 2026 року









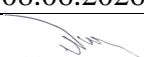
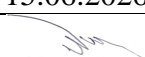



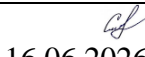
3. Вихідні дані до роботи: дослідити процеси формування оксидних плівок на сплаві Ti6Al4V у цитратних електролітах.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) (провести огляд літератури за темою роботи; опрацювати методику проведення експериментальних досліджень; дослідити вплив параметрів електролізу на динаміку утворення оксидних плівок на сплаві Ti6Al4V; оцінити шкідливі й небезпечні фактори, які можуть виникати під час роботи в лабораторії та запропонувати заходи захисту від їхнього шкідливого впливу; розрахувати собівартість виконання роботи).

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

Презентація – 10 слайдів

6. Консультанти розділів роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Огляд літературних джерел	Пилипенко О. І., доцент	 18.05.2026	 25.05.2026
Методика експерименту	Пилипенко О. І., доцент	 18.05.2026	 25.05.2026
Експериментальні результати та їх обговорення	Пилипенко О. І., доцент	 25.05.2026	 08.06.2026
Охорона праці	Логвінков С., професор	 08.06.2026	 15.06.2026
Економічний розрахунок	Пилипенко О. І., доцент	 08.06.2026	 15.06.2026
Нормоконтроль	Пилипенко О. І., доцент	 15.06.2026	 19.06.2026
Показник оригінальності ДР	Скрипинець А. В., доцентка	 16.06.2026	 16.06.2026

7. Дата видачі завдання 18.05.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


Номер етапу	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Постановка проблеми і завдань дослідження	25.05.2026	
2	Огляд літературних джерел, вибір методик досліджень	25.05.2026	
3	Проведення досліджень, аналіз результатів	08.06.2026	
4	Підготовка розділів з охорони праці та економічного обґрунтування	15.06.2026	
5	Оформлення пояснювальної записки	18.06.2026	
6	Підготовка презентації, доповіді по ДР та інших супроводжуючих документів	19.06.2026	
7	Подання ДР на допуск до захисту	22.06.2026	
8	Захист ДР	25.06.2026	

Студентка


(підпис)

Владико О. О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Пилипенко О. І.
(прізвище та ініціали)


**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ О. М. БЕКЕТОВА**

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
бакалавра
(освітній рівень)


на тему: «Електрохімічні процеси одержання функціональних оксидних покриттів на титані»

Виконала студентка 4 курсу, групи XiTk_2022-1
спеціальності

161 Хімічні технології та інженерія
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 Владико О. О.
(підпис, прізвище та ініціали)

Керівник  Пилипенко О. І.
(підпис, прізвище та ініціали)

Рецензент  Скрипинець А.В.
(підпис, прізвище та ініціали)

Харків 2026

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до ДР: 71 с., 7 рис., 10 табл., 34 джерел, 4 додатки

Ключові слова: ТИТАНОВІ СПЛАВИ, АНОДУВАННЯ, ЦИТРАТНА КИСЛОТА, ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ ОКИСНЕННЯ, АНОД, ОКСИДНА ПЛІВКА, ЕЛЕКТРОЛІЗЕР, БІОАКТИВНИЙ МАТЕРІАЛ, ЕЛЕКТРОЛІЗ

У роботі наведені загальні відомості про титан, титанові сплави, описані області їхнього використання, переваги біоактивних та біоінертних матеріалів на основі титану, способи їхнього отримання. Окремий розділ роботи присвячений опису процесу електрохімічного оксидування (анодування) титану, де наведені основні типи електролітів та режими обробки металу, які використовуються для отримання оксидних плівок на титанових матеріалах. Опрацьована методика електрохімічного оксидування титану та проведені експериментальні дослідження, направлені на визначення впливу умов проведення електролізу (напруги формування оксиду, концентрації електроліту, анодної густини струму) на динаміку утворення оксидних плівок на сплаві Ti6Al4V у цитратних електролітах. Також у роботі проаналізовані ризики створення шкідливих та небезпечних факторів, які виникають під час роботи в лабораторії, й описані заходи з їхнього усунення. Виконаний розрахунок дозволив оцінити собівартість проведення дослідної роботи, що є підґрунтям для подальшого техніко-економічного розрахунку.

ABSTRACT

Explanatory note to DW: 71 pp., 7 figures, 10 tables, 34 sources, 4 additions

Key words: TITANIUM ALLOYS, ANODING, CITRIC ACID, ELECTROCHEMICAL OXIDATION, ANODE, OXIDE FILM, ELECTROLYZER, BIOACTIVE MATERIAL, ELECTROLYSIS

The work provides general information about titanium, titanium alloys, describes the areas of their use, the advantages of bioactive and bioinert materials based on titanium, and methods for their production. A separate section of the work is devoted to the description of the process of electrochemical oxidation (anodization) of titanium, which presents the main types of electrolytes and metal processing modes used to obtain oxide films on titanium materials. The methodology for electrochemical oxidation of titanium has been developed and experimental studies have been conducted to determine the influence of electrolysis conditions (oxide formation voltage, electrolyte concentration, anodic current density) on the dynamics of oxide film formation on the Ti6Al4V alloy in citrate electrolytes. The work also analyzes the risks of creating harmful and dangerous factors that arise during laboratory work and describes measures to eliminate them. The calculation made allowed us to estimate the cost of conducting experimental work, which is the basis for further technical and economic calculations.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Розділ 1 Огляд літературних джерел.....	6
1.1 Загальні відомості про титан.....	6
1.2 Сплави на основі титану.....	7
1.3 Використання титану та його сплавів у медичній галузі.....	10
1.4 Біоматеріали на основі титану	12
1.5 Титанові біоматеріали для серцево-судинної системи та імплантованих пристроїв.....	14
1.6 Способи формування біоінертних та біоактивних покриттів на титані	15
Розділ 2 Електрохімічне оксидування титану	20
Розділ 3 Методичні основи електрохімічного оксидування титанового сплаву	28
3.1 Попередня підготовка	28
3.2 Знежирення	28
3.3 Травлення.....	29
3.4 Електрохімічне оксидування	30
Розділ 4 Експериментальні результати	32
Розділ 5 Охорона праці	42
5.1 Загальна характеристика шкідливих і небезпечних факторів .	41
5.1.1 Вимоги безпеки перед початком роботи	41
5.1.2 Вимоги безпеки під час роботи	42
5.1.3 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів	42
5.1.4 Вентиляція та кондиціонування.....	43
5.1.5 Вимоги безпеки під час роботи з електрохімічним обладнанням.....	44
5.1.6 Засоби індивідуального захисту	44

5.1.7 Пожежна безпека.....	45
5.1.8 Вимоги безпеки після закінчення роботи.....	46
5.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях (НС).....	47
Розділ 6 Розрахунок собівартості виконання дипломної роботи.....	51
6.1.1 Розрахунок матеріальних витрат.....	51
6.1.2 Розрахунок енергетичних витрат.....	52
6.1.3 Розрахунок витрат води.....	53
6.1.4 Розрахунок амортизації основних фондів і нематеріальних активів.....	54
6.1.5 Розрахунок витрат на малоцінні та витратні матеріали.....	54
6.1.6 Витрати на оплату праці і відрахування на соціальні заходи	55
6.1.7 Витрати на відрядження, контрагентські роботи і сторонні послуги, накладні витрати.....	55
6.1.8 Кошторис витрат на проведення науково-дослідної роботи	56
Висновки.....	57
Список використаних посилань.....	58
Додатки.....	62
Додаток А. Тези доповіді Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій в умовах кризових ситуацій».....	63
Додаток Б. Матеріали XVIII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сталий розвиток міст: поствоєнний період» (90-ї науково-технічної конференції ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.....	65
Додаток В. Матеріали XIX Всеукраїнської науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти «Сталий розвиток міст: пост воєнний період».....	68
Додаток Г. Довідка щодо перевірки кваліфікаційної роботи студентав інформаційній онлайн-системі «StrikePlagiarism».....	70

ВСТУП

Сучасний ринок виробництва та використання титану та його сплавів характеризується динамічним зростанням. Це вказує на те, що він стає стратегічно важливим сектором світової економіки. Пов'язана така ситуація з тим, що титанові матеріали мають унікальне поєднання фізико-хімічних властивостей.

Серед них варто відмітити виняткову питому міцність, корозійну стійкість, біосумісність. Все це робить титан незамінним матеріалом для високотехнологічного виробництва у тому числі й медицині, де спостерігається стрімкий ріст використання металу в галузі створення імплантатів та інструментарію.

Тенденції розвитку титанової галузі у 2024–2030 роках мають чітку орієнтацію на технологічну модернізацію виробництв та забезпечення екологічних вимог. Також впроваджуються нові методи обробки титану, зокрема адитивні технології (3D-друк), які дозволяють оптимізувати витрати металу та підвищити якість виробленої продукції.

Зростає роль екологічних стандартів: титанова галузь прагне до зниження, у першу чергу, енергоємності виробництва, зменшення кількості відходів, впровадженню технологій переробки відходів титану. Зниження собівартості виробництва титану відкриває можливості його більш широкого використання для заміщення легованих сталей та алюмінію у масовому виробництві, наприклад, будівництві та електроніці.

Окреме значення у формуванні ринку титану має геополітичний аспект та безпека ланцюгів постачання. Оскільки титан є стратегічним матеріалом, то провідні країни світу зосереджують свої зусилля на зменшенні залежності від зовнішніх постачальників або створенні більш стабільних логістичних шляхів. З цієї точки зору Україна, яка має значні ресурси сировини для виробництва титану, має унікальні можливості для переходу від експорту титанової руди до створення замкнутого циклу виробництва металу й продукції з високим

ступенем переробки. Для цього потрібне формування сприятливого інвестиційного клімату та державне стратегічне управління, яке дозволить інтегрувати вітчизняні потужності у світовий ринок, забезпечить сталий економічний розвиток галузі за рахунок інноваційних проривів та сприятиме задоволенню глобального попиту на цей метал.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Загальні відомості про титан

Титан – хімічний елемент з порядковим номером 22. За своїм значенням для сучасного світу його часто називають «металом майбутнього». Знаходячись у IV групі періодичної системи, він поєднує властивості, які раніше здавалися несумісними – це легкість алюмінію та міцність сталі. Маючи густину близько $4,5 \text{ г/см}^3$, титан є майже вдвічі легшим ніж залізо. Ця обставина робить використання титану критично важливим у конструкціях, маса яких має є вирішальною [1]. Висока температура плавлення ($1665\text{--}1668 \text{ }^\circ\text{C}$) дозволяє віднести титан до тугоплавких металів й дозволяє зберегти йому структурну цілісність за тих умов, коли інші легкі метали плавляться. Основні фізичні властивості титану наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні фізичні властивості титану

Матеріал	ρ , г/см^3	Міцність на розтяг, МПа	Міцність на стиснення, Па	Модуль Юнга, ГПа	Трищинність K_{Ic}	Твердість (за Кнупом)	ТКЛ P $\cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$	Енергія руйнування поверхні, Дж/м^2	Коефіцієнт Пуассона
Титан	4,52	345	250–600	117	60	1800–2600	8,7–10,1	15000	0,31
Сплав Ti-Al-V	4,40	780–1050	450–1850	110	40–70	3200–3600	8,7–9,8	10000	0,34
Сплав Ti-Al-Nb-Ta	4,40–4,80	840–1010	–	105	50-80	–	–	17000	0,32

Іншою важливою особливістю титану є його здатність змінювати структуру залежно від температури (алотропія). За нормальних умов (до температури $882 \text{ }^\circ\text{C}$) титан існує у вигляді α -модифікації, яка має щільну гексагональну кристалічну решітку, яка забезпечує його корозійну стійкість. За більш високих температур титан переходить у β -модифікацію з кубічною

об'ємно-центрованою решіткою. Цей алотропічний перехід є основою для розробки складних титанових сплавів. Змінюючи співвідношення α та β модифікацій за допомогою введення легуючих елементів, можна отримати сплави з заданою пластичністю, міцністю, термостійкістю. Але важливим моментом є чистота титану. Вона є критичною, оскільки наявності навіть мізерних домішок азоту, вуглецю, водню чи кисню роблять його більш твердим й крихким. Найбільш сильно на механічні властивості титану впливає водень. Вміст водню у кількості понад 0,015 % призводить до утворення гідридів титану, які окрихчують титан, порушуючи його структуру. Це може створити значні труднощі під час зварювання та термічної обробки титану.

Попри високу реакційну здатність, титан є одним із найбільш корозійностійких металів сучасної техніки, що обумовлене наявністю природної оксидної плівки, яка сприяє пасивації металу [2]. Оксидна плівка є тонкою (6–9 нм) і щільно вкриває поверхню металу. За порушення суцільності наночар діоксиду титану TiO_2 миттєво самовідновлюється. Оксидна плівка забезпечує стійкість металу до впливу морської води, вологого повітря, розчинів солей, лугів. Титан є стійким у нітратній кислоті, але розчиняється у її суміші із фторидною (плавиковою) кислотою, гарячій сульфатній кислоті, кислих розчинах фторидів.

Широке застосування титану знайшов у медицині, що обумовлене насамперед його майже повною біоінертністю. Це означає, що організм людини не сприймає титану його як чужорідне тіло й не обумовлює появи запальних реакцій, що дозволяє використовувати метал для виготовлення зубних імплантатів, штучних суглобів, серцевих клапанів, які добре взаємодіють із живою тканиною [3].

1.2 Сплави на основі титану

Хімічний та мікроструктурний склад титанових сплавів. Особливу увагу під час формування мікроструктури титанових сплавів мають α - і β -модифікації

(фази), а також границі їхніх меж та включення карбідів. У α -сплавах титану переважає кристалічна структура, притаманна α -фазі, що забезпечує високу корозійну стійкість і густину сплавів. β -сплави мають більшу пластичність й високу міцність завдяки наявності β -фази у вигляді решітки кубічного типу.

Розподілом та розміром включень легуючих елементів у мікроструктурі титану можна керувати за допомогою методів теплової обробки (зокрема, за рахунок швидкого охолодження або старіння). Вказані підходи дозволяють отримати оптимальну дисперсну структуру сплаву з підвищеними міцнісно-пластичними характеристиками. Співвідношення фаз й структура мають вирішальне значення для забезпечення високої стійкості сплавів до механічних навантажень і температури. Саме тому мікроструктурний і хімічний склад сплавів титану пов'язані між собою і є ключовими факторами для визначення їхніх експлуатаційних характеристик під час реалізації складних інженерних рішень.

Внаслідок низької теплопровідності та високої хімічної активності за підвищених температур титан потребує спеціальних умов плавки (вакуумно-дугова плавка або плавка в інертному середовищі) й особливих режимів механічної обробки [4]. Титанові сплави мають низький модуль пружності (приблизно вдвічі менший, ніж у сталі), що сприяє "пружиненню" виробів й робить їх ідеальним матеріалом для виготовлення медичних імплантатів, бо такий модуль близький до цього показника людської кістки.

Механічні властивості сплавів залежать від їхнього хімічного складу, мікроструктури, умов обробки. Основними механічними характеристиками сплавів є міцність, твердість, пластичність, зносостійкість, а також коефіцієнт деформування. Залежність цих параметрів від складу сплаву зумовлює широкі можливості вибору сплавів для забезпечення конкретних вимог.

Зростання вмісту α - та β -стабілізаторів у складі сплавів сприяє зміні їхньої мікроструктури та механічних властивостей. Наприклад, збільшення частки α -фази зазвичай підвищує міцність і твердість сплаву, однак може призвести до зниження його пластичності. Водночас, β -сплави мають більшу

пластичність та здатні до пластичної деформації, що робить їх придатними для технологій обробки та формування.

Велике значення для забезпечення необхідних механічних властивостей виробів мають температури обробки. Термічна обробка (зокрема, швидкість охолодження та швидкість фазових перетворень) дозволяють змінювати мікроструктуру сплавів, підвищувати їх міцність і жорсткість або зберігати високу пластичність [5]. Контроль термічної обробки є ключовим фактором виробництва високоякісних титанових виробів.

Класифікація сплавів титану є важливою з точки зору їхнього дослідження та застосування; вона визначається їхніми фізико-механічними характеристиками і сферами використання. Основним критерієм класифікації сплавів є їхня структура, яка залежить від природи присутніх фаз та їхньої взаємодії. Виходячи з цієї точки зору виділяють три основні різновиди сплавів титану: α -, α - β та β -сплави.

α -сплави характеризуються переважним вмістом α -фази (гексагональної щільноупакованої кристалічної решітки), яка має високу корозійну стійкість та здатна зберігати міцність за високих температурах. Такі сплави характеризуються зварюваністю, високою пластичністю. З α -сплавів виготовляють деталі або вироби, які використовують за високих навантажень і температур.

α - β сплави є сумішами, що містять обидві фази за різних співвідношень. Це забезпечує баланс між пластичністю та високою міцністю сплаву, що сприяє зниженню ризику виникнення тріщин у деталях за механічних навантажень. Структура таких сплавів утворюється під дією подаваних легуючих елементів (наприклад, олова чи алюмінію) та застосування термообробки.

β -титанові сплави характеризуються наявністю β -фази із кубічною решіткою, що забезпечує високі гнучкість та пластичність. Сплави мають високу міцність за одночасного збереження здатності до обробки й зварювання. Важливою особливістю β -сплавів є необхідність ретельного контролю термомеханічної обробки, призначеної для стабілізації їхньої мікроструктури,

оскільки такі сплави надають можливість широкої зміни властивостей, які можна обирати залежно від подальшого застосування.

Окремо слід відзначити леговані сплави титану, які містять молібден, ванадій, цинк, введення яких дозволяє підвищити їхню стійкість під час використання у агресивних середовищах чи за високих температур [6, 7]. Вибір конкретного титанового сплаву залежить від призначення виробу та умов експлуатації, що визначає режим та тип обробки матеріалу.

Титанові сплави α та α - β -систем займають значне місце у галузі розробки матеріалів з підвищеними механічними властивостями та хімічною стійкістю. Залежно від їхнього складу та структури, ці сплави класифікують за фазовими діаграмами, які дозволяють визначити їхні властивості та можливі застосування.

1.3 Використання титану та його сплавів у медичній галузі

Медичні титанові сплави зараз є безальтернативними матеріалами, які використовуються у сучасній індустрії охорони здоров'я [8]. Як цінний конструкційний матеріал, титан є основою для розробки кісткових імплантатів, функціональних матеріалів, високотехнологічного медичного інструменту. Основною домінантою титанових матеріалів у медичній галузі є унікальний комплекс його характеристик. Серед них основне значення мають низька густина, висока питома міцність, виняткова хімічна стійкість у біологічних середовищах, низький модуль еластичності та біосумісність [9].

Біосумісність титану забезпечує його беззаперечну перевагу над іншими сплавами або чистими металами, такими як леговані (нержавіючі) сталі або кобальто-хромові сплави. Однак у титанових матеріалів є й недоліки; вони пов'язані із низькою зносостійкістю та особливостями механічної обробки металу [10].

Світовий попит на медичні титанові сплави демонструє стабільну висхідну динаміку. Досвід провідних країн вказує на те, що майбутнє ринку

медичних імплантатів буде належати біоматеріалам із низьким модулем пружності. Їхні властивості максимально наближені до властивостей людської кістки.

Те ж саме можна сказати про хірургічний інструментарій матеріалознавство якого пройшло шлях від використання вуглецевої до нержавіючої сталі, а потім – медичного титану, який сьогодні визначає тенденції розробки обладнання третього покоління. Ключовою перевагою титану в цій галузі є відсутність необхідності нанесення додаткових покриттів, які руйнуються з утворенням токсичних продуктів корозії. Для захисту сталевих інструментів від корозії часто використовується, наприклад, хромування або нікелювання, проте корозія цих покриттів несе певні ризики для пацієнта [11]. Завдяки природній оксидній плівці титан має високу стійкість без додаткової поверхневої модифікації.

Сучасний арсенал хірургічних інструментів з титану включає затискачі, скальпелі, затискачі, розширювачі грудної клітки, голки. Титан марок TA1 та TA2 використовується як медичний титановий дріт (шовний матеріал). У порівнянні зі сталевим титановим дрітом мінімізує зовнішню реакцію тканин, забезпечує високу стійкість до багаторазового скручування (торсіону), знижує ризик появи запальних процесів у зоні поранення. Використання нікель-титанових сплавів з ефектом пам'яті форми дозволяє створювати шовні конструкції, які забезпечують оптимальні умови компресії тканин та прискорювати процес реабілітації.

Завдяки низькій густині та легкості титан – ідеальний матеріал для виготовлення милиць, каркасів інвалідних візків, шпильок. Це підвищує комфорт і мобільність пацієнтів і забезпечує довговічність виробів [12].

Однією з найбільш перспективних і наукомістких сфер застосування титану є стоматологія. З моменту впровадження у практику в 1990-х роках технології точного прецизійного лиття, титан витіснив імплантати з вартісних сплавів золота та срібла. Низька теплопровідність титану є перевагою та критичним фактором під час виготовлення зубних коронок, оскільки вона

захищає пульпу зуба від термічного подразнення під час прийому холодної чи гарячої їжі.

В стоматології (ортодонтії) широке поширення має сплав Ti6Al4V, однак сучасні розробки спрямовані на розробку сплавів, що не містять ванадій із-за його токсичності. Альтернативою сплаву Ti6Al4V є сплав Ti6Al7Nb, який має майже таку міцність й одночасно повну біологічну безпечність і чудову пластичність. На даний час титан використовується для виготовлення майже всіх типів виробів для протезування (імпланти, абатменти, мостоподібні протези, ортодонтичні дуги) [13].

Окремої увага приділяється розробці металокерамічних виробів на основі титану, які дозволяють повністю відновити функції зубного ряду, забезпечити стійкість кольору, естетичність та зносостійкість. Титан є оптимальним рішенням для пацієнтів, у яких спостерігається алергічні реакції на нікель, що розширює потенційне застосування даного металу в сучасній стоматології.

1.4 Біоматеріали на основі титану

Біоматеріали на основі титану мають високу біосумісність, що є ключовим фактором їхнього застосування у медичній галузі. Такі матеріали сприятливо взаємодіють з тканинами без появи запальних реакцій та відторгнення, що обумовлює їхню популярність у сучасній практиці. Причина біосумісності полягає в наявності пасивної оксидної плівки з TiO₂, яка утворюється на поверхні титанових виробів природним шляхом під впливом кисневмісних середовищ. Ця плівка є бар'єром, який пасивує титан та зменшує швидкість його корозії за тривалого перебування в організмі [14, 15]. Поверхнева модифікація титану, наприклад, наноструктурованими покриттями або штучними гідроксильованими феритними шарами, сприяє підвищенню біоактивності, стимулює прижиттєву адгезію клітин і прискорює регенеративні процеси.

Титан і титанові сплави демонструють стійкість до дії агресивних біологічних середовищ, що критично важливе для тривалої експлуатації імплантатів [16]. Завдяки стабільній оксидній плівці титанові матеріали займають майже унікальне серед інших біоматеріалів положення щодо корозійної стійкості. Це зменшує ризик утворення токсичних йонів та пошкоджень навколишніх тканин внаслідок корозії імплантату. Важливим у забезпеченні біосумісності також має здатність титану знижувати ймовірність інфекційних ускладнень й алергічних реакцій, що обумовлює його пріоритетність для проведення імплантації у фізіологічних системах.

У цілому титанові біоматеріали розробляються з урахуванням їхніх фізико-хімічних властивостей, які повинні забезпечити оптимальні умови інтеграції з тканинами організму, підвищувати ресурс імплантатів, сприяти покращенню їхньої функціональності. Тому застосування титану у медицині розширюється й відкриває нові можливості для розробки довговічних, біосумісних та безпечних імплантатів.

Ортопедичні титанові імпланти є довговічними та біосумісними виробами, які здатні витримувати значні навантаження й тривалий час залишатися стабільними й функціональними у середовищі організму. Внаслідок високої корозійної стійкості та здатності утворювати стабільну біоактивну поверхню, імпланти з титану сприяють активному приживленню та мінімізують ризик відторгнення [17].

Широко застосовуються імпланти кісткової тканини у вигляді трубок та пластин, які є механічно міцними й є зручними для використання. Вони зберігають форму та функції кістки, сприяють її природному відновленню й регенерації.

Для підвищення біоактивності застосовують поверхневу модифікацію титану спеціальними покриттями, які повинні покращити адгезію клітин, стимулювати osteoіндукцію, зменшувати ризик розвитку інфікування. Для цієї мети використовуються наношари та біоактивні покриття, що підвищують

біосумісність та забезпечують тривалу інтеграцію імплантатів з кістковою тканиною.

1.5 Титанові біоматеріали для серцево-судинної системи та імплантованих пристроїв

Титанові біоматеріали для серцево-судинної системи та імплантованих пристроїв є важливим типом сучасної медичної продукції завдяки високій біосумісності та хімічній стійкості. Їхня імплантація забезпечує відновлення функцій судин, клапанів й інших елементів кровоносної системи, знижує ризик ускладнень та відторгнення. Для виготовлення клапанів, шунтів, кардіостимуляторів використовуються міцні титанові сплави з низькою масою, що сприяє їхній довговічності та інтеграції в організм.

Використання титанових сплавів у серцево-судинних пристроях включає й розробку покриттів з біологічною активністю, які прискорюють загоєння та запобігають утворенню тромбів. Поверхнева модифікація, наноструктуровані та корозійностійкі покриття підвищують біосумісність та довговічність імплантатів у кровоносній системі.

Сучасні технології виготовлення імплантатів забезпечують мінімізацію ризиків тромбоутворення й запальних реакцій. Особлива увага приділяється дослідженню нових способів обробки поверхні титану для підвищення біоактивності. Наноструктуровані покриття сприяють активізації клітинних процесів, зменшують ризик ускладнень та підвищують ресурс роботи імплантів. Ці інновації дозволяють отримати біоматеріали, які здатні максимально ефективно та безпечно взаємодіяти з тканинами організму.

Безпечність та довговічність біоматеріалів є пріоритетними для подальших досліджень [18]. Це сприяє їхньому широкому використанню у кардіології, хірургії серцево-судинних систем, а також модернізації медицини.

1.6 Способи формування біоінертних та біоактивних покриттів на титані

Методи формування біоактивних та біоінертних покриттів засновані на розумінні особливостей взаємодії цього матеріалу із біологічними середовищами. Біоінертні покриття повинні забезпечити їхню стабільність, зменшити ризик відторгнення та корозійного руйнування. Цього можна досягнути шляхом створення захисних шарів, які будуть ізолювати метал від дії біологічного середовища [1]. Такі покриття повинні характеризуватися хімічною стабільністю та зниженою біохімічною реактивністю, що повинно зменшити імунну відповідь організму. Також важливою особливістю є здатність покриттів відповідати біомедичним викликам за рахунок утворення мінімальної кількості чужорідних ефектів [2].

Біоактивні покриття також повинні стимулювати біологічні процеси (остеоінтеграцію й регенерацію кісткових тканин). Вони повинні містити біоміметичні сполуки та мінеральні сполуки, які імітують природну кістку. Це забезпечує зв'язок імплантат з кістковою тканиною та сприяє її росту й відновленню. Основною метою використання таких матеріалів є формування умов для швидкої інтеграції імплантату в навколишні тканини, що є важливим для стоматології та ортопедії.

Залежно від задачі використовується ряд методів одержання біоактивних покриттів [19]. Для одержання біоінертних покриттів застосовуються високі температури, що дозволяє отримати жароміцні матеріали з оксидів або композитів, які забезпечують виробам міцність і довговічність. Також біоактивні покриття формують нанесенням біомінеральних сполук (гідроксиапатити, фосфатні покриття) за допомогою способів йонного імпрегнації, електрофорезу, мікродугового оксидування, напилення. Нанотехнології дозволяють одержувати наноструктуровані покриття, які мають високі біосумісність та стимулюючий вплив на ріст клітин.

Розуміння принципів взаємодії покриттів із біологічними середовищами є найважливішим фактором оптимізації методів їхнього формування та підвищення ефективного застосування у медичній практиці.

Біоінертні покриття є важливими для сучасної ортопедії та стоматології, оскільки вони запобігають виникненню небажаних біологічних реакцій з боку організму [7]. Такі покриття характеризуються хімічною стабільністю й низькою біоактивністю, які забезпечують їхню здатність мінімізувати ризики відторгнення та зменшують корозійне руйнування металу основи. Головною функцією цих покриттів є утворення бар'єрного шару, що захищає метал від дії біологічного середовища й одночасно зберігає механічну міцність.

Класифікація біоінертних покриттів заснована на їхньому хімічному складі та механізмі дії. Окисні покриття (наприклад, TiO_2) утворюють щільний і стабільний поверхневий шар, який підвищує корозійну стійкість та забезпечує біостабільність виробу. Неоксидні жароміцні покриття утворюють високотемпературні шари, використанням яких є актуальним для виробів, що використовуються за високих температур. Вони залишаються стабільними за екстремальних навантажень й тривалого використання.

Ще одним напрямком біоактивних матеріалів є покриття з композитів і оксидів, які поєднують в собі хімічну стійкість з необхідними механічними властивостями [4]. Застосування композитів (титаново-кварцових або титан-цирконієвих оксидів) дозволяє отримати біоінертні покриття з підвищеною зносостійкістю. Важливу роль у процесі одержання таких матеріалів має методика їхнього нанесення (магнітне напилення, йонне імплантування, плазмове напилення) і режими виробництва, які повинні забезпечити рівномірність та міцність покриття.

Механізм дії біоінертного покриття заключається у формуванні щільного пасивного бар'єру, який запобігає проникненню агресивних речовин до основи та зменшенні біоактивності матеріалу; це підвищує їхню стабільність у біологічних середовищах. Такі покриття неактивні відносно оточуючих тканин, що зменшує ризик їхнього відторгнення й забезпечує тривалу роботу

імплантатів зі збереженням їхньої функціональної цілісності та біологічної сумісності.

Біоактивні покриття є важливими у забезпеченні біоінтеграції й стимулюванні остеогенезу, що є ключовим фактором успішного впровадження титанових імплантатів у стоматологію та ортопедію. Механізм біоактивності базується на здатності покриттів викликати активну реакцію з біологічним середовищем та стимулювати утворення нової кісткової тканини навколо імплантату. Однією з причин такої дії є утворення біоактивних сполук, які легко інтегруються у кісткову структуру, зменшують ризик відторгнення, підвищують стабільність імплантату [5].

Для створення біоактивних покриттів використовуються йонно-колоїдні системи та біоматрикси, збагачені сполуками кальцію, які повторюють мінеральний склад природної кістки. Ці покриття сприяють стимуляції остеобластів, посилюють процеси диференціації й проліферації клітин, які проростають у нову кісткову матрицю. Гідроксиапатити кальцію та фосфати, зокрема, гідроксиапатит, є біоактивними компонентами, які формують міцне покриття із хорошими біоінтеграційними властивостями. Їхнє застосування у вигляді наноструктурованих покриттів дозволяє активізувати адгезію клітин і прискорити остеоінтеграцію.

Розробка наноструктурованих покриттів заснована на принципі підвищення біоміметичної відповідності природній поверхні, що стимулює механізми відновлення кісткової тканини. Використання сучасних способів нанесення (лазерне нашаровування, аерозольне напилення, електрохімічне осадження) дозволяє отримати рівномірні покриття із необхідними властивостями. Це дозволяє покращити біологічні властивості поверхні й її механічні властивості, що забезпечує надійну та тривалу інтеграцію із кісткою.

Критично важливою складовою ефективності біоматеріалів, які використовуються в імплантології, є взаємодія покриттів з тканинами та біомедичними середовищами. Біоінертні покриття, покликані мінімізувати реакцію-відповідь організму на чужорідне тіло, є хімічно стабільними та мають

малий рівень біоактивності. Вони зменшують ризики відторгнення імплантатів внаслідок своєї обмеженої взаємодії з біологічними тканинами, що істотно знижує швидкість корозії та реакції запалення. У той же час біоактивні покриття здатні активно взаємодіяти із оточуючими тканинами і стимулювати регенерацію та ремоделювання (особливо кісткової тканини). Вони активують перебіг біохімічних реакцій, які сприяють формуванню нових тканин й надійної остеоінтеграції [2].

Особливості взаємодії покриттів із тканинами визначаються їхнім хімічним складом, структурою та біологічною сумісністю. Біоінертні покриття здатні створювати бар'єри, які перешкоджають проникненню агресивних речовин до основи й таким чином зменшують імунну відповідь. Це є передумовою стабільності імплантату, що є особливо важливим за довгострокової експлуатації. Також вони підвищують корозійну стійкість титану в біологічних середовищах, що зменшує швидкість утворення йонів металів та викликаного ним патологічних процесів.

Біоактивні покриття здатні взаємодіяти із клітинами кісткової тканини, сприяючи їхній адгезії і проліферації. Це стимулює остеоінтеграцію та забезпечує стабільність імплантату в умовах біомедичного середовища. Важливими є біоміметичні властивості покриттів та їхня здатність підтримувати біохімічний баланс для швидшої репарації тканин. Ключову роль у формуванні необхідних покриттів мають підбір матеріалів й технологій нанесення, які повинні врахувати особливості застосування та природа біомедичного середовища.

Важливим етапом оцінки якості біоактивних і біоінертних покриттів є визначення їхньої довговічності та функціональності. Методи дослідження структурних характеристик (атомно-силового мікроскопія, скануюча електронна мікроскопія, рентгенівська дифракція) дозволяють визначити морфологію, рельєф, товщину покриттів. Вони дають змогу визначити пористість, адгезію між покриттям та підкладкою, кристалічну структуру, фазовий склад.

Хімічні методи полягає у аналізі складу поверхні. Для цього використовують спектроскопічні методики (енергетична дисперсійна спектроскопія, рентгенівська фотоелектронна спектроскопія). Можна визначити концентрацію основних елементів, домішок, ступінь їхнього зв'язку в покриттях. Визначення товщини та проникності покриттів є додатковою інформацією щодо їхніх захисних властивостей і стабільності.

Біологічні вивчення покриттів включає тести на біосумісність (оцінка цитотоксичності, проліферації клітин, адгезії). Стимуляцію остеогенезу оцінюють дослідженнями *in vitro* та *in vivo* (наприклад, аналіз росту кісткової тканини, формування остеїдних структур). Біоактивні покриття досліджують за допомогою тестів на біоаккумуляцію та індукцію остеїнтеграції. Це дозволяє оцінити здатність покриттів сприяти росту та ремоделюванню кісткової тканини. У цілому, комплексне оцінювання покриттів з використанням сучасних методів досліджень забезпечує високу точність визначення їхньої функціональності, довговічності та біосумісності [10].

РОЗДІЛ 2 ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ ОКСИДУВАННЯ ТИТАНУ

Анодування (анодне окиснення, анодне оксидування) – процес електролітичного окиснення під час якого поверхневий шар металу перетворюється на оксидну плівку з певними властивостями.

Анодування проводять під час анодній поляризації деталі у кисневмісному середовищі з йонною провідністю. За рахунок утворення анодного оксиду змінюються поверхневі властивості матеріалу: твердість, електричний опір, термостійкість, зносостійкість, каталітична активність, тощо. Широко розповсюджена технологія анодування алюмінію, титану, танталу, ніобію, силіцію, германію.

На основі даних електронної мікроскопії встановлено, що анодні оксиди складаються з двох шарів: прилеглого до металу суцільного тонкого шару (бар'єрного) та зовнішнього пористого сильногідратованого шару, товщиною 100 мкм і більше. На основі цього були сформовані фізико-геометричні уявлення про ідеальну модель пористої анодної плівки.

Згідно до вищесказаних припущень, ріст анодної плівки призводить до росту бар'єрного шару і може бути представлений як:



Внаслідок взаємної дифузії іонів Al^{3+} та O_2 під плівкою утворюється новий шар Al_2O_3 . Утворена плівка взаємодіє з електролітом та частково розчиняється. Безпосередньо на поверхні металу утворюється безпористий бар'єрний оксидний шар.

Застосування нових методів аналізу дозволило виявити складність складу оксиду. Зокрема, було встановлено, що до складу оксиду входять аніони електроліту.

Процес формування анодного оксиду протікає наступним чином. Якщо природна оксидна плівка на металі досить стійка, то вона після деякого ущільнення за рахунок гідратації піддається травленню або пептизації.

Пептизація може відбуватися за рахунок адсорбції частинками гідратованих аніонів електроліту і вивільнення частинок оксиду в розчин. Значний вплив на цей процес надає напруженість електричного поля, оскільки під його дією може відбуватися інтенсивне впровадження аніонів в природну оксидну плівку.

Одночасно під плівкою оксиду відбувається окиснення металу. Цей процес протікає інтенсивно на активних ділянках поверхні (мікровиступи, грані кристалу) Зустріч аніонів металу з дифундуючими до аноду йонами окисника приводить до утворення оксиду. Гідратуючись, частина йонів металу прориває фронт частин оксиду, що ростуть, та переходить в електроліт. Інша частина витрачається на утворення багатоядерних гідроксо- та окислокомплексів. Такий процес закінчується утворенням паличкоподібних частинок колоїдного ступеню дисперсності.

Розглянуті процеси протікають безпосередньо біля поверхні металу через яку проникають аніони електроліту й сорбуються на частинках, що ростуть (без відриву в електроліт). Заряджені частинки (паличкоподібні, волокнисті міцели) орієнтуються електричним полем по нормалі до поверхні металу. Негативні заряди міцел, які адсорбують аніони електроліту, перешкоджають їх злиттю в суцільний поверхневий шар.

Перед процесом анодування необхідно підготувати поверхню до обробки.

Способи підготовки поверхні деталей залежать від виду анодування. Вони майже ідентичні для анодування у водних розчинах електролітів, розплавах солей та плазмово-електролітичного оксидування. Всі підготовчі операції розділяють на чотири групи:

- 1) попередня обробка (груба очистка, грубе травлення, обробка кварцовим піском);

- 2) основна обробка (галтування, крацювання, гідропіскоструйна обробка, шліфування, травлення);
- 3) кінцева обробка (полірування механічне, хімічне, електрохімічне);
- 4) очищення (знежирення хімічне, електрохімічне, ультразвукова очистка, видалення пасивної плівки).

Операції четвертої групи практично не змінюють розмірів виробу.

Типи анодування. Залежно від виду кисневмісного середовища, яке заповнює міжелектродний простір, розрізняють анодування у водних розчинах електролітів, розплавах солей, газовій плазмі, плазово-електролітичне.

Анодування у розплавах солей. Анодування у розплавах солей застосовують для отримання оксидів підвищеної товщини та мікротвердості. Як електроліти зазвичай використовують розплави солей з температурою плавлення евтектики до 400 °С. Цей метод застосовують для отримання діелектричних плівок високовольтних конденсаторів та електроізоляційних покриттів.

Анодування в газовій плазмі. За анодування у газовій плазмі оксид утворюється в результаті взаємної дифузії катіонів металу і аніонів кисню з плазми. За інших видів анодування оксид являє собою орієнтований електричним полем полімеризований гель оксиду металу.

Низкотемпературна плазма, яка утворюється в безпосередній близькості до металу під оксидом, є джерелом аніонів кисню, необхідних для утворення оксиду. Розрізняють анодування у плазмі високочастотного розряду постійного струму і у плазмі високочастотного розряду. Анодування проводять під ковпаком вакуумної установки за низького тиску.

Якщо джерелом негативно заряджених іонів є плазма тліючого розряду постійного струму, то ланцюги запалювання розряду та формування оксиду зазвичай розділяють. Для цього в робочому об'ємі розташовують дві пари електродів. На два електроди, що служать для розряду, подають напругу 500–1500 В. Ланцюг формування оксиду складає друга пара електродів: катод та виріб, що окиснюється – анод.

Під час анодування у плазмі високочастотного розряду робочий об'єм поміщують у контурі високочастотного генератору. Під ковпаком вакуумної установки в цьому випадку є тільки катод та виріб, що окиснюється – анод. Анодування у плазмі високочастотного розряду дозволяє отримувати більш товсті плівки оксидів з однорідними по поверхні електрофізичними параметрами.

Анодування в газовій плазмі проводять у середовищі кисню або атмосферного повітря, зазвичай за тиску 1–100 Па. Максимальні товщинами отриманих плівок досягають 800 нм. Цей вид анодування широко застосовують в мікроелектроніці.

Анодування у водних розчинах електролітів. Анодування у водних розчинах електролітів – найбільш розповсюджений спосіб анодування, який легко можна автоматизувати. Поверхня виробів, яку оксидують у ванні, визначається лише місткістю ванни та потужністю джерела струму. В якості електролітів застосовують водні розчини кислот або лугів. У електролітах, які не пептизують або майже не пептизують оксид (борна кислота, борати, нітрати, фосфати, бікарбонати) отримують тонкі щільні (до 1 мкм) оксиди. У електролітах, які слабо пептизують оксид (хромова, сірчана, шавлева, фосфорна кислоти, сульфати) отримують оксиди товщиною до 250 мкм.

Під час анодування у водних розчинах електролітів електрична енергія витрачається на основний процес – окиснення металу, а також на побічні процеси – виділення газу, нагрівання струмопровідних проводів та контактів, нагрів електроліту і т. д. Одночасно з електрохімічним процесом утворення оксиду протікає хімічний процес його розчинення. Теоретично масу оксиду, що утворюється на одиниці поверхні можна розрахувати за законом Фарадея:

$$m = j \cdot \tau \cdot k_e, \quad (2.3)$$

де: m – маса оксиду, г/дм²;

j – густина струму, А/дм²;

τ – тривалість анодування, год;

k_e – електрохімічний еквівалент, г/(А·год).

Знаючи фактичне збільшення маси анодного оксиду m_ϕ і його теоретичне збільшення m_T , можна розрахувати вихід за струмом процесу:

$$\eta = (m_\phi/m_T) \cdot 100 \%. \quad (1.4)$$

Під час анодування у водних розчинах електролітів за помірної густини струму (до 1–2 А/дм²) витрати електричної енергії на газовиділення незначні і не перевищують декількох процентів. Але за оксидування в електролітах, що порівняно сильно розчиняють оксид (наприклад, у сульфатній кислоті), вихід за струмом залежить від температури електроліту та тривалості формування плівки.

Електричний опір ланцюга формування в основному складається з електричних опорів основного об'єму електроліту, меж розділу «анод – електроліт» і «катод – електроліт», електроліту в порах оксиду та безпосередньо оксиду. Найбільш значний електричний опір має оксидна плівка. Кількість тепла, що виділяється під час цього зазвичай складає 70–80 % від сумарної.

Анодування титану. Склад і структура оксидних плівок залежить від умов окислення титану і можуть змінюватись у широкому діапазоні від TiO (в умовах більш м'якого окислення) до TiO₂ зі структурою рутила та анатазу (в умовах більш енергійного окислення). Встановлений напівпровідниковий характер нестехіометричних оксидних плівок складу TiO_{2-x}. За електричними властивостями діоксид титану TiO₂ зі структурами типу рутилу й анатазу наближений до діелектриків і не має електронної провідності. Товщина оксидного шару на титані в залежності від умов може становити від 1,0–1,2 нм до десятків нанометрів та вище.

Пасивність титану (тобто гальмування анодних процесів) визначається в основному більш тонким, наближеним до поверхні металу бар'єрним шаром, товщина якого може складати один або декілька атомних діаметрів. Основна частина товщини плівки має гірші захисні властивості. Захисні властивості бар'єрного шару є кращими, якщо він формується за більш позитивних потенціалів. Визначаються вони в основному гальмуванням йонного струму в анодному напрямку, тобто пов'язані з характером дефектності, і напівпровідниковими властивостями бар'єрного шару оксиду.

Плівка захищає титан в більшості середовищ, наприклад, в кислотах, водних розчинах солей, а також атмосфері; в розчинах фторидної кислоти та фторидів плівка нестійка. Тонкі природні оксидні плівки, внаслідок їх малих товщин, не завжди достатньо надійно захищають метал від корозії. Особливо це актуально для сплавів титану, хімічна стійкість яких знижується за збільшення кількості легуючих компонентів.

Найбільш поширені типи електролітів та режими анодування наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Електроліти та режими оксидування титану

№	Склад	c , г/л	j , А/дм ²	U , В	t , °С	τ , хв
1	Кислота оксалатна	50–60	1,0–3,0	до 110	20±5	30–60
2	Кислота сульфатна	180–200	1–4	до 40	20±5	40–80
3	Кислота сульфатна	350–400	2–4	–	40–50	60
4	Кислота хлоридна	60–65				
5	Кислота сульфатна	280–560	2–4	40–50	40–50	60
6	Натрій хлористий	60–190				
7	Ангідрид хромовий	140	–	50–60	95–100	240
8	Кислота борна	4				

Електроліт 1 призначений для оксидування деталей із титанового сплаву ВТ1-0, ВТ4-0, ВТ5-1, ОТ4-0. Особливістю процесу є те, що протягом перших 2–6 хвилин підтримують задану густину струму. Напруга під час електролізу

зростає до 110 В. До кінця процесу густина струму самочинно падає до 0,2 А/дм². Катоди використовують свинцеві або з корозійностійкої сталі. Співвідношення площі аноду до площі катода беруть рівним 2:1. Електроліт необхідно енергійно перемішувати. Товщина плавко складає 0,2–0,3 мкм. Цей електроліт застосовують для отримання оксидів, які покращують антифрикційні властивості титанових сплавів.

Електроліт 2 рекомендується застосовувати для анодування деталей з титанових сплавів ВТ1-0, ОТ4-1. Під час оксидування в цьому електроліті у початковий момент (перші 1–3 хвилини) підтримують задану густина струму, напруга в цей час зростає до 40 В. Далі процес анодування виконують без регулювання. Катоди використовують свинцеві. Співвідношення площі аноду до площі катода 2:1. Монтаж деталей виконують на підвіски з титану чи алюмінію. Товщина плівки 2–3 мкм.

Електроліт 3 дозволяє отримувати покриття товщиною 20–30 мкм. Струм підвищують поступово через кожні 2–3 хвилини на 0,5 А/дм² до виникнення пробою. Оксид має білий колір.

Електроліт 4 також призначений для отримання оксидів великої товщини (до 100 мкм) білого кольору.

Електроліт 5 дозволяє отримувати покриття, які нагадують емаль-плівки.

Оксидні плівки чорного кольору, що підвищують стійкість титану в 40 % H₂SO₄, можуть бути отримані анодною обробкою його у 18 % розчині H₂SO₄ за наступним режимом: температура електроліту 80 °С, густина струму 0,5 А/дм², тривалість обробки до 8 год. Товщина одержаних плівок складає близько 2,5 мкм. Оксидні плівки товщиною близько 1 мкм утворюються під час електролізу протягом 2 год за 100 °С і густини струму 1 А/дм².

Колір оксидних плівок залежить від складу титанового сплаву і умов його анодування. За обробці сплаву ВТ-5 у 15 % розчині H₂SO₄ з підвищенням температури і напруги на ванні забарвлення формованих плівок змінюється від

світло-коричневого до фіолетового. Збільшення тривалості електролізу також позначається на забарвленні плівок.

Для отримання на титані та його сплавах рівномірно забарвленої плівки, що відрізняється корозійною стійкістю, запропоновано проводити анодування у розбавленому розчині гідроксиду натрію за анодної густини струму не вище 2,5 А/дм².

Електрохімічне оксидування різьбових деталей з титанових сплавів можна проводити в імпульсному режимі, коли постійний струм подається на ванну імпульсами, що чергуються з струмом. Залежно від співвідношення тривалості періодів подачі і перерви струму змінюються товщина і властивості формованих плівок. Для обробки сплавів ВТЗ-1, ВТ20, ВТ5-Л застосовується електроліт, що містить 200–210 мл/л сульфатної кислоти і 10–20 мл/л фосфатної кислоти за анодної густини струму в імпульсі 5–10 А/дм², тривалості імпульсу 0,2 с, тривалості перерви струму 0,8 с, частоті 60 імпульсів в секунду.

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ОКСИДУВАННЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ Ti6Al4V

Процес одержання оксидних плівок на титанових сплавах методом електрохімічного оксидування являє собою процес, який необхідно проводити за визначених умов; від цього залежить результат анодування. Він складається із підготовчих та основних операцій. Підготовчими операціями є механічна обробка, знежирення, травлення; основна операція – проведення електрохімічного процесу оксидування.

3.1 Попередня підготовка

Досліджували електрохімічне оксидування титанового сплаву марки Ti6Al4V (у вітчизняній класифікації VT6). Якісний та кількісний склад сплаву, %: V – 3,5–5,3; Al – 5,3–6,8; Ti – решта. У якості зразків використовували циліндричні стрижні зі сплаву довжиною 100 мм і діаметром 4 мм. Первинна обробка зразків полягала у їхньому шліфуванні на шліфувальному станку за допомогою наждакових кругів з послідовним зменшенням зернистості абразиву. Це дозволяло досягти відносної рівномірності поверхні та позбутися задирів, які утворювались на краях зразків при розрізанні початкового стрижня.

3.2 Знежирення

Зразки або деталі, які використовуються під час досліджень або проходять обробку на гальванічному виробництві, зазвичай мають поверхню, забруднену залишками жирів різного походження. Вони потрапляють на поверхню під час механічної обробки (різання, шліфування, свердлення, фрезерування), які часто проводять із використанням змащувально-охолоджувальних рідин, за зберігання і транспортування або контакту зі

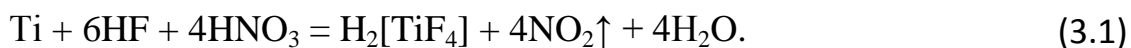
шкірою робітників. Жирові забруднення не проводять електричного струму й за їхньої наявності на поверхні не можна досягнути якісного результату оксидування.

Для видалення жирових забруднень з поверхні проводять операцію знежирення зразків у лужних розчинах. Запропонований ряд складів розчинів знежирення (одно-, дво- та трикомпонентні, з додаванням поверхнево-активних сполук і т. д.). Нами, виходячи з того, що поверхня зразків містить незначні залишки жирів після контакту зі шкірою, був обраний простий склад розчину знежирення, що містив 100 г/л натрію карбонату. Знежирення проводили шляхом занурення попередньо промитих у воді зразків у вказаний розчин, нагрітий до температури 60–80 °С на 5–6 хв. Під час знежирення за цих умов природні жири омиляються, а синтетичні – утворюють емульсії і переходять у розчин. Додатково знежирені зразки обробляли губкою, змоченою розчином побутового мийного засобу. Після знежирення зразки промивали водопровідною водою.

3.3 Травлення

Титанові зразки або вироби містять на своїй поверхні природні або штучні оксидні плівки; останні можуть утворюватись на поверхні під час проведення термічної обробки на попередніх операціях. Природні та штучні оксидні плівки необхідно видаляти, оскільки їх наявність може негативно впливати на результати анодування; поверхня зразків перед проведенням дослідів повинна бути максимально чистою та однорідною.

Травлення титану його сплавів проводять у кислих фторидвмісних розчинах, оскільки в інших середовищах метал є стійким. Найбільш часто для цього використовують суміш фторидної і нітратної кислот, взятих за об'ємного співвідношення 1 до 3. Під час травлення титан відбувається реакція:



Травлення обов'язково проводять з використанням витяжної вентиляції, використовуючи засоби індивідуального захисту (захисні гумові рукавички, окуляри, халат).

Після травлення зразки сплаву спочатку промивають водопровідною водою, потім дистильованою та просушують фільтрувальним папером.

3.4 Електрохімічне оксидування

Електрохімічне оксидування виконували в електролізері, у якості якого використовували скляний стакан об'ємом 250 см³, виготовлений із хімічно стійкого скла. Як електроліт використовували розчини цитратної кислоти. Вибір електроліту обґрунтовується тим, що цитратна кислота відноситься до кислот слабкої сили, її розчини не є занадто агресивними і мають меншу травлячу дію на шар діоксиду титану, сформований під час анодування. Схема установки для оксидування наведена на рисунку 3.1, *а*; на рисунку 2.1, *б* і *в* наведений знімок реального процесу в лабораторії.

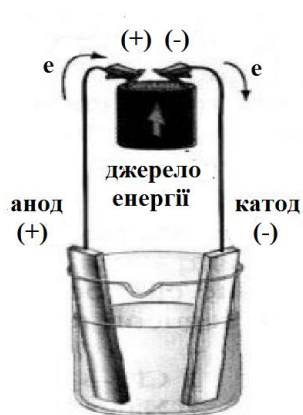
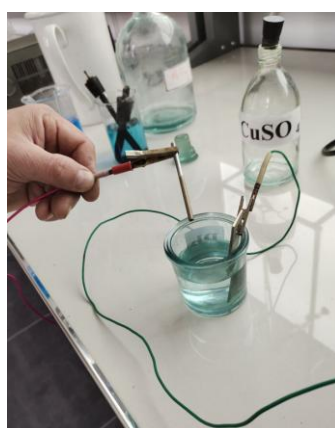
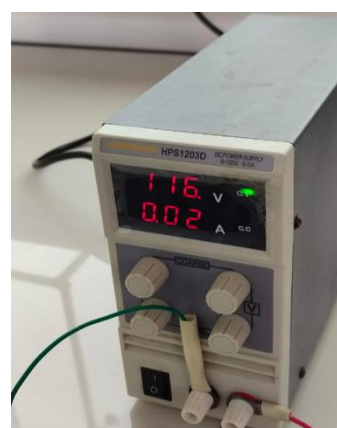
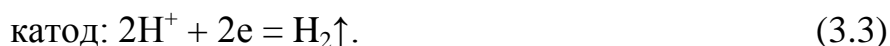
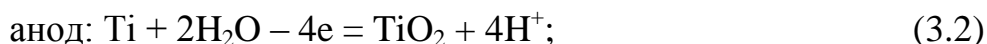
*а**б**в*

Рисунок 3.1 – Схема установки для електрохімічного оксидування (*а*) та фотографії реального процесу в лабораторії (*б* і *в*)

Робочим електродом (анодом) під час електролізу слугував зразок титанового сплаву. Як допоміжний електрод (катод) використовували свинцеву пластину. Відношення площі аноду S_a до площі катода S_k складало 1:100.

Електроліз проводили у гальваностатичному режимі, пропускаючи через ланцюг з електролізером постійний електричний струм. Сигналом закінчення електролізу слугувало підвищення формуючої напруги на електролізері до заданого кінцевого значення. Діапазон дослідженої напруги формування знаходився в межах 10–100 В (з кроком 10 В).

Рівняння електродних реакцій, які відбуваються під час електролізу, можна записати наступним чином:



Помітного виділення газоподібного кисню під час електролізу не відбувається. У результаті проходження реакції (3.2) на поверхні титану або його сплавів, які піддаються анодуванню, утворюються оксидні плівки. Товщина утвореної оксидної плівки прямо пропорційно залежить від кількості пропущеної через електричний ланцюг електрики Q (добутку сили струму I на час його протікання τ , тобто $Q = I \cdot \tau$). Для зручності в електрохімії швидкість реакції визначають, використовуючи не силу струму I , а густину струму j , яка є питомою величиною є відношенням сили струму до площі робочого електроду S : $j = \frac{I}{S}$. Розмірність густини струму в роботі складала А/дм². Густина струму на аноді позначають як j_a , на катоді – j_k .

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Активність титану, обумовлена негативним значенням його потенціалу (для реакції $Ti^{3+} + 3e \leftrightarrow Ti^0$ він складає $-1,2$ В) повинна викликати його нестійкість у більшості середовищ. За контакту із кисневмісними середовищами (повітря, розчинани деяких сполук, вода) поверхня титану вкрита оксидною плівкою, яка пасивує метал. Її товщина складає 3–6 нм.

Одержання штучних оксидних плівок на титані є одним поверхневого модифікування титану і сплавів його сплавів. Для цього використовується ряд методів (хімічне, термічне оксидування, дифузійне легування, гідротермальне осадження, анодування і т. д.). Штучні оксидні плівки мають певний хімічний склад і мають певну товщину, що обумовлює їхні гарні захисні властивості.

Анодування титану засноване на використанні електрохімічного окиснення металу у розчинах електролітів (кислоти, солі, їхні суміші). Для цього необхідно використовувати потужні джерела живлення та гальванічні ванни. Використання анодування надає можливості контрольованого утворення плівок з широким спектром властивостей. Можна легко контролювати товщину покриття, плівки є однорідними; це обумовлює широку розповсюдженість анодування.

Під час анодування у розчинах цитратно кислоти повинні утворюватись оксидні плівки з гарними пасивуючими властивостями. Це обумовлюється тим, що цитратна кислота за своїми властивостями відноситься до слабких електролітів, які повинні мати незначну розчиняючу дію відносно сформованого анодного оксиду. Тому електрохімічне оксидування у таких розчинах має приводити до утворення щільних та тонких плівок товщиною у десяті частки мікрометра із мінімальною пористістю. Для того, щоб встановити вірність висунутих припущень, необхідно дослідити динаміку утворення плівок шляхом одержання та аналізу формувальних залежностей, які відображають зміну напруги на електролізері (комірці) під час електролізу. Якщо графік такої залежності буде являти пряму лінію, яка підкоряється закону Ома, то можна

стверджувати, що на поверхні аноду утворюються плівки, які за своїми властивостями близькі до плівки діелектричного типу. Інший характер залежності може вказувати на утворення оксиду, який характеризується регулярною чи нерегулярною пористістю.

Отримані за результатами досліджень типові формувальні залежності наведені на рисунку 4.1. Як можна побачити із наведеного рисунку вигляд формувальної залежності визначається швидкістю утворення оксиду, тобто значенням анодної густини струму.

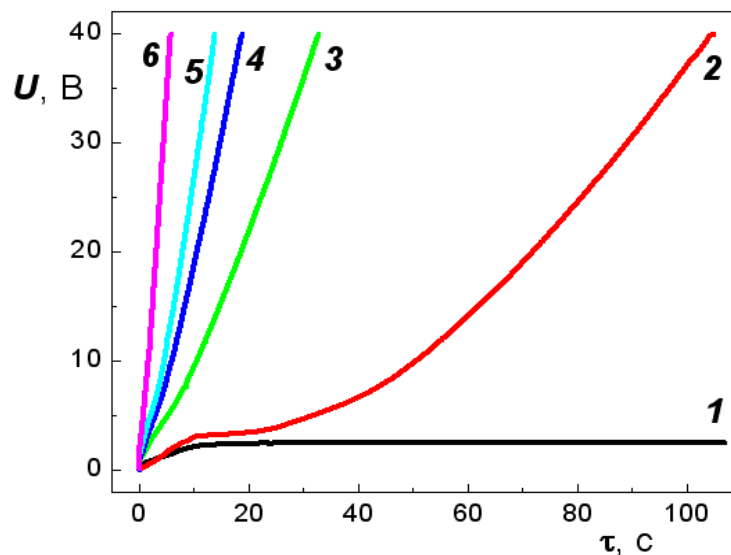


Рисунок 4.1 – Залежності зміна напруги на комірці (формувальні криві) під час анодування сплаву Ti6Al4V у цитратних електролітах. $U = 40 \text{ В}$; $c(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7) = 100 \text{ г/дм}^3$. $j_a, \text{ А/дм}^2$: 0,2(1); 0,5(2); 1(3); 0,75(4); 2(5); 5(6).

Аналіз даних на рисунку 4.1 дозволяє зробити наступні висновки. За j_a на рівні 0,2–0,5 А/дм^2 формувальні залежності є нелінійними та під час проведення декількох експериментів іноді не відтворюється. За $j_a = 0,2 \text{ А/дм}^2$ задана напруга на комірці взагалі не досягається, що пояснюється проходженням на поверхні аноду двох процесів. Перший із них полягає у електрохімічному окисненні поверхні сплаву з утворенням плівки, а другий –

у хімічній взаємодії утвореного оксиду із цитратною кислотою у електроліті. Окиснення збільшує товщину оксиду, а хімічна взаємодія зменшує. Відповідно перший процес сприяє зростанню електричного опору шару на поверхні анода, що у гальваностатичному режимі обумовлює підвищення напруги на комірці. Хімічне розчинення зменшує товщину плівки й відповідно опір комірки.

За густин струму, менших за певне критичне значення, суцільна оксидна плівка на поверхні аноду взагалі не утворюється. На це вказує формувальна залежність I , де виходу на задану напругу (40 В) не відбувається.

Іншу форму має залежність 2. Анодування за $j_a = 0,5 \text{ А/дм}^2$ викликає появу на кривій плато, після якого спостерігається поступове зростання напруги на комірці з виходом на задане значення. Можна припустити, що анодування за цих умов має певний «інкубаційний період».



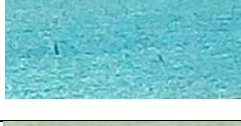
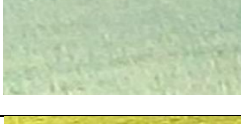
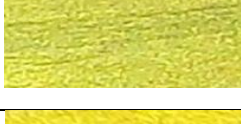

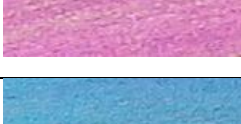

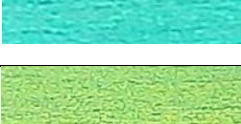

Лінійний характер зміни напруги після плато вказує на те, що після деякої витримки оксид утворює суцільну плівку на поверхні анода й далі процес йде у нормальному режимі формування оксиду діелектричного типу, товщина якого зростає відповідно до кількості електрики, витраченої на окиснення.

Анодування за $j_a = 1-5 \text{ А/дм}^2$ обумовлює утворення оксиду діелектричного типу, на користь чого вказує лінійність одержаних формувальних залежностей. Такі плівки характеризуються мінімальною пористістю, мають велике значення електричного опору й тому добре пасивують сплав.

Такі плівки відносяться до інтерференційних, тобто мають певний колір забарвлення. Він залежить від товщини сформованого оксиду, яка у свою чергу визначається тривалістю електролізу, тобто кількістю витраченої на оксидування електрики.

Деякі результати з відповідності кольору оксидних плівок на титановому сплаві Ti6Al4V їхній товщині наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Відповідність кольору оксидних плівок на титановому сплаві Ti6Al4V та формувальній напрузі U

№ п.п.	Напруга U , В	Колір забарвлення оксидної плівки
1	10	
2	20	
3	30	
4	40	
5	50	
6	60	
7	70	
8	80	
9	90	
10	100	

Також одержані залежності, які дозволяють визначити вплив умов електролізу на формування оксидних плівок максимальної товщини. Вона визначалась як часовий проміжок, необхідний для досягнення заданого значення напруги на електролізері. Досліджувався вплив анодної густини струму, напруги та концентрації електроліту.

На рисунку 3.2 наведені показаний вплив анодної густини струму на тривалість формування анодної оксидної плівки діоксиду титану. Сімейство одержаних кривих має аналогічну форму для всіх заданих значень напруг формування. За збільшення густини струму тривалість росту плівки зменшується. Примітно, що залежності не є лінійними, як це повинно передбачатися теорією, згідно якої швидкість електрохімічного процесу є лінійною функцією густини струму. Відхилення від лінійності спостерігаються в області низьких густин струму й вони пояснюються даними, наведеними на рисунку 4.1. Очевидно, що за низьких густин струму існують певні обмеження формування суцільної плівки оксиду на поверхні сплаву.

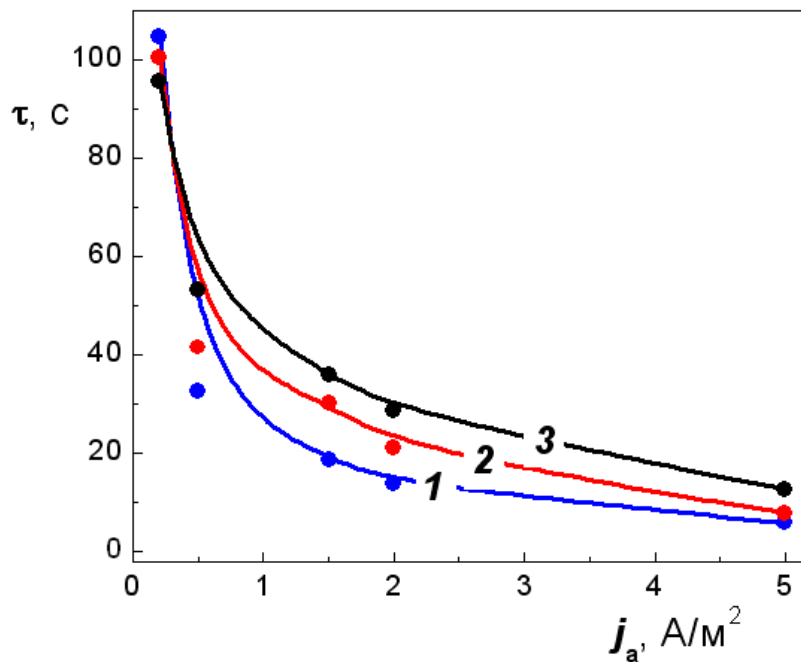
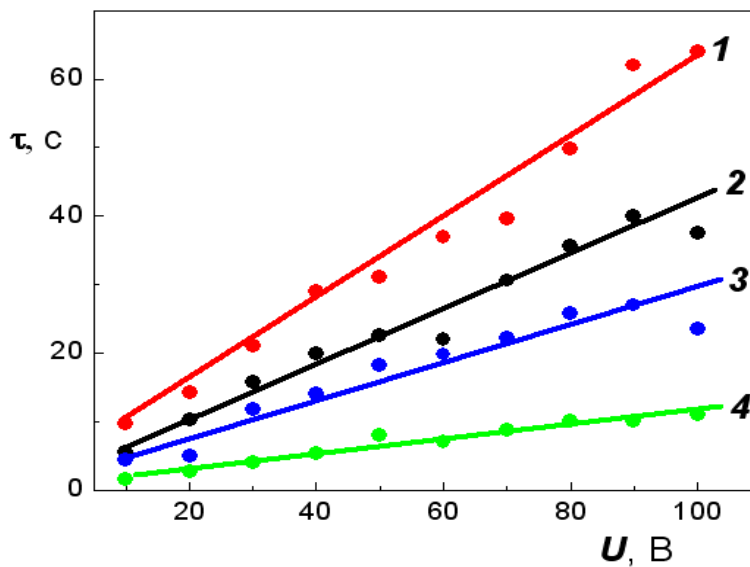


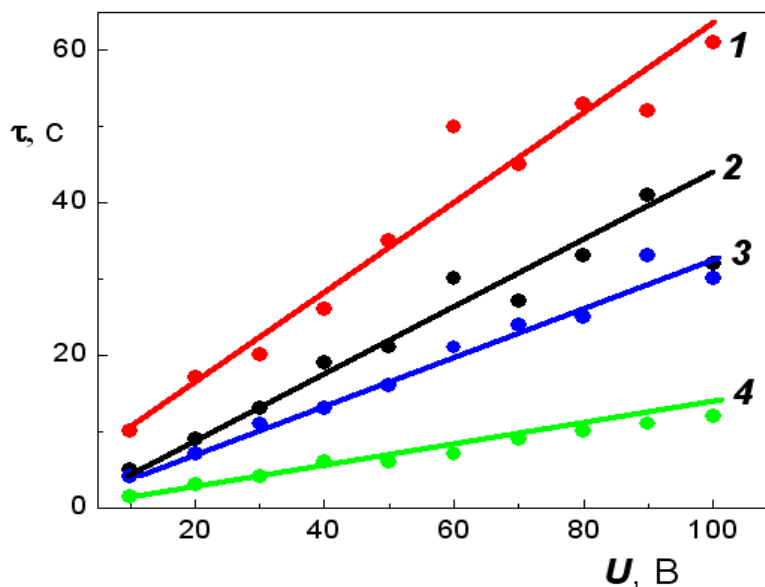
Рисунок 4.2 – Тривалість формування оксидної плівки як функція анодної густини струму за анодування у розчинах цитратної кислоти. $c(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7) = 100$ г/дм³. U , В: 40(1); 60(2); 80(3).

Залежності анологічного параметра від величини напруги формування, навпаки, є лінійними (рис. 4.3). Звертає на себе увагу той факт, що нахил цих не

лишається незмінним, а зростає за підвищення анодної густини струму, що потребує додаткових досліджень.



a

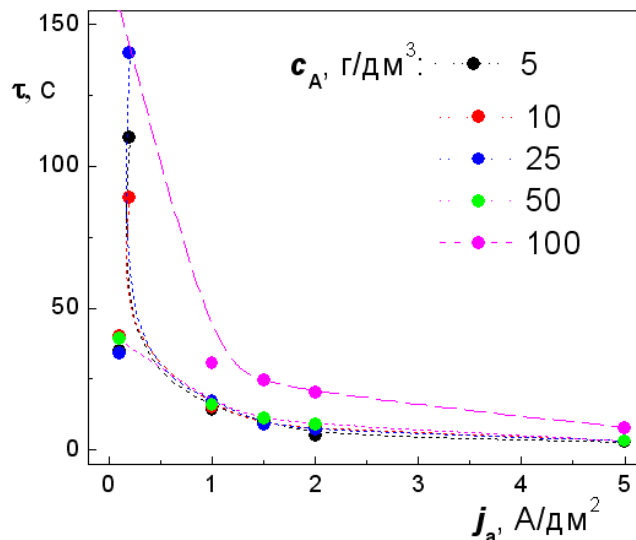


б

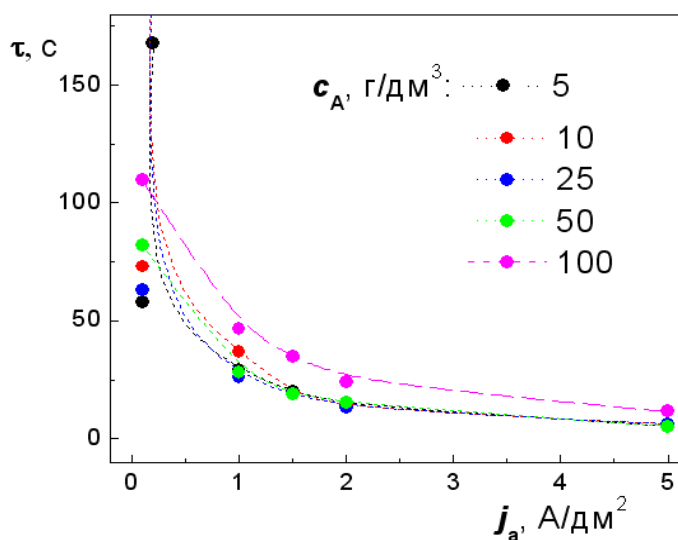
Рисунок 4.3 – Тривалість формування оксидної плівки як функція напруги. j_a , А/дм²: 1(1); 1,5(2); 2(3); 5(4). *a* – (C₆H₈O₇) = 10; *б* – (C₆H₈O₇) = 100 г/дм³.

Одержані дані показують, що зростання концентрації електроліту від 5 до 50 г/дм³ не впливає на тривалість електрохімічного формування оксидних

плівок на сплаві Ti6Al4V; це дозволяє зробити висновок про те, що максимально можлива товщина оксидної плівки визначається лише значенням формуючої напруги.



a

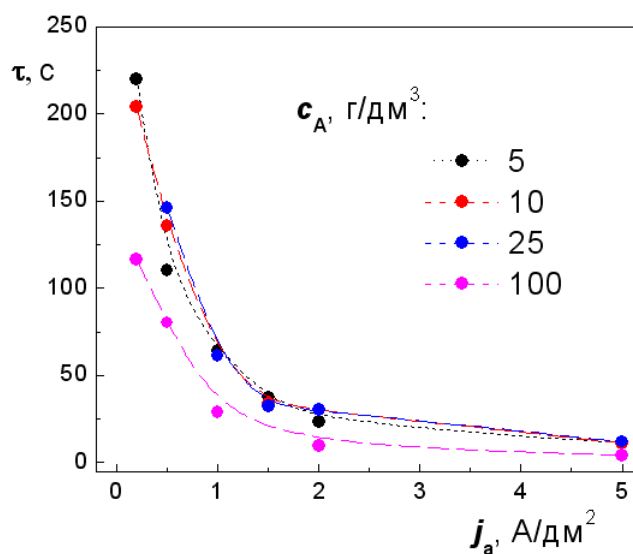


б

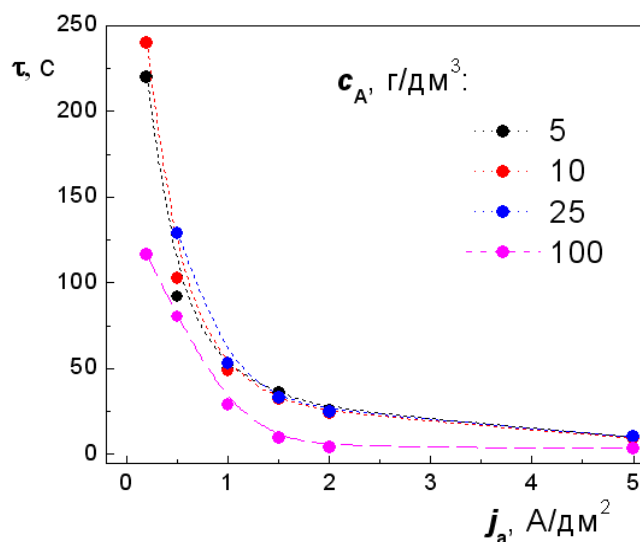
Рисунок 4.4 – Тривалість формування оксидної плівки як функція концентрації цитратної кислоти. *a* – $U = 20$ В; *б* – $U = 40$ В

Деякі відмінності спостерігаються лише для розчинів із концентрацією цитратної кислоти на рівні 100 г/дм^3 (рис. 4.4, 4.5). Для таких розчинів

тривалість утворення плівки максимальної товщини зростає дещо відрізняється, що пояснюється зміною йонних рівноваг у розчині.



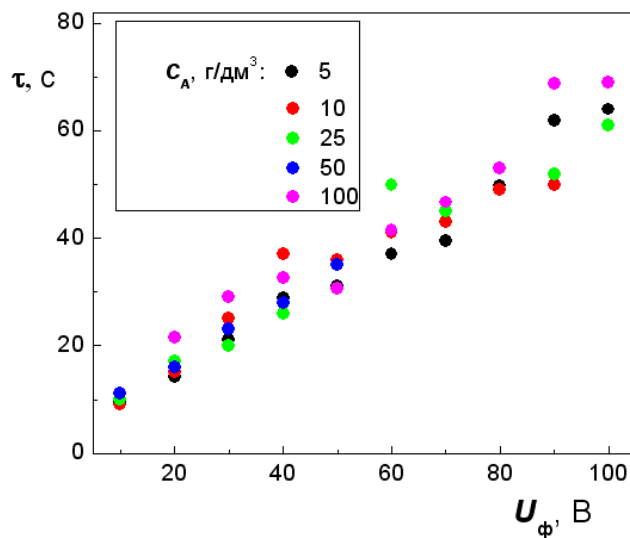
a



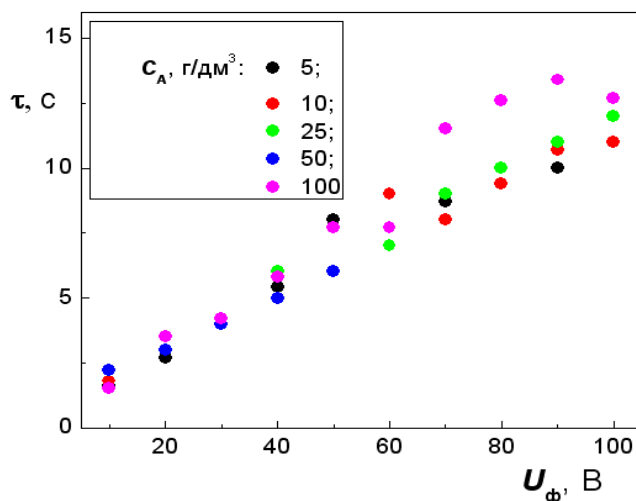
б

Рисунок 4.5 – Тривалість формування оксидної плівки як функція концентрації цитратної кислоти. *a* – $U = 80$ В; *б* – $U = 100$ В

Для електролітів з однаковою концентрацією кислоти спостерігаються лінійні залежності тривалості формування оксиду від формувальної напруги (рис. 4.6), причому нахил таких залежностей однаковий для всього дослідженого діапазону концентрацій розчинів.



а



б

Рисунок 4.6 – Тривалість формування оксидної плівки як функція концентрації цитратної кислоти. j_a , A/dm²: а – 1; б – 5

Підсумовуючи вищезазначене можна сказати, що одержані дані підтверджують те, що анодування приводить до утворення оксидних плівок діелектричного типу. Такі плівки є майже безпористими, а їхня товщина визначається величиною формувальної напруги.

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Загальна характеристика шкідливих і небезпечних факторів

Утворення на титані оксидних плівок за допомогою анодування дозволяє отримувати матеріали із захисними та біосумісними властивостями. Проте така робота є небезпечною, оскільки у лабораторії використовуються агресивні хімічні речовини (наприклад, кислоти, луги, солі). Також використовуються різні електроприлади, можливим є виділення токсичних та вибухонебезпечних газів, що негативно впливає на здоров'я людини.

Завданням цього розділу є комплексний аналіз умов праці під час дослідження технології електрохімічного оксидування титану, виявлення потенційних джерел небезпеки і заходів для забезпечення безпеки життєдіяльності, пожежної безпеки та цивільного захисту відповідно до чинного законодавства України та нормативно-правових актів.

5.1.1 Вимоги безпеки перед початком роботи

Перед тим як розпочати роботу у лабораторії, необхідно подбати про власну безпеку відповідно до загальних вимог охорони праці [20]:

- 1) одягнути захисний одяг, рукавички, захисні окуляри та маску чи респіратор;
- 2) обов'язково перевірити стан робочого місця; на ньому не повинно бути зайвих предметів чи матеріалів;
- 3) перевірити відсутність сторонніх предметів у гальванічній ванні та джерелі живлення;
- 4) впевнитись у цілісності скляного чи пластикового посуду для реактивів;
- 5) переконатися у надійності заземлення корпусу випрямляча та елементів установки згідно з вимогами безпечної експлуатації електроустановок [21];

б) перевірити цілісність ізоляції електричних дротів, кабелів живлення та шлангових з'єднань.

Треба запустити місцеву вентиляційну систему та загально обмінну витяжку [22]. Також перевіряється наявність і доступність засобів для ліквідації аварійних розливів, зокрема розчину натрію карбонату для нейтралізації кислот та первинних засобів пожежогасіння [23]. Про всі знайдені недоліки обладнання слід негайно повідомити керівника робіт і не розпочинати роботи до їх повного усунення.

5.1.2 Вимоги безпеки під час роботи

Приготування кислотних розчинів для травлення титану мають проводитися виключно всередині увімкненої витяжної шафи з дотриманням правил охорони праці [24], оскільки травлення супроводжується виділенням агресивних аерозолів. Категорично забороняється додавати воду в концентровані кислоти – для запобігання бурхливому закипанню та випліскуванню рідини необхідно лити кислоту у воду тонкою цівкою за постійного перемішування. Закріплення титанових зразків на анодних штангах і будь-яку зміну конфігурації електролізера дозволяється виконувати лише за повністю вимкненого випрямляча, коли напруга на стійці дорівнює нулю [21]. Необхідно безперервно стежити за рівнем електроліту у ванні, його температурою та не допускати закриття вентиляційних отворів бортових відсмоктувачів. У разі появи специфічного запаху газів, іскріння в електричній схемі чи збоїв у роботі вентилятора процес слід негайно зупинити кнопкою аварійного вимкнення.

5.1.3 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Технологічний процес включає операції підготовки поверхні титану (механічна обробка, знежирення, травлення), електроліз і промивання.

Наведену класифікацію використуваних у роботі агресивних реагентів за міжнародними критеріями узгоджено з даними Сектору REACH ДП "Черкаський НДІТЕХІМ" «Надзвичайно небезпечні речовини» [26] та Закону України «Про забезпечення хімічної безпеки та управління хімічною продукцією» [25].

5.1.4 Вентиляція та кондиціонування

Для видалення шкідливих парів та аерозолів безпосередньо від місця їх утворення (гальванічні ванни) передбачається місцева бортова вентиляція. Швидкість руху повітря у бортових відсмоктувачах повинна бути не менше 0,4–1,0 м/с (залежно від температури) згідно з ДБН В.2.5-67:2013 [22]. Загальнообмінна припливно-витяжна вентиляція повинна забезпечувати кратність повітрообміну не менше 4–6 обмінів за годину, щоб підтримувати концентрацію шкідливих речовин у повітрі робочої зони нижче ГДК [27].

Розрахунок вентиляції. Розміри ванни: довжина $L = 1,2$ м, ширина $B = 0,6$ м, температура електроліту $t = 50$ °С, нормована швидкість повітря у щілині: $v_0 = 0,40$ м/с, конструктивний коефіцієнт: $k_4 = 1,1$.

Об'єм повітря, який необхідно видаляти через бортові відсмоктувачі, розраховуємо за формулою (5.1) [22]:

$$V = 3600 \cdot B \cdot L \cdot v_0 \cdot k_4; \quad (5.1)$$

$$V = 3600 \cdot 0,6 \cdot 1,2 \cdot 0,40 \cdot 1,1 = 1140,48 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Згідно з розрахунком, для ванни розміром 1,2x0,6 м мінімально необхідна продуктивність витяжного вентилятора становить 1140,48 м³/год.

Цей об'єм повітря є оптимальним. Він гарантує, що концентрація токсичних речовин у лабораторії не перевищить встановлені ГДК (зокрема 0,5 мг/м³ для NaOH та 0,1 мг/м³ для HF) [27].

5.1.5 Вимоги безпеки під час роботи з електрохімічним обладнанням

Техніка безпеки за роботи з електрохімічним обладнанням під час оксидування титану вимагає суворого дотримання комплексних захисних заходів через одночасну наявність електричного струму високої напруги, концентрованих хімічних реагентів та вибухонебезпечних газів. Перед початком роботи обов'язково перевіряється цілісність ізоляції всіх кабелів, надійність захисного заземлення або занулення корпусу випрямляча та ванн, а також справність автоматичних систем захисного вимкнення і блокувань, які повинні миттєво знеструмлювати установку в разі витoku струму або зупинки вентиляції. Робоче місце біля гальванічної ванни обов'язково комплектується гумовими діелектричними килимками, а всі маніпуляції з титановими зразками, їх закріплення на анодних штангах чи виймання з електроліту, дозволяється проводити виключно за повністю вимкненого джерела живлення [21, 24].

5.1.6 Засоби індивідуального захисту

Забезпечення персоналу засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) здійснюється відповідно до чинних норм безплатної видачі ЗІЗ для працівників хімічних виробництв.

Залежно від характеру виконуваних робіт та видів небезпечних виробничих факторів (зокрема, ризику хімічних опіків та інгаляційного отруєння), обов'язковому застосуванню підлягають комплекси ЗІЗ наведені у таблиці 5.1 [28, 29].

Таблиця 5.1 – Засоби індивідуального захисту хімічного виробництва

Вид	Тип ЗІЗ та маркування	Технологічне призначення
1	2	3
Спецодяг	Халати або костюми з кислотозахисних тканин	Захист шкірних покривів від прямого контакту з розчинами кислот та електролітів

Закінчення таблиці 5.1

1	2	3
Захист рук	Гумові або нітрилові хімічно стійкі рукавички	Захист кистей рук під час безпосередньої роботи з агресивними рідкими речовинами
Захист очей та обличчя	Захисні окуляри закритого типу (ЗП) або захисні щитки	Запобігання потраплянню крапель, бризок кислот та шкідливих дисперсних частинок на слизові оболонки
Захист органів дихання	Респіратори типу «Пелюстка» або газопилозахисні (РУ-60М, коробка марки «В»)	Захист від інгаляційного впливу шкідливих газів, парів та аерозолів під час приготування технологічних розчинів

5.1.7 Пожежна безпека

Приміщення лабораторії електрохімічного оксидування титану належить до категорії В за пожежною небезпекою (через наявність електроустановок під напругою та полімерних конструкційних матеріалів).

Під час анодування виділяється водень. Для запобігання утворенню вибухонебезпечної концентрації вентиляція повинна працювати безперервно протягом усього процесу електролізу. Гальванічні ванни обладнуються автоматичним блокуванням у разі зупинки вентиляції джерело живлення вимикається автоматично.

Для оперативного гасіння можливих займань приміщення лабораторії оснащується первинними засобами пожежогасіння відповідно до «Правил пожежної безпеки в Україні» [23].

Для розрахунку необхідної кількості первинних засобів пожежогасіння (вогнегасників) в Україні використовуються чинні «Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників» [30].

Розрахунок вогнегасників. Площа приміщення: $S = 60 \text{ м}^2$, клас можливої пожежі: Е, А, В (ліквідні хімічні речовини); категорія приміщення: В.

Для приміщень категорії В площею понад 50 м², нормування починає враховувати граничну площу захисту одним вогнегасником [30]. Згідно з додатками до типових норм один порошковий вогнегасник типу ВП-5 (маса заряду 5 кг) або вуглекислотний ВВ-5 (маса заряду 5 кг) захищає до 50 м² приміщення категорії В.

Коефіцієнт потреби N розраховуємо за формулою (5.2):

$$N = S/50; \quad (5.2)$$

$$N = 60/50 = 1,2.$$

Отримане значення округлюємо у більший бік до найближчого цілого числа: отримуємо 2 вогнегасника.

Оскільки для приміщень з електроустановками та хімічними процесами захист має бути дубльованим, мінімальна кількість також становить 2 вогнегасники. Рекомендовано мати вуглекислотний вогнегасник ВВ-5 (для гасіння випрямляча та шафи керування) та порошковий вогнегасник ВП-5 (як універсальний засіб для гасіння конструкцій, кабельних ліній та можливих загорянь пластику).

У виробничих приміщеннях відстань від будь-якої точки приміщення до місця розташування вогнегасника не повинна перевищувати 20 м. Вогнегасники масою менше 15 кг (ВВ-5 або ВП-5) повинні навішуватися на вертикальні конструкції на висоті не більше 1,5 метра від рівня підлоги до нижнього торця вогнегасника, або встановлюватися у спеціальні пожежні шафи [30, 31].

5.1.8 Вимоги безпеки після закінчення роботи

Після завершення процесу окисдування титану виконавець зобов'язаний насамперед повністю вимкнути джерело постійного або імпульсного струму, перевести тумблери випрямляча в нульове положення та від'єднати установку від електричної мережі. Тільки після повного знеструмлення системи

дозволяється вийняти оброблені титанові деталі з підвісок, перенести їх у промивну ванну та ретельно відмити [21].

Робочі розчини та електроліти, які не підлягають подальшому використанню, забороняється зливати безпосередньо у каналізацію – їх зливають у спеціальну марковану тару для подальшої нейтралізації вапном чи содою та утилізації. Усі робочі поверхні столів, борти ванн та інструменти очищуються, протираються вологою ганчіркою та висушуються. Місцева бортова вентиляція повинна залишатися увімкненою ще протягом 10–15 хвилин після зупинки процесу для повного видалення залишкових газів (водню та випарів кислот), після чого її вимикають. Наприкінці зняти засоби індивідуального захисту, ретельно вимити руки з милом під проточною водою, перевірити закриття водопровідних кранів, вимкнути освітлення в лабораторії та замкнути приміщення [25].

Обґрунтовано покрокові вимоги охорони праці та оптимізовано комплекс ЗІЗ для захисту від шкідливих факторів хімічного оксидування титану, де основними ризиками визначено наявність кислот, високу напругу та виділення водню. За вимогами ДБН В.2.5-67:2013 розраховано місцеву вентиляцію гальванічної ванни: її мінімальна продуктивність для утримання повітря робочої зони в межах ГДК становить 1140,48 м³/год. Відповідно до нормативів для приміщення категорії В площею 60 м² визначено потребу в 2 вогнегасниках масою по 5 кг (вуглекислотному ВВ-5 та порошковому ВП-5).

5.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях (НС)

Найбільш імовірними НС на даному виробництві є пролив концентрованих кислот (HF, HNO₃), раптове виділення великої кількості токсичних парів або пожежа. У разі оголошення повітряної тривоги чи виникнення техногенної аварії необхідно:

- 1) негайно знеструмити електролізер шляхом натискання кнопки аварійної зупинки;

- 2) перекрити вентилі подачі води та хімічних реагентів;
- 3) швидко та організовано залишити приміщення через евакуаційні виходи у напрямку найближчого сховища (укриття).

Для забезпечення безпеки життєдіяльності та оцінки ефективності шляхів евакуації проведено розрахунок динаміки руху людей відповідно до ДБН В.1.1-7:2016 [32].

Визначення безпечного часу евакуації осіб з приміщення лабораторії.

Довжина приміщення лабораторії: $L = 10$ м, ширина евакуаційного виходу (дверей) $b = 0,9$ м, кількість людей у приміщенні: $N = 3$ особи, швидкість руху людей (вільний темп): $v = 60$ м/хв.

Час руху першої людини до дверей t_1 розраховуємо за формулою (5.3):

$$t_1 = L/v; \quad (5.3)$$

$$t_1 = 10/60 = 0,167 \text{ хв} = 10,2 \text{ с.}$$

Час проходження трьох осіб через дверний отвір t_2 розраховується за умови, що, згідно нормативних параметрів, пропускна здатність дверей шириною 0,9 м за вільного руху Q становить 50 осіб/хв, t_2 розраховуємо за формулою (5.4):

$$t_2 = N/Q; \quad (5.4)$$

$$t_2 = 3/50 = 3,6 \text{ с.}$$

Загальний розрахунковий час евакуації $t_{\text{розр.}}$ розраховується так:

$$t_{\text{розр.}} = t_1 + t_2; \quad (5.5)$$

$$t_{\text{розр.}} = 10,2 + 3,6 = 13,8 \text{ с.}$$

Отримане значення є значно меншим за нормативний безпечний час для приміщень цієї категорії за ДБН В.1.1-7:2016, який становить 60 с. Отже, у разі

виникнення будь-якої надзвичайної ситуації організація робочого простору гарантує швидке та безпечне залишення лабораторії всіма присутніми [32].

Попередження та ліквідація наслідків надзвичайних ситуацій на об'єкті окисдування титану вимагає впровадження комплексу інженерно-технічних і організаційних заходів, спрямованих на недопущення аварій, пов'язаних із розливом концентрованих кислот (нітратної, фторидної, цитратної), воднем, ураженням струмом високої напруги.

Основним превентивним заходом є постійний автоматичний контроль параметрів роботи обладнання за допомогою встановлення датчиків водню у верхній зоні приміщення та систем блокування джерел живлення (випрямлячів), які автоматично знеструмлюють гальванічні ванни у разі раптової зупинки місцевої чи загальнообмінної вентиляції. Для локалізації потенційних проливів агресивних рідин підлога приміщення виконується з хімічно стійких матеріалів із похилом до спеціальних збірних зумпфів, а в зоні ванн організовується аварійний запас сухого натрію карбонату (кальцинованої соди) масою не менше 24 кг для негайної нейтралізації кислот у разі руйнування корпусу ємностей.

Захист від пожеж забезпечується суворим дотриманням режиму заборони використання відкритого вогню та комплектування ділянки первинними засобами пожежогасіння, що включають вуглекислотні вогнегасники класу ВВ-5 для гасіння випрямлячів під напругою та порошкові вогнегасники ВП-5 для локалізації твердих горючих матеріалів [30, 33].

Розроблено алгоритм дій персоналу в непередбачених ситуаціях (розливи кислот, загоряння, сигнал «Повітряна тривога») згідно з «Кодексом цивільного захисту України» та запропоновано запобіжні заходи: встановлення датчиків водню, автоматичне блокування випрямляча у випадку зупинки вентиляції, похилу хімічно стійку підлогу зі збірними ємностями та постійний аварійний запас соди масою щонайменше 24 кг. На основі ДБН В.1.1-7:2016 розраховано динаміку евакуації 3 осіб через двері завширшки 0,9 м. Дійсний час виходу з приміщення завдовжки 10 м становить 13,8 с, що суттєво менше за

встановлений безпечний норматив 60 с і підтверджує надійність шляхів евакуації.

Висновки до розділу: 1) перед початком досліджень обов'язково одягають повний комплект засобів індивідуального захисту та перевіряють цілісність лабораторного посуду й ізоляції дротів. Також необхідно запустити витяжні системи та переконатися в наявності содового розчину для нейтралізації можливих аварійних витоків; 2) у ході виконання розділу проведено детальний аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів під час електрохімічного формування оксидних плівок на титані. Основними ризиками визначено хімічну агресивність використовуваних кислот, високу робочу напругу обладнання, термічні чинники та небезпеку утворення вибухонебезпечних воднево-кисневих сумішей; 3) на основі нормативного документа ДБН В.2.5-67:2013 виконано розрахунок місцевої бортової вентиляції для ванни хімічної обробки за температури електроліту 50°C. Встановлено, що для повної локалізації кислотних випаровувань продуктивність витяжної системи повинна становити не менше 1140 м³/год. Це гарантує підтримання концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони значно нижче рівнів ГДК; 4) відповідно до чинних «Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників» проведено розрахунок пожежного навантаження приміщення. Визначено, що для надійної протипожежної безпеки робочої площі оптимальним є розміщення двох вогнегасників: одного вуглекислотного типу ВВ-5 (для захисту електроніки та випрямлячів) та одного порошкового типу ВП-5; 6) розглянуто алгоритм дій персоналу у надзвичайних ситуаціях та виконано перерахунок часу евакуації; 7) після вимкнення струму зразки промивають, а використані електроліти зливають у спеціальну тару, вимикають вентиляцію, дезінфікують поверхні, знімають захисне спорядження та ретельно миють руки.

РОЗДІЛ 6 РОЗРАХУНОК СОБІВАРТОСТІ ВИКОНАННЯ ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ

Розрахунок собівартості дипломної роботи включає в себе калькуляцію певного переліку статей витрат. До них відносять: 1) витрати на матеріали; 2) витрати на оплату праці; 3) амортизацію основних фондів і нематеріальних елементів; 4) відрахування на соціальні заходи; 5) інші витрати.

6.1.1 Розрахунок матеріальних витрат

До матеріальних відносять 1) вартість сировини та матеріалів; 2) вартість придбаних виробів та напівфабрикатів; 3) вартість послуг та робіт, виконаних іншими особами або організаціями; 4) вартість енергії, витраченої на потреби, пов'язані із виконанням дослідження; 5) інші витрати. Кількість необхідних матеріалів встановлюють, виходячи з кількості дослідів, виконаних під час виконання експериментальної частини та витрат матеріалів на проведення одного експерименту (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Розрахунок витрат на матеріали для виконання НДР

Найменування матеріалу	Одиниці вимірювання	Необхідна кількість матеріалу, B_i	Ціна одиниці матеріалу, C_i , грн/од.	Сума, грн.
Кислота цитратна	кг	0,5	240	132
Кислота нітратна	л	1	65	71,50
Кислота фторидна	л	1	1100	1210
Натрію гідроксид	кг	0,5	150	82,50
Натрію фосфат	кг	0,5	150	82,50
Натрію силікат	кг	0,5	90	49,50
Разом, грн.				1628,00

Розрахунок проводять за формулою:

$$B_M = B_i \cdot C_i \cdot 1,1, \quad (6.1)$$

де B_i – витрати i -го матеріалу на проведення експерименту;

C_i – вартість i -го матеріалу, грн/од.;

1,1 – коефіцієнт, який враховує транспортні витрати.

Після розрахунку вартості матеріалів їх зводять у вигляді таблиці 6.1.

6.1.2 Розрахунок енергетичних витрат

Під час виконання лабораторних досліджень використовується, як правило, лише електрична енергія. Витрати на неї розраховують за формулою:

$$B_e = P_{\text{усті}} \cdot n_i \cdot t_i \cdot k_n \cdot C_e, \quad (6.2)$$

де $P_{\text{усті}}$ – електрична потужність i -го типу встаткування, кВт;

n_i – кількість i -го устаткування, од.;

t_i – тривалість роботи i -го устаткування, год;

k_n – коефіцієнт споживання, який дорівнює 1;

C_e – ціна 1 кВт·год електроенергії, грн/(кВт·год).

Значення електричної потужності, тривалості роботи обладнання та сумарні витрати електроенергії наведені у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Значення потужності обладнання, тривалості його роботи та вартість використаної електроенергії

Обладнання	Електрична потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Використана електроенергія, кВт·год	Вартість використаної електроенергії, грн.
1	2	3	4	5
Джерело живлення	0,3	50	15	64,80

Закінчення таблиці 6.2

1	2	3	4	5
Вольтметр	0,1	50	5	21,60
Сушильна шафа	0,5	10	5	21,60
Комп'ютер	0,15	120	18	77,76
Разом, грн.				185,76

6.1.3 Розрахунок витрат води

Витрати на воду для цілей розраховуються за формулою:

$$B_B = B_i \cdot m_i \cdot C_B, \quad (6.3)$$

де B_i – витрати води одиницею обладнання або на операцію, м³/год;

m_i – тривалість роботи обладнання, год;

C_B – ціна 1 м³ води, грн.

Витрати на воду наведені у таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Витрати на воду

Обладнання/операція	Витрати води, м ³	Тривалість використання, год	Об'єм використаної води, м ³	Вартість використаної води, грн.
Попереднє промивання	1,5	2	3	48,10
Кінцеве промивання	1,5	3	4,5	72,14
Миття посуду та приготування розчинів	10	2	20	320,64
Разом, грн.				440,86

6.1.4 Розрахунок амортизації основних фондів і нематеріальних активів

Амортизаційні відрахування розраховують за формулою:

$$A = (C_{об.}/12) \cdot m_i, \quad (6.4)$$

де $C_{об.}$ – вартість обладнання, грн. (табл. 6.4)

m_i – тривалість роботи обладнання, місяців (табл. 6.2).

Для лабораторного обладнання амортизацію розраховують вважаючи, що її річна норма складає 20 % його вартості.

Таблиця 6.4 – Вартість обладнання та амортизація

Обладнання	Вартість обладнання, грн.	Тривалість роботи, міс.	Амортизація, грн.
Джерело живлення	12000	0,30	60
Вольтметр	10000	0,30	50
Сушильна шафа	40000	0,06	40
Комп'ютер	23000	0,73	280
Разом, грн.			430,00

6.1.5 Розрахунок витрат на малоцінні та витратні матеріали

Витрати на малоцінні матеріали (лабораторний посуд, засоби захисту і т. д.) приймають у розмірі 8 % вартості обладнання (табл. 6.4):

$$(12000,00 + 10000,00 + 40000,00 + 23000,00) \cdot 0,08 = 6800,00 \text{ грн.}$$

6.1.6 Витрати на оплату праці і відрахування на соціальні заходи

Для розрахунку витрат на заробітну плату виконавців дослідної роботи складають таблицю 6.5. Заробітну платню вносять до таблиці без відрахувань на податки.

Преміальний фонд приймають у розмірі 20 % окладу. Суму надбавок обирають відповідно до норм організації.

Для наукових і науково-педагогічних працівників до окладу додають надбавки (за вчене звання, науковий ступінь, стаж роботи і т. д.).

Таблиця 6.5 – Заробітна плата виконавців дослідної роботи

Посада	Кількість робітників	Заробітна плата (оклад + премія/надбавки), грн.	Час роботи, міс.	Коефіцієнт участі у роботі	Сума, грн.
Керівник	1	28000,00	1	0,5	14000,0
Разом, грн.					14000,00

Преміальний фонд становить: $14000,00 \cdot 0,2 = 2200,00$.

6.1.7 Витрати на відрядження, контрагентські роботи, сторонні послуги, накладні витрати

Витрати на відрядження приймають у розмірі 12 % від заробітної плати.

Контрагентські роботи та послуги зі сторони становлять 10 % від фонду заробітної плати:

Накладні витрати (включно з витратами на господарські потреби, освітлення і т. п.) становить 10 % від заробітної плати:

Витрати на відрядження: $14000,00 \cdot 0,12 = 1680,00$ грн.

Контрагентські роботи: $14000 \cdot 0,10 = 1400,00$ грн.

Накладні витрати: $14000 \cdot 0,10 = 1400,00$ грн.

6.1.8 Кошторис витрат на проведення роботи

Кошторис дозволяє проаналізувати витрати та намітити шляхи їхнього скорочення. Загальний кошторис наведений у таблиці 6.6.

Загальні витрати на проведення дослідження $V_{\text{НДР}}$ визначають за формулою:

$$V_{\text{НДР}} = C_{\text{НДР}} \cdot 1,2; \quad (6.6)$$

$$V_{\text{НДР}} = 42924,62 \cdot 1,2 = 51509,544 \text{ грн,}$$

де $C_{\text{НДР}}$ – загальна сума витрат на проведення НДР за всіма статтями;

1,2 – коефіцієнт, який враховує планові нагромадження.

Таблиця 6.6 – Кошторис витрат на проведення науково-дослідної роботи

№	Статті витрат	Сума, грн.
1	Заробітна плата	14000,00
2	Преміальний фонд	2200,00
3	Витрати на відрядження	1680,00
4	Витрати на матеріали	1628,00
5	Витрати на електроенергію	185,76
6	Витрати на воду	440,86
7	Амортизаційні відчислення	430,00
8	Витрати на малоцінні та витратні матеріали	6800,00
9	Витрати на контрагентські та сторонні роботи	1400,00
10	Накладні витрати	1400,00
Разом, грн		30164,62

ВИСНОВКИ

1. Виконаний огляд літератури з теми дипломної роботи: наведені фізико-хімічні властивості титану, класифікація його сплавів, біоматеріали на основі титану, їхнє застосування, методи модифікації його поверхні, їхні переваги та недоліки.

2. Опрацьована методика анодування сплаву Ti6Al4V у розчинах цитратної кислоти.

3. Виконані дослідження електрохімічного оксидування сплаву за анодних густин струму в діапазоні 0,2–5 А/дм² та напруги формування в діапазоні 10–100 В. Встановлено, що визначальний вплив на процес утворення плівки має напруга на електролізері.

4. Проведений аналіз шкідливих факторів, якими супроводжувалось виконання дослідження та розглянуті заходи з їхнього усунення.

5. Виконаний розрахунок собівартості виконаної дослідної роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Bocchetta P., Chen L.-Y., Tardelli J. D. C., Reis A. C., Almeraya Calderón F., Leo P. Passive layers and corrosion resistance of biomedical Ti-6Al-4V and β -Ti alloys. *Coatings*. 2021. Vol. 11. P. 487–499.
2. Fojt J. Ti-6Al-4V alloy surface modification for medical applications. *Appl. Surf. Sci.* 2012. Vol. 262. P. 63–78.
3. Adya N., Alam M., Ravindranath T., Mubeen A., Saluja B. Corrosion in titanium dental implants: literature review. *J. Indian Prosthodont. Soc.* 2005. Vol. 5, P. 126–138.
4. Mohammed M. T., Khan Z. A., Siddiquee A. N. Surface modifications of titanium materials for developing corrosion in human body environment: a review. *Proc. Mat. Sci.* 2014. Vol. 6. P. 1610–1621.
5. Wang G., Li J., Lv K., Zhang W., Ding X., Yang G., Liu X., Jiang X. Surface thermal oxidation on titanium implants to enhance osteogenic activity and *in vivo* osseointegration. *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6. P. 31769–31789.
6. Hayle S. T., Gonfa G. G. Synthesis and characterization of titanium oxide nanomaterials using sol-gel method. *Am. J. Nanosci. Nanotech.* 2014. Vol. 1. P. 1–18.
7. Shevchenko G., Pylypenko O., Shkolnikova T., Gura S., Smirnova O. Production of nanosize interference-colored oxide films on the Ti6Al4V alloy surface using the method of electrochemical oxidation in succinate electrolytes. *Proceedings – IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO*. 2020. 908877. P. 216–219.
8. Pylypenko O. I., Maizelis A. A., Pancheva H., Zhelavska Yu. A. Electrochemical oxidation of vt6 titanium alloy in oxalic acid solutions. *Chemistry and Chemical Technology*. 2020. Vol. 14. P. 221–226.
9. Savvova O. V., Voronov H. K., Fesenko O. I., Smirnova O. L., Zhukov K., Pylypenko O. I. Using the electrochemical etching as a method for the preparation of

the titanium surface to get anodic oxide films. *Proceedings - IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO*. 2022. P. 348–351.

10. Pylypenko O. I. Fabrication of oxide coatings on titanium alloy Ti6Al4V by electrochemical oxidation in succinic acid solutions. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*. 2022. Vol. 20. P. 111–126.

11. Smirnova O. L., Sincheskul O. O., Nikonov A. Yu., Breslavets N. M., Pylypenko O. I. The obtaining two-layer oxide films on titanium medical implants by electrochemical oxidation in aqueous-organic electrolytes. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2021 - Conference Proceedings*. 2021. P. 387–391.

12. Pylypenko O., Smirnova O., Skorynina-Pohrebna O., Khoroshev O. Studying the insulating properties of oxide films obtained on the Ti6Al4V alloy in tartaric acid solutions using the method of electrochemical decoration by copper. *Chemistry and Chemical Technology*. 2021. Vol. 15. P. 526–535.

13. Smirnova O., Nikonov A., Mukhina Y., Pylypenko O. Electrochemical formation of oxide films on the titanium alloy of Ti6Al4V in ethylene glycol-water electrolytes to produce bioinert coatings and increase the corrosion. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 77–84.

14. Андрущенко О. О., Пилипенко О. І. Електрохімічне формування тонких інтерференційно-забарвлених оксидних плівок на сплаві Ti6Al4V в сульфатному електроліті. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. 2019. Iss. 1. P. 36–40.

15. Pilipenko A., Pancheva H., Deineka D., Vorozhbiyan R., Chyrkina M. Formation of oxide fuels on VT6 alloy in the conditions of anodical polarization in solutions H₂SO₄. *EEJET*. 2018. Iss. 3(6). P. 33–38.

16. Ivashchenko M., Smirnova O., Kyselova S., Avina S., Sincheskul A., Pilipenko A. Establishing the patterns in the formation of oxide films on the alloy Ti6Al4V in carbonic acid solutions. *EEJET*. 2018. No. 5(6). P. 21–26.

17. Пилипенко О. І., Владико О. О., Апалькова В. Є., Куц А. Ю., Мірошніченко М. Д., Манзолевський В. О. Використання електрохімічних

прийомів у виробництві імплантатів медичного призначення. Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій в умовах кризових ситуацій [Електронний ресурс] : матеріали Міжнар. науково-практичної інтернет-конф., Харків, 24–26 вересня 2024 р. – Харків : ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2024. – С. 44–46.

18. Апалькова В. Є., Владико О. О., Пилипенко О. І. Одержання оксидних плівок функціонального призначення на титановому сплаві Ti6Al4V методом електрохімічного оксидування. Матеріали XVIII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сталий розвиток міст: поствоєнний період» (90-ї науково-технічної конференції ХНУМГ ім. О. М. Бекетова) : в 5-и ч. / Ч. 2. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. 300 с. – С. 197–199.

19. Владико О. О., Пилипенко О. І. Забезпечення глибокої пасивації титану методом анодування у кислотних розчинах. Матеріали XIX Всеукраїнської науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти «Сталий розвиток міст: поствоєнний період» (91-ї науково-технічної конференції ХНУМГ ім. О. М. Бекетова) : в 5-и ч. / Ч. 2. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. 300 с. – С. 182–183.

20. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII : станом на 12 верес. 2025 р.

21. Про затвердження Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ДНАОП 0.00-1.21-98) : Наказ М-ва пр. та соц. політики України від 09.01.1998 № 4.

22. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ : Мінрегіон України, 2013.

23. Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні : Наказ М-ва внутр. справ України від 30.12.2014 № 1417 : станом на 27 лют. 2026 р.

24. Про затвердження Правил охорони праці під час електрохімічної обробки металів : Наказ М-ва енергетики та вугіл. пром-сті України від 13.02.2014 № 148.

25. Про забезпечення хімічної безпеки та управління хімічною продукцією : Закон України від 01.12.2022 № 2804-IX : станом на 2 берез. 2026 р. Кодекс цивільного захисту України : Кодекс України від 02.10.2012 № 5403-VI : станом на 30 берез. 2026 р. № 34-35.

26. Перелік хімічних речовин, класифікованих як небезпечні відповідно до GHS rev. 5 / Сектор REACH ДП «Черкаський НДІТЕХІМ».

27. Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони : Наказ МОЗ України від 09.07.2024 № 1192 : станом на 18 листоп. 2025 р.

28. Про затвердження Мінімальних вимог безпеки і охорони здоров'я при використанні працівниками засобів індивідуального захисту на робочому місці : Наказ М-ва соц. політики України від 29.11.2018 № 1804.

29. ДСТУ EN ISO 374-1:2018 Рукавички захисні від небезпечних хімічних речовин та мікроорганізмів. Частина 1. Термінологія та вимоги до експлуатаційних характеристик щодо ризиків від хімічних речовин (EN ISO 374-1:2016; A1:2018, IDT; ISO 374-1:2016; Amd. 1:2018, IDT).

30. Про затвердження Змін до правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників. 28.10.2020 № 765.

31. Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні : Наказ М-ва внутр. справ України від 30.12.2014 № 1417 : станом на 27 лют. 2026 р.

32. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. – К. : Мінрегіон України, 2016. – 45 с.

33. Класифікаційні ознаки надзвичайних ситуацій : Наказ Міністерства надзвичайних ситуацій України № 1400 від 12.12.2012 р.

34. Методичні рекомендації до виконання техніко-економічного розрахунку кваліфікаційних проєктів та робіт бакалавра і магістра (для здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 161 – Хімічні технології та інженерія) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. І. Пилипенко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – 11 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Тези доповіді Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції
«Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій в умовах кризових
ситуацій»

УДК 621.357

**ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ПРИЙОМІВ
У ВИРОБНИЦТВІ ІМПЛАНТАТІВ МЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Пилипенко Олексій Іванович,

кандидат технічних наук, доцент, доцент;

Владико Александра Олександрівна,

здобувачка освіти першого (бакалаврського) рівня;

Апалькова Валерія Євгенівна,

здобувачка освіти першого (бакалаврського) рівня;

¹Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова;**Куч Арна Юрївна,**

учениця 11 класу;

Мірошніченко Мирослава Дмитрівна,

учениця 10 класу;

Манзюлевський Владислав Олександрович,

вчитель хімії;

²Харківський науковий ліцей «Обдарованість» Харківської обласної ради*Oleksiy.Pylypenko@kname.edu.ua*

Визначальний вплив на рівень сучасного остеосинтезу або дентальної імплантології мають успіхи у напрямку розробки матеріалів для виготовлення медичних імплантатів. Внаслідок того, що елементи скелету та зуби працюють за змінних механічних навантажень, матеріали, призначені для їх заміни, повинні відповідати ряду вимог: мати високі механічні властивості, достатню хімічну стійкість, не виділяти в процесі експлуатації токсичних речовин, володіти біоінертністю відносно організму людини. Саме тому таке широке поширення для виготовлення імплантатів знайшли металеві, керамічні та полімерні матеріали [1].

У кожній групі з вищезгаданих матеріалів є переваги та недоліки. Керамічні матеріали характеризуються високою хімічною стійкістю та твердістю, але мають незначну ударну в'язкість (крихкі); полімерні матеріали є технологічними та дозволяють отримувати вироби різноманітної форми, але вони недостатньо механічно міцні. Найбільш широко для виготовлення імплантатів кісток використовуються металеві сплави, які мають прийнятне поєднання міцності і в'язкості та достатньо стійкі у організмі людини. Для виготовлення складених імплантатів використовуються конструкції, окремі частини яких виготовлені з металів, полімерів та керамічних матеріалів.

Що стосується металевих імплантатів, то значний вплив на їх поведінку після імплантації має стан їх поверхні. Тому методи модифікування поверхневого шару імплантатів мають неабияке значення. Серед методів

модифікування поверхні, наприклад, титанових імплантатів які є найбільш поширеними, важливе місце належить електрохімічним. Використання електрохімічних прийомів дозволяє проводити полірування металевих поверхонь, формування оксидних покриттів і навіть знезаражувати імплантати.

Електрохімічне полірування дозволяє ефективно згладжувати мікронерівності поверхні шляхом проведення контрольованої анодної обробки металів [2, 3]. Його перевагами є можливість видалення дефектного поверхневого шару з формуванням блискучої поверхні зі згладженим рельєфом. Згладжена поверхня імплантатів важлива у випадку контакту його поверхні з м'якими тканинами пацієнта. Оксидування (анодування) дозволяє сформувати поверхневі оксидні плівки заданої товщини, які складаються з діоксиду титану та мають властивості біоінертності та біосумісності [4, 5]. Окремо слід відзначити можливість використання електролізу для знезараження поверхні титанових дентальних імплантатів, що може знизити ризик виникнення інфекційних запалень після імплантації [6].

Список використаних джерел

1. Saini M., Singh Y., Arora P., Arora V., Jain K. Implant biomaterials: A comprehensive review. *World Journal of Clinical Cases*. 2015. Vol. 3. No. 1. P. 52–57.
2. Silchenko D., Pilipenko A., Pancheva H., Khrystych O., Chyrkina M., Semenov E. Establishing the patterns in anode behavior of copper in phosphoric acid solutions when adding alcohols. *EEJET*. 2018. Vol. 4. Iss. 6. P. 35–41.
3. Sil'chenko D., Reznichenko G., Maksimenko O., Pancheva H., Mykhailova E., Pylypenko O. Studying the effect of butanol on the anode behavior of copper in phosphoric acid solutions. *Chemistry & Chemistry Technology*. 2022. Vol. 16, No. 1. P. 103–111.
4. Shevchenko G., Pilipenko A., Shkolnikova T., Gura S., Smirnova O. Production of nanosize interference-colored oxide films on the Ti6Al4V alloy surface using the method of electrochemical oxydation in succinate electrolytes. *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. P. 216–219.
5. Smirnova O., Nikonov A., Mukhina Yu., Pylypenko O. Electrochemical formation of oxide films on the titanium alloy of Ti6Al4V in ethylene glycol-water electrolytes to produce bioinert coatings and increase the corrosion. *Materials Science Forum*. Vol. 1038. P. 77–84.
6. Mohn D., Zehnder M., Stark W. J., Imfeld T. Electrochemical disinfection of dental implants – a proof of concept. *PLoS One*. 2011. Vol. 6. Iss. 1. e16157.

ДОДАТОК Б

Матеріали XVIII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сталий розвиток міст: поствоєнний період» (90-ї науково-технічної конференції ХНУМГ ім. О. М. Бекетова

прозоре та доступне управління міською інфраструктурою з урахуванням сучасних викликів.

Список використаних джерел

1. «Навігаційно-геодезичний центр» Майстер-представник Leica Geosystems в Україні URL: <https://ngc.com.ua/ua/index.html>

СЕКЦІЯ ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖЕНЕРІЯ

Керівник – канд. техн. наук, доц. Пилипенко О.І.

Секретар – студентка 3 курсу ННІ ЕІТІ Владико О. О.

ОДЕРЖАННЯ ОКСИДНИХ ПЛІВОК ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ТИТАНОВОМУ СПЛАВІ Ti6Al4V МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ОКСИДУВАННЯ

Апалькова В.Є., Владико О. О.

Науковий керівник – Пилипенко О. І., канд. техн. наук, доцент

Оксидні плівки, сформовані на поверхні титану або його сплавів представляють практичний інтерес для використання у хірургічній галузі з ряду причин. Серед них ми можемо відмітити наступні:

– наявність щільної структури, яка обумовлює гарні пасивуючі властивості плівки та добре захищає основу від навіть за незначної товщини (декілька нм);

– титану діоксид, який складає плівку, характеризується біоінертністю та біоактивністю. Біоінертність дозволяє забезпечити гарну сумісність титанових матеріалів з біологічними середовищами, зокрема, внутрішнім середовищем організму людини. Біоактивність обумовлена тим, що сформований TiO₂ дозволяє утворити міцний контакт з оточуючими живими тканинами, що обумовлює гарну інтеграцію з організмом людини.

Перевагами методу електрохімічного оксидування (анодування) є можливість утворення однорідних оксидних плівок певної товщини на виробках складної форми з використанням простого обладнання. У

якості електролітів для одержання плівок можна використовувати розчини солей, кислот або їх суміші.

З практичної точки зору зручним є використання малотоксичних неагресивних електролітів. Серед них варто особливо відмітити карбонові кислоти в яких можна отримати оксидні плівки з інтерференційним забарвленням. Перевагами карбонових кислот є й те, що вони є слабкими електролітами, що зменшує вірогідність їх впливу на отримані плівки.

Крім того, оксидні плівки, навіть ті, що відносяться до плівок ізолюючого типу, все ж таки не мають ідеальних діелектричних властивостей. До їх складу можуть включатися компоненти розчину, в тому числі й іони електроліту, які є небажаними. Наприклад, під час оксидування титану у фторидвмісних електролітах, можливим є включення до складу плівок фторид-іонів, які справляють токсичну дію на організм людини.

Використання ацетатних електролітів для електрохімічного оксидування титанових матеріалів дозволяє виключити впровадження до оксидних плівок небезпечних іонів. Ацетатний іон має порівняно великі розміри й може бути легко видалений із синтезованої оксидної плівки шляхом обробки оксидованої деталі кип'ятінням у дистильованій воді.

Список використаних джерел:

1. Пилипенко О. І., Смірнов О. О., Зайцева І. С. [та ін.]. Поведінка титану VT1-0 в умовах анодної поляризації у системі «етиленгліколь – вода – HF – NH₄F». *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34(73). № 3. С 85–89.
2. Shevchenko G., Pilipenko A., Shkolnikova T. [et al.]. Production of nanosize interference-colored oxide films on the Ti6Al4V alloy surface using the method of electrochemical oxydation in succinate eletrolytes. 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2020. P. 216–219.
3. Pilipenko A., Smirnova O., Gura S. [et al.]. Studying the insulating properties of oxide films obtained on the Ti6Al4V alloy in tartaric acid solutions using the method of electrochemical decoration by copper. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 15. No. 15. P. 1657–1666.
4. Savvova O., Voronov G., Fesenko O. [et al.]. Using the electrochemical etching as a method for the preparation of the titanium surface to get anodic oxide films. 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2020. P. 348–351.

5. Андрущенко О. О., Пилипенко О. І. Електрохімічне формування тонких інтерференційно-зabarвлених оксидних плівок на сплаві Ti6Al4V в сульфатному електроліті. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. 2019. № 1. С. 36–40.

6. Smirnova O., Nikonov A., Mukhina Yu. [et al.]. Electrochemical formation of oxide films on the titanium alloy of Ti6Al4V in ethylene glycol-water electrolytes to produce bioinert coatings and increase the corrosion. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 77–84.

ТЕРМОДИНАМІЧНА ОЦІНКА ФАЗОУТВОРЕННЯ ЕВКРИПТИТУ З КОМПОЗИЦІЙ РІЗНОГО СКЛАДУ

Бражник Г.О.

Науковий керівник – Савцова О.В., докт.техн.наук, професор.

Тенденції розвитку сьогодення України ставить перед матеріалознавцями задачу швидкого та ефективного відновлення промислових об'єктів у тому числі енергетичної інфраструктури.

Склокристалічні та керамічні матеріали виконують роль захисних функцій в устаткуванні електричних приладів в якості створення діелектричних покриттів або самих елементів електричних конструкцій.

Перевагу про виборі створення захисного покриття надають склокристалічним композиціям, які задовольняють основним технічним вимогам по забезпеченню нормального та ефективного функціонування електричних приладів в умовах впливу енергетичного навантаження та навколишнього середовища. Діелектричні матеріали забезпечують відповідні показники межі міцності при стисканні, вигін, характеризуватися високою термостійкістю, мають бути вологостійкими, хімічно стійкими та нерозчинними.

Одним з перспективних матеріалів, що застосовують в якості діелектричного покриття є склокристалічні матеріали на основі евкриптиту. Головна особливість евкриптиту полягає у низькому значенні ТКЛР, а введення його в склад матриці сприяє підвищенню термостійкості матеріалу.

Мета роботи полягала в аналізі змін ізобарно-ізотермічного термодинамічного потенціалу подвійних та потрійних сполук

ДОДАТОК В

Матеріали XIX Всеукраїнської науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти «Сталий розвиток міст: пост воєнний період»

3. Mao J. et al. Flexible and high-strength bioactive glass fiber membrane for bone regeneration. *Materials Today Bio*, № 28, 101224 (2024).

doi.org/10.1016/j.mtbio.2024.101224

4. Akhtar R., Bano S., Akhtar M.R. Bone regeneration by bioactive glass fibrous threads and glass beads: Narrative review. *J. Pakistan Med. Assoc.*, 75(11), 1777–1784 (2025). [doi:10.47391/JPMA.11165](https://doi.org/10.47391/JPMA.11165).

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГЛИБОКОЇ ПАСИВАЦІЇ ТИТАНУ МЕТОДОМ АНОДУВАННЯ У КИСЛОТНИХ РОЗЧИНАХ

Владико О. О.

Науковий керівник – Пиліпенко О. І., канд. техн. наук, доцент

Висока хімічна стійкість титану обумовлюється наявністю на його поверхні оксидних плівок, які утворюються самочинним шляхом під час взаємодії металу із окислювальними середовищами (розчинами окисників, водою, повітрям) [1]. Природна плівка є тонкою (6–9 нм), але внаслідок своєї щільної структури, має гарні ізолюючі властивості, що обумовлює перехід титану до пасивного стану [2]. Внаслідок цього, не зважаючи на теоретичну термодинамічну нестабільність, титан характеризується виключно високою корозійною стійкістю у багатьох середовищах. Для одержання потовщених плівок розроблений ряд методів, найбільш поширеним із яких є метод анодування, що полягає у електрохімічному окисненні поверхні металу в розчині електроліту. Окрім захисних властивостей, анодні плівки мають розвинену структуру і представляють інтерес як підшар для нанесення на титан гальванічних, а також полімерних та композиційних покриттів [3, 4], які використовуються як функціональні матеріали.

Список використаних джерел

1. Smimova O., Nikonov A., Mukhina Yu. [et al.]. Electrochemical formation of oxide films on the titanium alloy of Ti6Al4V in ethylene glycol-water electrolytes to produce bioinert coatings and increase the corrosion. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 77–84.

2. Pilipenko A., Smimova O., Gura S. [et al.]. Studying the insulating properties of oxide films obtained on the Ti6Al4V alloy in tartaric acid solutions using the method of electrochemical decoration by copper. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 15. No. 15. P. 1657–1666.

3. Skripinets A., Saienko N., Danchenko Y. [et al.]. Corrosion-resistant epoxy coating for protection of structural glued-laminated timber in high humidity conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1164(1). 012073. doi:10.1088/1757-899X/1164/1/012073.

4. Skripinets A., Saienko N., Bikov R. [et al.]. Study of viscoelastic properties of epoxyurethane compositions for vibration protection of metal products. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2684. 040024. doi:10.1063/5.0133582.

ПРИНЦИПИ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ В СУЧАСНОМУ ВИРОБНИЦТВІ КЕРАМІЧНОЇ ПЛИТКИ

Яковлева П.Є., Коврігін М.В.

Науковий керівник – Савцова О.В., докт. техн. наук, професор

Сучасна керамічна промисловість є одним із важливих секторів матеріального виробництва світової економіки і характеризується значним споживанням ресурсів і енергії. Традиційна лінійна модель «виробництво – споживання – утилізація» призводить до виснаження природних ресурсів та накопичення відходів. У відповідь на ці виклики зростає інтерес до циркулярної економіки, яка передбачає замкнутий ресурсний цикл із повторним використанням, переробкою та рекуперацією матеріалів. Ця модель відповідає базовим принципам сталого розвитку та глобальним екологічним ініціативам, зокрема Європейській зеленій угоді, спрямованій на декарбонізацію та ресурсоефективність виробництва [1].

Циркулярна економіка (ЦЕ) є концептуальною моделлю, що замінює традиційну лінійну модель замкненим циклом ресурсних потоків, де вагомими є стратегії скорочення споживання ресурсів, повторне використання матеріалів та їх переробка [2]. У межах промислового виробництва це означає оптимізацію технологічних процесів для мінімізації відходів, підвищення ефективності використання матеріалів та енергії, а також забезпечення максимальної утилізації побічних продуктів виробництва. Впровадження принципів ЦЕ базується на кількох ключових напрямках:

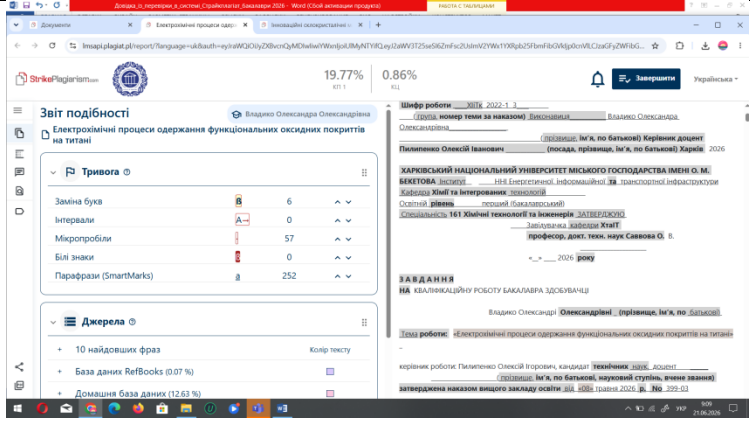
1. Оптимізація сировинних ресурсів. ЦЕ передбачає заміну частини первинних природних матеріалів на вторинні (відходи виробництва та виробів у кінці життєвого циклу), що зменшує потребу в видобутку нової сировини та знижує викиди CO₂ від видобутку та

ДОДАТОК Г

ДОВІДКА

**щодо перевірки кваліфікаційної роботи студента
в інформаційній онлайн-системі «StrikePlagiarism»**

1. Дані про кваліфікаційну роботу студента

1	П.І.Б. студента	Владико Олександра Олександрівна
2	Група, курс, інститут	XITk 2022-1
3	Спеціальність, освітня програма, форма навчання	161 Хімічні технології та інженерія, Хімічні технології та інженерія, денна
4	Назва роботи	Електрохімічні процеси одержання функціональних оксидних покриттів на титані
5	Ідентифікаційний код в системі	334380697
6	Керівник роботи	Пилипенко Олексій Іванович
7	Дата перевірки	21 червня 2026 р.
8	За результатами перевірки оригінальний текст в роботі складає (%)	80,2
9	Копія з екрану	

2. Пояснення щодо відсотку тексту, який не є оригінальним
– елементи правомірних запозичень

Виявлені запозичення	Відмітка про наявність
Регламентовані компоненти оформлення роботи (титульний аркуш, бланк завдання; встановлені назви розділів; назви ЗВО, кафедри тощо)	так
Власні назви установ, організацій; власні імена; назви програмних продуктів; торгові марки обладнання; матеріалів та речовин тощо	так
Загальноприйняті наукові положення, основоположні теоретичні принципи	так
Усталені словосполучення або описи процесів, характерні для сфери знань відповідно до тематики розділів роботи	так
Бібліографічні посилання на джерела	так
Цитування, оформлене відповідно до вимог, в тому числі раніше опублікованих власних досліджень автора	так
інше	ні

– елементи неправомірних запозичень, що є академічним плагіатом

Виявлені запозичення	Відмітка про наявність
Цитування, яке не оформлене відповідно до вимог, в тому числі раніше опублікованих власних досліджень автора	ні
Подання колективної роботи як індивідуальної або роботи іншого автора як власних досліджень; використання чужих висновків або аналізу без відповідного цитування	ні
Підміна оригінальних джерел вигаданими; спотворення джерел або даних для підтвердження думки чи гіпотези автора; видалення небажаних результатів із набору даних	ні
Переклад іноземних джерел без посилання	ні
Наявність текстових спотворень для маскування цитування без посилання (парафраз, синонімізація, зміна структури тексту при збереженні змісту)	ні
інше	ні

* наявність хоча б одного елементу неправомірних запозичень, що є академічним плагіатом, розглядається як підстава для направлення кваліфікаційної роботи для доопрацювання або відхилення залежно від коефіцієнту оригінальності

Довідку склав
21.06.2026 р.



Скрипинець Анна Василівна

Склад комісії: (з врахуванням недопущення конфлікту інтересів):

Голова комісії:

завідувачка кафедри хімії та інтегрованих технологій Саввова Оксана Вікторівна.

Члени комісії:

доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій Скрипинець Анна Василівна,

доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій Бабіч Олена Вікторівна;

здобувачка вищої освіти другого (магістерського) рівня Яковлева Поліна Єгорівна.