ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

магістра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Галузь знань **13 Механічна інженерія**

Шифр і назва галузі знань

Напрям підготовки (спеціальність): 132 «Матеріалознавство. Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

Шифр і назва напряму підготовки (спеціальності)

на тему: ***«Оптимізація параметрів процесу електролітичного оксидування алюмінієвого сплаву для зірочок спортивних мотоциклів»***

Шифр ***МРТАМ 24.18191.000 ПЗ***

Виконав: *студент 2-го курсу,*
група *МТВАм-23-1*

Підпис *І. І. Баранов*
Ініціали, прізвище

Керівник *к.т.н., доц. каф ТАМ.*

Підпис *С. Ф. Посонський*
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри ТАМ д.т.н., проф.

Підпис *О. В. Диха*
Ініціали, прізвище

11 12 2024 р.

Хмельницький, 2024

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *інженерії, транспорту та архітектури*
Кафедра *трибології, автомобілів та матеріалознавства*
Освітній рівень *магістр*

Спеціальність ***132 «Матеріалознавство».***
Спеціалізація ***«Відновлення та технічний сервіс автомобілів»***

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ

Диха О.В.
10 жовтня 2024 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Баранову Ігорю Ігоровичу
Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: ***Оптимізація параметрів процесу електролітичного оксидування алюмінієвого сплаву для зірочок спортивних мотоциклів***
керівник роботи: *Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.*
Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від *26.08.2024р. № 60 (Д 28)*

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру ***16.12.2024 р.***

3. Вихідні дані до проекту (роботи) *Матеріали курсових проектів, переддипломної практики.*

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

1) Аналіз умов роботи зірок ланцюгової передачі мотоциклів

2) Аналітичний огляд літературних джерел з плазмово електролітичного оксидування виробів

3) Методика досліджень

4) Аналіз результатів досліджень.

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.

6. **Консультанти розділів проекту (роботи)**

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. **Дата видачі завдання** *10 жовтня 2024 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	*Примітка*
1	*Аналіз умов роботи зірок ланцюгової передачі мотоциклів*	*30.10.24*	*вик*
2	*Аналітичний огляд літературних джерел з плазмово електролітичного оксидування виробів*	*15.11.24*	*вик*
3	*Методика досліджень*	*23.11.24*	*вик*
4	*Аналіз результатів досліджень*	*4.12.24*	*вик*
5	*Оформлення пояснювальної записки*	*6.12.24*	*вик*
6	*Допуск до захисту*	*12.12.24*	*вик*
7	*Захист дипломної роботи*	*20.12.24*	

Студент _____ ***Баранов І.І.***
Підпис Ініціали, прізвище

Керівник роботи _____ ***Посонський С. Ф.***
Підпис Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Студент групи МТВАм-23-1 Баранов Ігор Ігорович.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему ***«Оптимізація параметрів процесу електролітичного оксидування алюмінієвого сплаву для зірочок спортивних мотоциклів»*** складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 33 найменування, розміщених на 3 сторінках, та додатків розміщених на сторінках. Роботу викладено на 79 сторінках, з них 72 сторінки основного тексту, на яких розміщено 33 рисунки і 7 таблиць.

Для виготовлення зірок застосовують різні матеріали, зазвичай це сталь, алюміній або композити. Сталеві зірки більш довговічні, тому їх раціональніше використовувати для міських поїздок мотоциклом, тоді як алюмінієві, що значно легші, краще підходять для змагань у перегонах, де вага відіграє певну роль.

Алюмінієвий сплав АА7075, що являє собою сплав Al-Zn-Mg-Cu, є найбільш важливим та найміцнішим сплавом серед усіх алюмінієвих сплавів, що використовуються в автомобілебудуванні, медичній, авіаційній і військовій промисловості. Цей сплав часто використовується для конструкційних компонентів у деталях літаків, спортивних автомобілях, мотоциклах і велосипедах та інших виробах, що вимагають високої міцності та мінімальної ваги. Саме тому термін його служби можна продовжити за рахунок покращення властивостей його поверхні, щоб зупинити деградацію і зберегти робочі характеристики деталей, тим самим збільшити ресурс.

Хоча сам по собі сплав має гарні механічні характеристики він добре піддається плазмово-електролітичному оксидуванню. Однак, слід відмітити, що на корозійну поведінку та характеристики поверхонь з ПЕО-покриттям можуть суттєво впливати хімічний склад покриття, його мікроструктура і адгезія до підкладки. Крім того, зміна параметрів процесу таких як хімічний склад, щільність струму та температура електроліту

Метою роботи є дослідження впливу щільності струму на формування та властивості захисного покриття через процес плазмового електролітичного оксидування мотоциклетних зірочок з алюмінієвого сплаву АА7075.

Ключові слова: ЗІРКА; МОТОЦИКЛ; НАПРУЖЕННЯ; АЛЮМІНІЄВИЙ СПЛАВ АА7075; ПЛАЗМОВО-ЕЛЕКТРОЛІТИЧНЕ ОКСИДУВАННЯ; ПОКРИТТЯ; ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, МІКРОСТРУКТУРА.

ЗМІСТ

ВСТУП 7

1 АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ ЗІРОК ЛАНЦЮГОВОЇ ПЕРЕДАЧІ МОТОЦИКЛІВ 9

1.1 Конструктивні елементи ланцюгової передачі мотоцикла 9

1.2 Аналіз напружено-деформованого стану зірочки мотоцикла . 16

1.2.1 Параметри ланцюгової передачі 16

1.2.2 Вибір матеріалу 17

1.2.3 Геометричний розрахунок зірочки 18

1.2.4 Статичний аналіз зірочки за допомогою ANSYS 19

2 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПЛАЗМОВО ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ОКСИДУВАННЯ ВИРОБІВ 25

2.1 Огляд плазмово-електролітичного оксидування 28

2.2 Принцип утворення покриття методом ПЕО 29

2.3 Електроліт Na_2SiO_3 для ПОЕ 31

2.4 Методи нанесення покриттів на алюмінієві сплави 32

2.5 Аналіз досліджень покриттів для А7075 33

2.6 Порівняння з існуючими покриттями 35

3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЬ 37

3.1 Матеріали для досліджень 37

3.2 Скануюча електронна мікроскопія (SEM) 41

3.3 Рентгенівська дифракція (XRD) 44

3.4 Енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія (TDS) 49

3.5 Устаткування та параметри для процесу ПОЕ 50
4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ 52
4.1 Аналіз поперечного перерізу покриття 52
4.2 Аналіз морфології покриття 54
4.4 Аналіз хімічного складу 57
4.5 Оцінка зносостійкості 66
4.6 Вплив щільності струму 71
ВИСНОВКИ 74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 75
ДОДАТКИ 79

ВСТУП

Одними з ключових деталей, що забезпечують ефективну передачу потужності від двигуна мотоцикла до заднього колеса є зірки передні і задні. Зірки задні є частиною системи приводу мотоцикла та працюють у парі з ланцюгом. З часом вони зношуються, що призводить до проблем із передачею крутного моменту та потужності, або інших неприємностей. Зношені зірки можуть призводити до вібрації, нестабільної роботи та зниження ефективності передачі потужності.

Потенційні причини цих проблем включають значні поломки від перевантаження, високий ударний тиск, поєднання зношеного ланцюга з новими зірочками та надмірний знос ланцюга, що перевищує порогове значення заміни. Крім того, зуб зірочки зношується, а зовнішня поверхня стає шорсткою, що впливає на передачу руху в мотоциклі. Згідно з опитуваннями, зірочка приводного ланцюга мотоцикла зазвичай вимагає заміни після пробігу приблизно 20 000 км [1].

Заміна задніх зірок на мотоциклі може проводитись в залежності від їх зношування, або за необхідності умов експлуатації мотоцикла. Для виготовлення зірок застосовують різні матеріали, зазвичай це сталь, алюміній або композити. Сталеві зірки більш довговічні, тому їх раціональніше використовувати для міських поїздок мотоциклом, тоді як алюмінієві, що значно легші, краще підходять для змагань у перегонах, де вага відіграє певну роль.

Алюмінієвий сплав AA7075, що являє собою сплав Al-Zn-Mg-Cu, є найбільш важливим та найміцнішим сплавом серед усіх алюмінієвих сплавів, що використовуються в автомобілебудуванні, медичній, авіаційній і військовій промисловості. Він володіє гарною стійкістю до корозійного розтріскування під напруженнями, високою міцністю та високою

продуктивністю при помірно підвищених температурах, що становлять близько 300 °C. Цей сплав часто використовується для конструкційних компонентів у деталях літаків, спортивних автомобілях, мотоциклах і велосипедах та інших виробах, що вимагають високої міцності та мінімальної ваги. Саме тому термін його служби можна продовжити за рахунок покращення властивостей його поверхні, щоб зупинити деградацію і зберегти робочі характеристики деталей, тим самим збільшити ресурс.

Хоча сам по собі сплав має гарні механічні характеристики він добре піддається плазмово-електролітичному оксидуванню. Плазмове електролітичне оксидування - це передовий метод обробки поверхні, що використовується для значного покращення властивостей поверхні легких металів, таких як алюміній, магній та титан. ПЕО модифікує поверхню, створюючи захисні оксидні керамічні покриття з високою концентрацією аніонів, невпорядкованою кристалічною решіткою та пористою структурою, посиленою мережею мікропор і мікро тріщин. Цей тип мікроструктури унікальний для плазмово-електролітичних покриттів і не зустрічається у звичайних анодованих покриттях, що можна отримати традиційними методами анодування постійним струмом. Покриття плазмово-електролітичного оксидування (ПЕО) володіють рядом переважних властивостей, таких як зносостійкість, висока твердість, а також забезпечують хороші електро- і тепло ізоляції. Крім того, вони мають високий рівень корозійної стійкості і здатні знижувати коефіцієнт тертя. Однак, слід відмітити, що на корозійну поведінку та характеристики поверхонь з ПЕО-покриттям можуть суттєво впливати хімічний склад покриття, його мікроструктура і адгезія до підкладки. Крім того, зміна параметрів процесу таких як хімічний склад, щільність струму та температура електроліту, і не слід забувати про попередню обробку поверхні підкладки.

В роботі вивчаються можливості застосування плазмового електролітичного оксидування підвищення зносостійкості зірочок з алюмінієвого сплаву АА7075.

Метою роботи є дослідження впливу щільності струму на формування та властивості захисного покриття через процес плазмового електролітичного оксидування мотоциклетних зірочок з алюмінієвого сплаву АА7075.

Завдання роботи:

1. Виконати аналіз умов роботи зірочки приводу колеса мотоцикла.
2. Аналіз можливостей застосування плазмового електролітичного оксидування для підвищення виробів з алюмінієвого сплаву АА7075.
3. Виконати аналіз властивостей покриттів отриманих методом плазмово електролітичнного оксидування з оптимізаціє процесу по щільності струму.

1 АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ ЗІРОК ЛАНЦЮГОВОЇ ПЕРЕДАЧІ МОТОЦИКЛІВ

1.1 Конструктивні елементи ланцюгової передачі мотоцикла.

Для передачі потужності від двигуна внутрішнього згоряння на заднє колесо мотоцикла зазвичай застосовується головна ланцюгова передача. Така ж система застосовується і у мототехніки, що оснащена ланцюгами замість ременів чи валів.

Для функціонування ланцюгового приводу використовуються зірочки, що є металевими зубчастими колесами. Кожна приводна система складається з двох зірочок, які з'єднуються ланцюгом.

Зірочка (рис. 1.1, а) - це профільоване колесо із зубами або зубцями, які зачіпаються з ланцюгом (рис. 1.1, б) або іншим перфорованим або заглибленим матеріалом. Зірочки повинні передавати потужність на задню вісь у велосипедах і мотоциклах, а також автомобілях в автомобільному секторі.

а) б)

Рисунок 1.1 – Елементи ланцюгової передачі

а) – зірочка, б – роликовий ланцюг.

Зірочки використовуються в автомобілях для передачі обертального руху між двома валами, де зубчасті колеса непридатні, або для надання лінійного руху гусениці, стрічці тощо. Ранні автомобілі також в основному приводилися в рух зірочкою та ланцюговим механізмом, практика значною мірою скопійована з велосипедів.

Зірочки бувають різних конструкцій, максимальна ефективність яких заявлена для кожної її виробником. Зірочки зазвичай не мають фланця. Деякі зірочки, які використовуються з зубчастими пасами, мають фланці, щоб утримувати зубчастий ремінь у центрі. Зірочки та ланцюги використовуються для передачі потужності від одного валу до іншого без ковзання. Зірочки з'єднані з ланцюговою передачею і обертаються з великою швидкістю безшумно замість ланок ланцюга.

Зірочки повинні бути якомога більшого розміру. Чим більша зірочка, тим менше робоче навантаження для певної потужності, що передається, що дозволяє використовувати ланцюг з меншим кроком.

У мотоциклі використовують лише два види зірок [1]:

- привідні, бувають алюмінієвими або сталевими. Відрізняються підвищеною зносостійкістю та довговічністю. Передні зірки завжди менші. Їх встановлюють на шліци вихідних валів КПП із зовнішнього боку та закривають захисними кришками.
- ведені, бувають алюмінієвими та сталевими. Порівняно зі сталлю алюміній зношується на 30–50 % швидше і коштує дорожче. Задні зірочки мають більший розмір і кріпляться на маточини до задніх коліс. Алюмінієві запчастини можуть бути різного кольору. Рідко зустрічаються біметалічні зірочки. Такі деталі складаються з двох видів металу: алюмінієва частина знаходиться з боку кріплення до втулки, а сталева це зубці, тобто, робоча поверхня. Переваги біметалу: міцність, зносостійкість та довговічність. Основними недоліками є висока вартість та індивідуальність виготовлення.

Точний розмір серійних зірочок можна знайти в інструкції з експлуатації мотоцикла, а спортивних – необхідно підбирати. До основних критеріїв вибору відносять наступні:

1) Матеріал: сталь або алюміній. Як правило, для мотогонок вибирають алюміній.

2) Розмір зірочок. Цей параметр визначає кількість зубців. Розмір веденої зірки в середньому 10-18 зубів, ведучої - 28-64 зубці.

3) Відстань між зубами, або також називають кроком.

4) Товщина зірки.

Слід зауважити, що разом із зірочкою необхідно замінити ланцюг. Таке рішення дозволяє точно підібрати елементи ланцюгової передачі один для одного. Використання старого ланцюга разом з використанням нових зубчастих елементів, або навпаки, призведе до швидко зносу трансмісії.

Для оптимального вибору комбінації зірок орієнтуються на такі правила:

1) Для кожної моделі та класу мотоцикла використовується різне співвідношення зірок.

2) Досвід водія (гонщика) також відіграє роль. Початківцям краще дотримуватися передавального числа передачі, що вказано в посібнику з експлуатації.

3) Для зміни характеристик мотоцикла, необхідно пам’ятати основні правила, якщо ви змінюєте один зуб на веденому колесі, продуктивність практично не змінюється. Це пов'язано з тим, що задня зірка завжди більша за передню. Але зменшення на один зуб ведучого колеса прирівнюється додаванню трьох зубів веденому. З цієї причини краще починати із заміни задньої зірочки.

Передні зірки мають більший вплив на характеристики мотоциклу. Навіть незначна зміна призводить до зменшення або збільшення продуктивності. Це більше стосується маленьких розмірів зубчастих коліс.

Невірне співвідношення може призвести до збільшення сили тертя або зниження потужності ДВЗ та, відповідно, швидкого зношування ланцюгової передачі. Найчастіше розмір збільшують чи зменшують на 1 зуб.

Якщо збільшити кількість зубів веденої і зменшити привідної зірочки, то відбудеться збільшення крутного моменту на колесі із зменшенням максимальної швидкості.

Якщо зменшити кількість зубів веденої і збільшити привідної, відбудеться зменшення крутного моменту на колесі із збільшенням максимальної швидкості.

Якщо на байку стоїть задня зірочка на 41 зуб, а в наявності тільки на 42, це ніяк не вплине на довжину ланцюга та характеристики мотоцикла. Ви відчуєте зміни лише від 2 зубців. Наприклад, стояв розмір 46, яке поміняли на 48 чи 50 [1].

Для більш агресивної манери водіння та різноманітних трюків досвідчені гонщики збільшують заднє зубчасте колесо, а переднє зменшують. За умов асфальтованих доріг, для швидкісного водіння, використовують зворотну схему заміни.

Список найпопулярніших брендів виробників зірочок мотоциклів наступний [2].

Бельгійський бренд «AFAM» - один із головних постачальників зірочок для професійних мотогонок. Продукція компанії відрізняється високою якістю та міцністю. Завдяки спеціальній обробці металу, зірочки «AFAM» мають невелику вагу і зберігають при цьому максимальну жорсткість.

Бренд «JT» належить найбільшій англійській компанії Bike Alert, що спеціалізується на виробництві запчастин для мототехніки. Зірочки «JT» виробляються на заводах Азії. Щорічно концерн випускає понад 4 тисячі моделей зірок. Застосування високоміцної вуглецевої сталі марки С49 для задніх зубчастих елементів та японського сталевого сплаву для передніх. Для гоночних зірочок використовують авіаційний алюміній із Австрії. Гарантія

високої точності виготовлення та відповідності стандартам за рахунок застосування сучасних способів обробки металів.

Компанія «Sunstar» понад 50 років випускає ланцюги, зірки та гальмівні диски для мототехніки. Сьогодні зірочки цього бренду встановлюють на мотоцикли «YAMAHA». Продукція японського виробника відрізняється довговічністю та зносостійкістю навіть при підвищених навантаженнях. У виробництві зірочок застосовується високовуглецева сталь та авіаційний алюміній. Кожен виріб проходить спеціальну термообробку, що дозволяє запобігти корозії та окисленню деталей.

«ESJOT», продукція цього німецького бренду відповідає найвищим вимогам стандарту OEM. У виробництві запчастин компанія застосовує запатентовану технологію «Diamond Cut 2.0», що дозволяє збільшити термін служби та зносостійкість зубчастих елементів.

Італійська компанія «PBR» ще з 1970-х років спеціалізується на виробництві запчастин для мототехніки. У виробництві зірочок застосовуються новітні технології та спеціальні металеві сплави, що дозволяє досягти високої якості і довговічності готових виробів. Запчастини «PBR» використовують професійні мотогонщики. Також компанія співпрацює з «Aprilla», «BMW», «Bimota», «Honda»та іншими виробниками двоколісного транспорту.

Привідні зірки (передні) виготовляють лише із сталі. У виробництві ведених зірок (задніх) використовують як сталь так і алюміній. Різниця властивостей між зірочками з цих матеріалів наведена в таблиці 1.1.

За ідеальних умов експлуатації, якщо мотоцикл їздить якісним асфальтованим покриттям, проводиться своєчасне техобслуговування, а водій дотримується спокійного стилю водіння, зірки потребують заміни через кожні 15…50 тисяч кілометрів [1].

Таблиця 1.1 – Властивості зірочок з різних матеріалів.

Матеріал	Алюміній	Сталь
Міцність	Низька	Висока
Ступінь зносу	Швидка	Повільна
Вага	Невелика. Це дозволяє скинути вагу мотоцикла.	Більше, ніж у алюмінієвих деталей. Але оскільки передні зірочки менше задніх, різниця у вазі незначна.
Сфера застосування:	Заднє колесо. Варіант для гоночних спортбайків.	Переднє та заднє колесо. Для повсякденної експлуатації мотоцикла.

Якщо технічне обслуговування ланцюгової передачі проводиться доволі рідко то зірочки доведеться міняти набагато частіше. Ресурс ланцюгової передачі також скорочує попадання бруду і абразиву або агресивна манера водіння, що призводить до підвищення навантаження на головну передачу під час різних трюків.

Основні пошкодження або ознаки зношування зірочок це:

- Загострення зубів або викривлення у формі дуги (хвилясті зуби).
- Між зубами зірки утворилася різна відстань. Зубчасті елементи розташовані нерівномірно по відношенню один до одного.
- Зірочка перекручена, її форма деформована.
- Один чи кілька зубів зламані.

На нормальний стан зубчастої деталі вказує однакова відстань між зубчиками, а також їхня пряма форма з рівною поверхнею.

Під час роботи двигуна трансмісія мотоцикла діє на переднє зубчасте колесо, котре, через ланцюг, обертає заднє колесо, на яке передається

потужність двигуна. Така система приводу використовується не тільки в сучасних мотоциклах, а й на моторолерах, мопедах та велосипедах.

Ланцюгова передача (рис. 1.2) занадто вимоглива до експлуатації порівняно з ременем або валом, але й має певні переваги, а саме: нижча ціна, простий ремонт і технічне обслуговування та можливість змінювати передавальне число мотоцикла за рахунок використання різних за розміром зірочок.

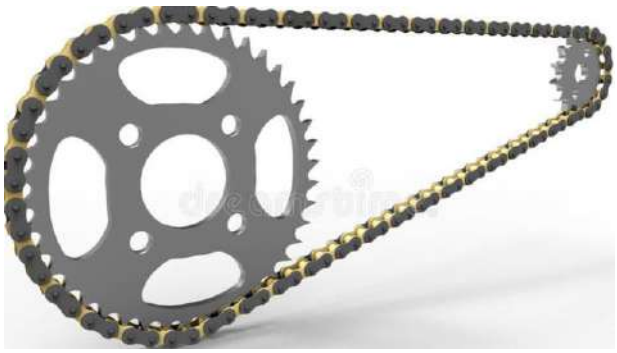


Рисунок 1.2 – Ланцюгова передача

Ланцюговий привід був популярною системою передачі енергії з перших днів появи автомобіля. Він отримав популярність завдяки своєму жорсткому карданному валу «Hotchkiss» і універсальним шарнірам.

Основну групу ланцюгів електропередач складають:

- Стандартні роликові ланцюги загального призначення, які широко використовуються в промисловості.

- Високопродуктивні роликові ланцюги, ці роликові ланцюги міцніші, ніж роликові ланцюги загального призначення.

- Ланцюги без системи мащення, ці ланцюги можна використовувати без мастила.

- Екологічно стійкі ланцюги з особливою стійкістю до корозії.

- Спеціальні ланцюги, тип 1: використовуються як ланцюги велосипедів, мотоциклів, автомобілів.

- Спеціальні ланцюги, тип 2: включаючи мініатюрні ланцюги, листові ланцюги, а також ролики та втулки.

1.2 Аналіз напружено-деформованого стану зірочки мотоцикла.

1.2.1 Параметри ланцюгової передачі.

Для наглядного прикладу розрахунку напружено-деформованого стану мотоциклетної зірочки скористаємось параметрами ланцюгової передачі спортивного мотоцикла TVS Sport ES (рис. 1.3). У цьому мотоциклі ведуча зірочка має 13 зубів, а ведена 39 зубів з діаметром зірочки 150 мм. Тобто, передавальне число передачі 3,0 (39 поділено на 13) рис. 1.4 [2].

Рисунок 1.3 – Мотоцикл TVS Sport ES.

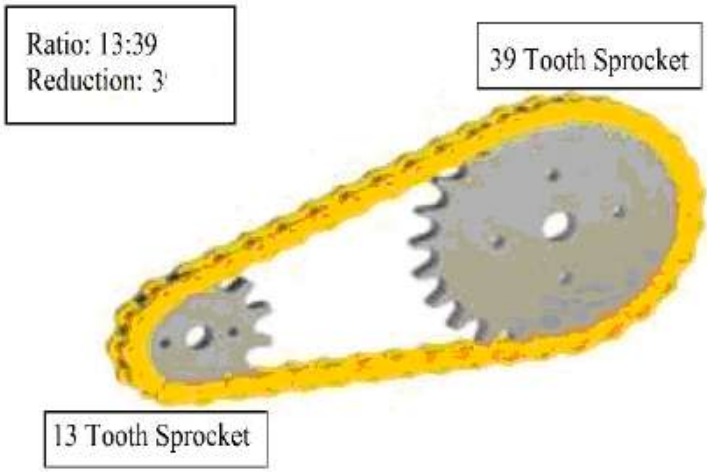


Рисунок 1.4 – Параметри ланцюгової передачі мотоцикла TVS Sport ES.

Зірочка заднього колеса використовується для передачі потужності на колесо. Ми можемо змінювати продуктивність мотоцикла шляхом «збільшення» або «зниження» передач, змінюючи зірочки, передні чи задні, на різні розміри. Передача вгору означає зміну зуба шестерні на вищу передачу, а передача вниз означає зміну зуба шестерні на нижчу передачу.

1.2.2 Вибір матеріалу.

Традиційним матеріалом для зірочкового ланцюга є сталь. Сталь легка і також дешева. Це основна причина того, що ланцюги виготовляться зі сталі. Сталь має хороші показники як за межею текучості, так і за кінцевою міцністю, особливо якщо вона ретельно легована та оброблена. Сталь також добре протистоїть втомному руйнуванню, це надзвичайно корисно. Навіть якщо ланцюг зірочки згинається під навантаженням, таке згинання не повинно призводити до критичної поломки. Типовий хімічний склад сталі IS 2062 E250A для ланцюгів: вуглець (C): макс. 0,23 %, марганець (Mn): макс. 1,50 %, кремній (Si): макс. 0,40 %. Властивості сталі IS 2062 наступні: модуль Юнга, $2{,}1\times10^5$ МПа; коефіцієнт Пуассона 0,3; щільність 7850 кг/м^3; межа текучості 250 МПа; Межа міцності на розтяг 390 МПа [3].

Довговічність і вага зірочки значною мірою залежать від матеріалу, обраного для її виготовлення. Вибір правильного матеріалу є ключовим фактором у цьому процесі. Для зірочки спортивних мотоциклів зазвичай обирають алюмінієвий сплав A7075.

Властивості алюмінієвого сплаву 7075 наступні [3]: щільність: 2810 кг/м^3; межа текучості при розтягуванні: 503 МПа; межа міцності на розрив: 572 МПа; модуль Юнга: 10,3 x 10^3 Ksi, втомна міцність: 159 МПа.

1.2.3 Геометричний розрахунок зірочки.

Виконаємо розрахунок веденої зірочки мотоцикла, геометрія якої зображено на рисунку 1.5. Задня зірочка обертатиметься передньою зірочкою. Передня зірочка повинна обертатися з'єднанням вихідного вала від виходу коробки передач. Він завжди обертатиметься залежно від потужності двигуна. Розрахунок конструкції зірочки з 39 зубами наступний [1, 2]:

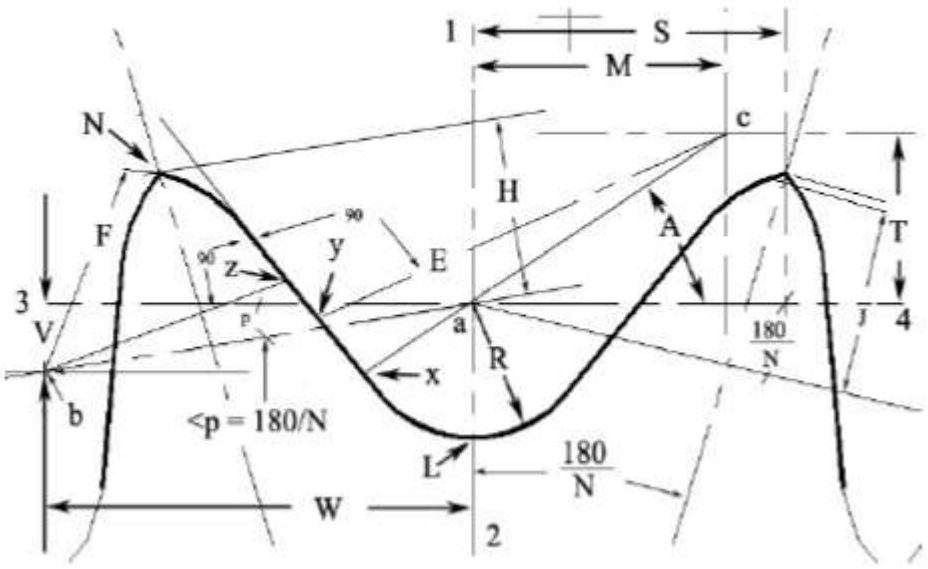


Рисунок 1.5 – Геометрія веденої зірочки

Крок, P = 13,7 мм

Кількість зубів, N = 39

Діаметр ролика, Dr = 0,301 мм

Діаметр посадочної кривої, Ds = 1,0005Dr + 0,003 = 0,304 мм

R = Ds/2 = 0,5025 Dr + 0,0015 = 0,152 мм

A = 35˚ + 60˚⁄N = 36,54˚

B = 18˚ – 56˚/N = 16,56˚

ac = 0,8 x Dr = 0,2408 мм

M = 0,8 x Dr cos (35˚ + 60˚/N) = 0,1935 мм

T = 0,8 x Dr sin (35˚ + 60˚/N) = 0,1434 мм

E = 1,3025 Dr + 0,0015 = 0,3936 мм

Довжина хорди дуги xy = (2,605 Dr + 0,003)sin (9˚ – 28˚/N) = 0,1133 мм

yz = Dr[1,4sin(17˚ – 64/N) – 0,8sin(18˚ – 56˚/N)] = 0,0431 мм

ab = 1,4 Dr = 0,4214 мм

W = 1,4 Dr cos 180˚/N = 0,42 мм

V = 1,4 Dr sin 180˚/N = 0,034 мм

F = Dr[0,8cos(18˚ – 56˚/N) + 1,4cos(17˚ – 64˚/N) – 1,3025] – 0,0015 = 0,243 мм

H = √[F2 – (1,4Dr – P/2)2] = 6,4231 мм

S = P/2 cos 180˚/N + H sin 180˚/N = 7,3447 мм

PD = P/ sin (180˚/N) = 170,25 мм

1.2.4 Статичний аналіз зірочки за допомогою ANSYS.

Статичний аналіз використовується для визначення напружень зміщення, плям і зусиль у конструкціях або компонентах через навантаження, які не спричиняють значних ефектів інерції та демпфування. Передбачається стійке навантаження в умовах реагування. Типи навантажень, які можна застосувати в статичному аналізі, включають зовнішньо прикладені сили та тиски, стаціонарні інерційні сили, такі як гравітація або швидкість обертання, накладені (ненульові) переміщення, температури (для термічної деформації). Статичний аналіз може бути лінійним або нелінійним. У нашій роботі ми розглядаємо лінійний статичний аналіз. Процедура статичного аналізу складається з цих основних кроків [4]:

• Побудова моделі

• Отримання рішення

• Огляд результатів.

На цьому кроці ми вказуємо назву завдання та назву аналізу, використовуючи PREP7 для визначення типів елементів, реальних констант

елемента, властивостей матеріалу та типу елемента геометрії моделі, дозволені як лінійні, так і нелінійні структурні елементи. Бібліотека елементів ANSYS містить понад 80 різних типів елементів. Унікальний номер і префікс ідентифікують кожен тип елемента.

На цьому етапі файл IGS імпортується до програмного забезпечення для сітки Ansys. Дані ланцюга імпортуються з бази даних. Оскільки всі розміри зірочки виміряні і розраховані, найкращий елемент для сітки є домінуючим шестигранним елементом. На рисунку 1.6 зображено сітчасту модель зірочки з наступними параметрами: кількість вузлів: 16552; кількість елементів: 62272; розмір елемента: 2 мм. Ця модель використовується для аналізу [2, 4].

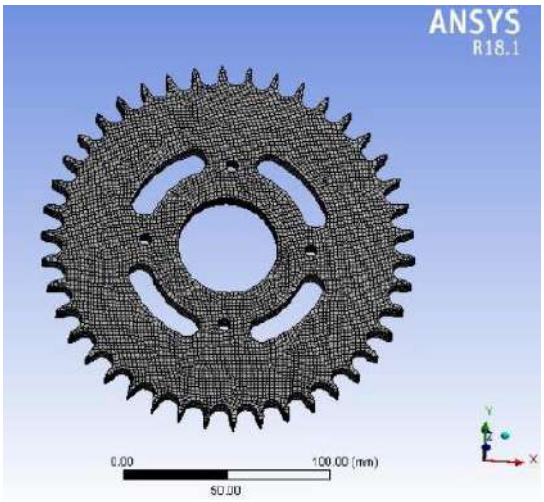


Рисунок 1.6 – Сітчаста модель зірочки.

Після завершення створення сітки ми застосовуємо граничні умови. Ці граничні умови є опорними для обчислення результатів аналізу. Сили, що діють на зірочку:

1) Сила, що діє на зірочку внаслідок натягу ланцюга (крутний момент на задній зірочці);

2) Сила тяжіння, що діє в центрі зірочки.

Зірочка має обмеження по колу і крутний момент 383 Нм прикладається в центрі (рис. 1.7).

Спочатку обчислюється загальна деформація по відношенню до застосованих граничних умов. Потім, на основі прогину, обчислюється деформація. Коли деформацію обчислено, ми знаємо модуль еластичності, тоді ми можемо обчислити значення напружень.

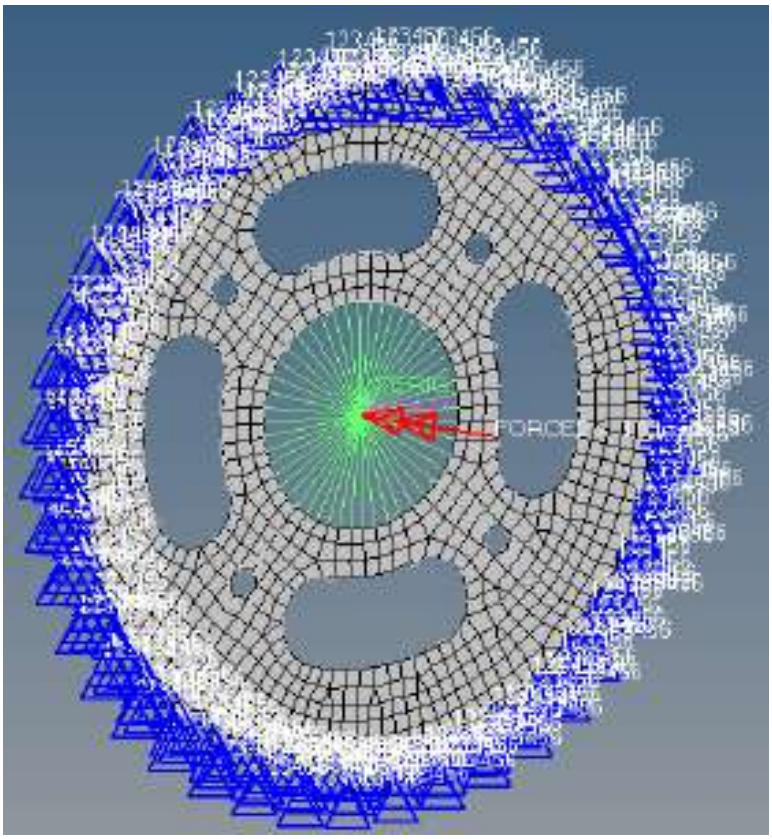


Рисунок 1.7 – Граничні умови, застосовані до зірочки.

Якщо напруження виходять за допустимі межі, то необхідні зміни, такі як зміна матеріалу, зміна товщини компонента або додавання ребер жорсткості, тощо.

Розрахункові значення величин: еквівалентна пружна деформація, еквівалентні напруження, напруження зсуву та загальна деформація наведені в таблиці 1.2., а їх розподіл по зірочці зображено на рисунках 1.8 – 1.11.

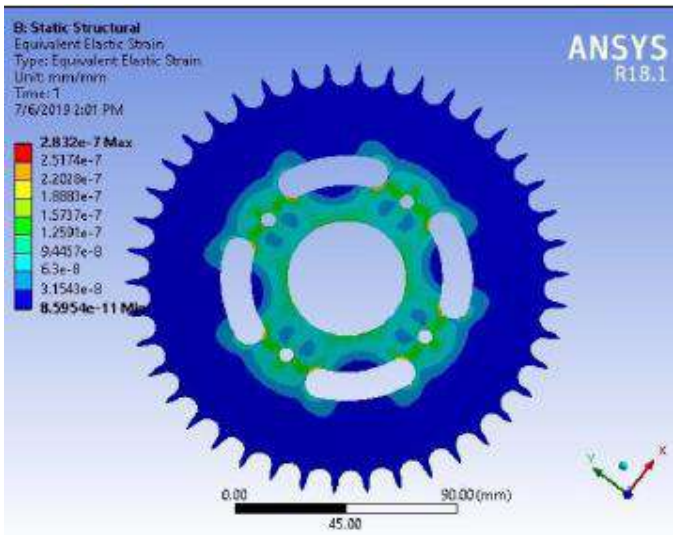


Рисунок 1.8 – Еквівалентна пружна деформація зірочки.

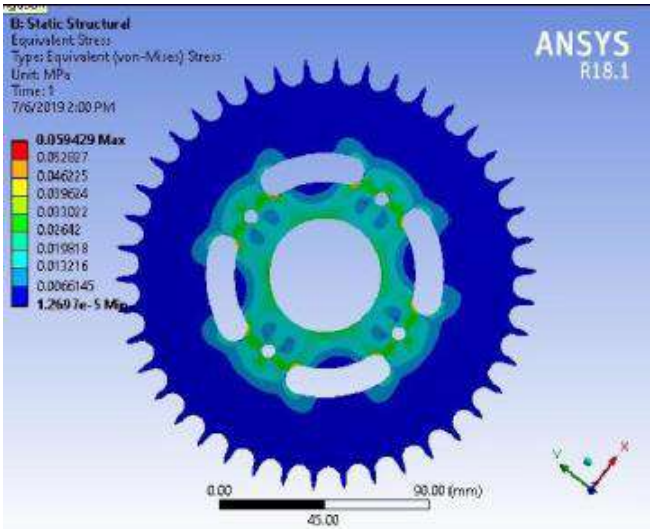


Рисунок 1.9 – Еквівалентні напруження зірочки.

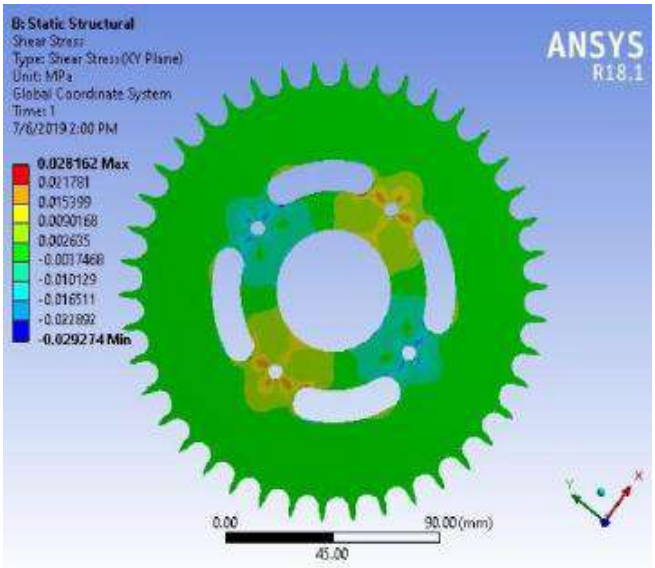


Рисунок 1.10 – Напруження зсуву.

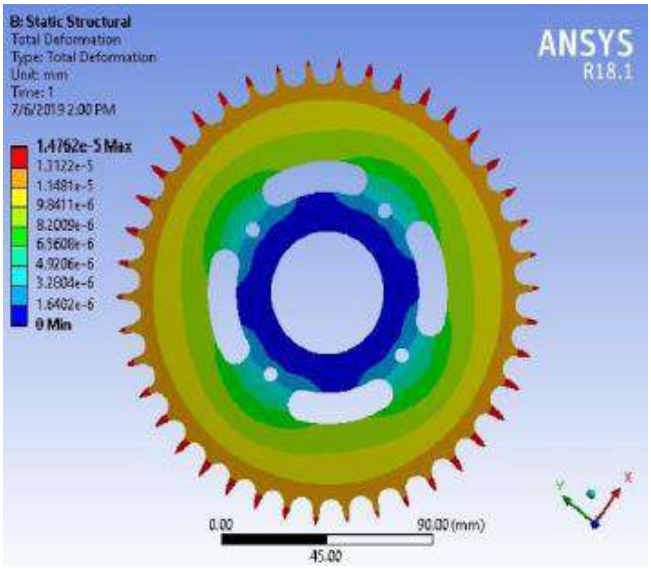


Рисунок 1.11 – Загальна деформація зірочки.

Таблиця 1.2 – Результати аналізу зірочки.

Об'єкт	Повна деформація, мм	Напруження зсуву, МПа	Еквівалентна пружна деформація, мм/мм	Еквівалентне напруження, МПа
Мінімум	0	2,9274e-002	8,5954e-011	1,2697e-005
Максимум	1,4762e-005	2,8162e-002	2,832e-007	5,9429e-002

Спостерігаючи за наведеними вище результатами можна зробити наступні висновки.

- Загальна деформація зірочки в матеріалі з А7075 становить 1,4762e-005 мм, порівняно з іншими матеріалами, наприклад чавуном (1,5576e-5 мм), доволі не висока [4, 5].

- Еквівалентна пружна деформація складає 2.832e-007 мм/мм. Це форма деформації, при якій деформоване тіло повертається до початкової форми та розміру після усунення деформуючої сили.

- Напруження фон Мізеса широко використовується інженерами, щоб перевірити, чи витримає їхня конструкція певне навантаження.

Використовуючи цю інформацію, інженер може сказати, що його проект не вдасться, якщо максимальне значення напруження фон Мізеса, викликаного матеріалом, перевищує міцність матеріалу. Це добре працює в більшості випадків, особливо коли матеріал є пластичним за своєю природою. Максимальне еквівалентне напруження 5,9429e-002 МПа в матеріалі A7075 менше його границі міцності.

За результатами аналізу видно, що напруження максимальні в місцях з’єднання. Також спостерігається, що для матеріалу A7075 мають значення напружень, нижчі за відповідні допустимі значення межі текучості. Тому конструкція безпечна.

2 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПЛАЗМОВО ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ОКСИДУВАННЯ ВИРОБІВ

Плазмове електролітичне оксидування, також відоме як мікро дугове оксидування, являє собою метод обробки поверхні, який був відкритий понад сімдесят п'ять тому. Однак лише останні тридцять років цей процес набув комерційного інтересу. Більше чотирьох десятиліть тому ідею створення неорганічного шару на металах за допомогою енергії розряду було запропоновано Марковим [6]. Його застосування в промисловості матеріалів розширюється. В даний час він використовується як метод покращення властивостей поверхні широкого спектру конструкційних матеріалів, особливо легких сплавів.

Спочатку розроблений як електрохімічний метод отримання керамічних покриттів на легких сплавах він може використовуватися для більшості металів, включаючи титан, магній, алюміній та їх сплави. У цьому процесі використовується висока напруга для створення мікро дуг усередині електроліту, що створюють плазмовий розряд. Це призводить до швидкого локального нагрівання електроліту та підвищення температури поверхні приблизно до 500 °C. При цій температурі поверхня металу плавиться і утворюються оксидні шари, які швидко потовщуються, і в міру продовження процесу покриття значно наростають (рисунок 2.1).

Якість цього типу покриття перевершує традиційні методи анодування з точки зору поліпшеної зносостійкості, корозії і термостійкості. Також ПЕО дозволяє створювати дуже товсті покриття, що забезпечує відмінні ізоляційні властивості. Це з тим. що поверхня стає пористою до того, як утворюється покриття. що; у свою чергу забезпечує зчеплення між двома матеріалами. Завдяки цьому покриття довговічні і мають тривалий експлуатаційний термін [7].

Висока температура, створювана цим процесом, призводить до утворення різних фаз оксиду всередині покриття. у свою чергу, призводить до багаторазового збільшення твердості поверхні. Дуже висока швидкість зростання захисного покриття порівняно з іншими традиційними методами окислення зробила ПЕО популярнішою [8].

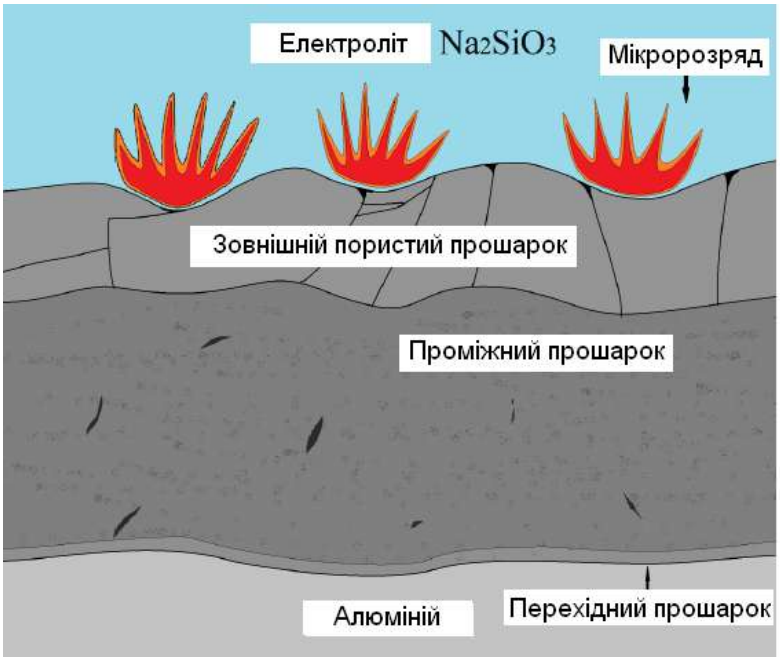


Рисунок 2.1 – Схема процесу ПЕО алюмінію

Для поліпшення властивостей поверхні алюмінієвих сплавів використовують різні методи обробки поверхні, включаючи ПЕО. анодування та золь-гель метод. Серед цих процесів ПЕО вважається передовою технологією обробки поверхні, яка є екологічно чистим та енергоефективним способом одержання оксидних керамічних покриттів на металах. У процесі ПЕО заготівля виступає у ролі анода, а джерело живлення високої напруги використовується створення мікро розрядів лежить на поверхні металу в електролітичної осередку [9, 10].

На зростання та самовідновлення керамічного покриття під час ПЕО може впливати частота повторення мікро іскрових розрядів. Встановлено, що

керамічні покриття, що формуються на алюмінієвих сплавах методом ПЕО, суттєво підвищують твердість та зносостійкість основного металу, а також забезпечують гарний ступінь теплоізоляції та захист від корозії. Вирощені аморфні покриття з ПЕО складаються з кількох кристалічних фаз. та фазовий склад залежить від різних параметрів процесу ПЕО. таких як тип електроліту, щільність струму та час обробки. Наприклад, в роботі [11] вивчили вплив напруги і часу окислення на мікроструктуру і корозійну стійкість ПЕО-покриттів, сформованих на алюмінієвому сплаві. Виявлено, що висока напруга і тривалий час обробки можуть підвищити корозійну стійкість ПЕО-покриття, але також збільшити шорсткість поверхні.

В дослідженні [12] автори порівняли корозійну стійкість зразків з ПЕО і анодованими покриттями в різних агресивних середовищах Зроблено висновок, що герметизація ПЕО-покриттів з плановими сполуками може ще більше підвищити корозійні та адгезійні властивості.

Бадр та інші [13] розробили двох етапний процес анодування та ПЕО для отримання нового типу дуплексного керамічного покриття на титані. Процес ПЕО проводився на зразках, оброблених методом м'якого анодування. Ця інноваційна дуплексна система забезпечила значно покращену адгезію покриття та набагато більш високу корозійну стійкість порівняно з одним етапним анодуванням або покриттями ПЕО.

Всі ці дослідження показали, що ПЕО-покриття можуть значно покращити властивості поверхні алюмінієвих сплавів. Всі автори, здається, згодні з таким підходом, що ПЕО може призвести до більш високої стійкості до корозії та зношування алюмінієвих сплавів порівняно зі звичайними анодованими покриттями. З іншого боку, ПЕО використовується для обробки поверхні магнієвих та титанових сплавів.

2.1 Огляд плазмово-електролітичного оксидування.

В останні роки цей процес обробки привернув до себе значну увагу через чудові властивості одержуваних покриттів. Цей метод зазвичай використовується для легких металів з низькою щільністю, таких як алюміній, титан і магнієві сплави. Процес ПЕО зазвичай проводиться у водних електролітах з використанням короткого замикання високої напруги і джерела контрольованого струму За допомогою цієї технології на поверхні металу можна отримати широкий спектр мікро структурованих керамічних покриттів з високими зносостійкими і корозійностійкими властивостями [14].

Процес ПЕО складний і до кінця не вивчений через складність вимірювання безлічі різних параметрів в середовищі високої напруги і слабкого струму, в якій відбувається цей процес. Аналіз і моделювання термічної, електричної та гідродинамічної поведінки в іскровому розряді, а також механізмів зростання покриттів, що утворюються, продовжуються. У процесі обробки на поверхні металу виникають послідовні іскри високої енергії і малої кількості призводять до серії мікро розрядів на поверхні через накопичення діелектричних властивостей між поверхневим оксидним покриттям і зростаючим ПЕО-покриттям. При цьому створюється пористий шар покриття, зовнішня поверхня якого покрита тріщинками, а на внутрішній шар діють стискаючі напруження. Внутрішній шар зазвичай містить різні оксидні фази н хімічні сполуки, що утворюються в результаті високої температури. Зовнішній шар містить аморфні та кристалічні оксиди високої щільності [15]. У покритті також можуть бути присутні оксиди алюмінію або інших матеріалів. середніх компонентах, а також на велику кількість різних деталей з використанням автоматизованих систем [16].

Цей метод екологічно безпечний у порівнянні з деякими методами нанесення покриттів, такими як методи на основі хрому. Вироби зазвичай не

вимагають подальшого очищення після обробки, а знос інструментів знижується завдяки низькому тертю та міцності ПЕО-покриттів [17]. З іншого боку, споживання енергії процесу є деяким недоліком методу, який обмежує застосування ПЕО у промисловому масштабі. Крім того, контроль та автоматизація процесу можуть вимагати високих початкових інвестицій при велико серійному виробництві [17]. Це може обмежити метод універсальним та економічно ефективним виробничим середовищем. Покриття ПЕО все ще вимагають подальшого вивчення складу, мікроструктури та властивостей захисту від корозії. Трибологічну поведінку та механізм зношування покриттів за різних умов навантаження ще досі підлягає вивченню [18].

Область застосування ПЕО-покриттів швидко розширюється від автомобільної промисловості до медичної промисловості. В даний час проводяться поглиблені дослідження з вивченням можливості застосування ПЕО обробки на поверхні алюмінієвих провідників, що використовуються при передачі та розподілі електроенергії високої напруги [19]. Таким чином, цей процес забезпечує кращий шар покриття порівняно з традиційним методом анодування. Метод ПЕО дозволяє формувати на сплавах легких металів різні складні та тверді оксидні покриття, що мають чудові властивості зносостійкості та корозійної стійкості, що передбачає тривалий термін служби оброблених деталей. Завдяки можливості отримання різних видів покриттів в залежності від параметрів процесу. Метод ПЕО є перспективним для універсального спеціалізованого застосування [19].

2.2 Принцип утворення покриття методом ПЕО.

Товщина та пористість покриття безпосередньо пов'язані з напругою та тривалістю розряду при обробці. Збереження покриття та запобігання передчасному руйнуванню мають важливе значення для успішного

нанесення покриття на підкладку. Якщо руйнація відбувається надто рано на етапі обробки, покриття не зберігається. Це можна відзначити за меншою товщиною та невідповідністю діелектричних властивостей покриття [5], [20].

На етапі формування, коли анодування відбувається на поверхні підкладки, бурхливе виділення газоподібного розряду призводить до негайного руйнування тонкого бар'єру навколо пори, що зростає, викликаючи коротке замикання покриття і створюючи мікропори. Ця мікропориста структура є одним із ключових факторів, що впливають на корозійну стійкість покриття [21]. При обробці поверхні ПЕО з вищою напругою спостерігаються надрізи чи іскри. Ця стадія виникає наприкінці зростання покриття через діелектричні властивості бар'єрного шару [22].

Через велику кількість змін у процесі та відсутність будь-якої інформації, яка могла б послужити основою для майбутнього розвитку, основний принцип роботи ПЕО досі точно не визначений. Ґрунтуючись на новітній передовій техніці спостереження, ПЕО можна розділити на три різні стадії:

1) закипання електроліту та накопичення бульбашок газу,

2) утворення щільного газопарового шару,

3) і стадію електричного бар'єрного розряду (рисунок 2.2) [22].

Перший етап полягає у формуванні оксидного покриття на поверхні зразка, що призводить до збільшення опору для проходження струму нагрівання та утворення бульбашок газу в електроліті (рисунок 2.2, а). Потім наступним етапом є створення щільного газопарового шару біля поверхні зразка (рисунок 2.2, б), що додатково підвищує опір для проходження струму, рис. 2.2 в,г.

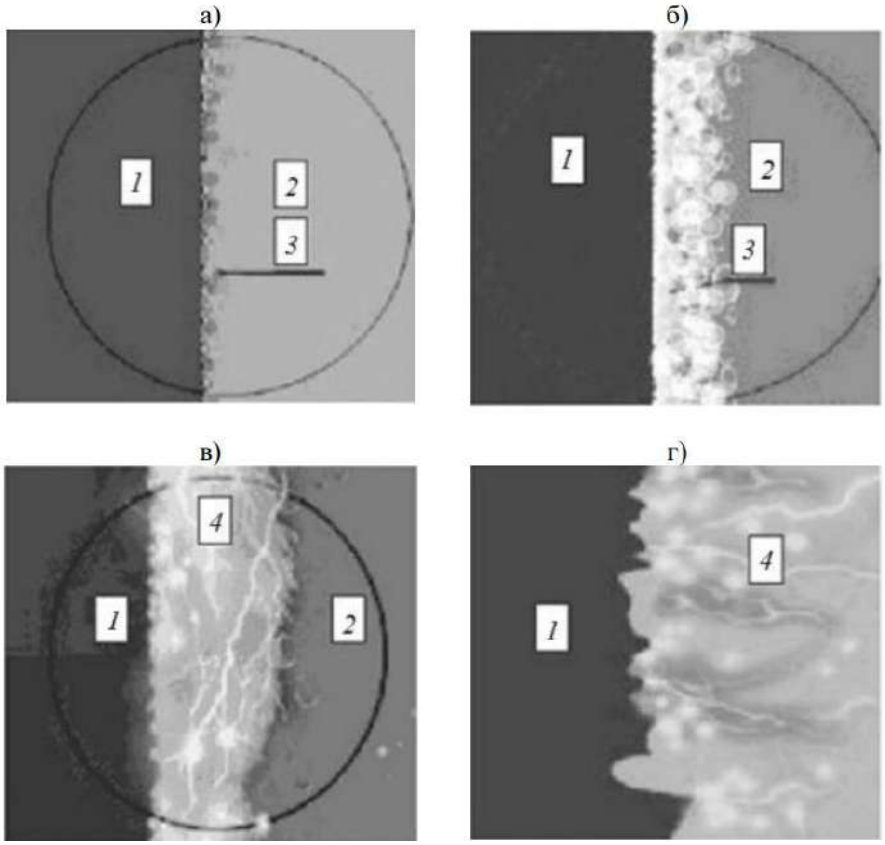


Рисунок 2.2 – Стадії процесу ПЕО:

а) – перша, закипання електроліту та накопичення бульбашок газу; б) - друга, утворення щільного газопарового шару: в) і г) – третя, електричний розряд, пробої; 1 - електроліт: 2 - магнієвий сплав: 3 - газова суміш: 4 - мікро плазмовий розряд.

2.3 Електроліт Na_2SiO_3 для ПОЕ.

Метаслікат натрію (Na_2SiO_3) являє собою хімічну сполуку, яку можна використовувати в процесі ПЕО як електроліт. Є багато досліджень, в яких повідомляється про використання Na_2SiO_3 як електроліт, що показало результати в морфології покриття та швидкості зростання. Наприклад, автори роботи [23] повідомили, що покриття, отримане з використанням Na_2SiO_3, має товсте і добре структуроване покриття, що складається з двох шарів. Перший шар є слон пористого оксиду, а другий шар являє собою шар

зносостійкого діоксиду кремнію. Автори стверджують, що зносостійкість покриття більш ніж в 5 разів вище, ніж у покриття, отриманого з використанням електроліту КОН.

Інше дослідження [24] показали, що додаванням Na_2SiO_3 можна отримати товсте покриття з чудовою корозійною стійкістю. Автори занурили підкладку з покриттям в 3,5 % розчин соляної кислоти на термін 70 днів, результати показали, що втрата ваги підкладки зменшилась в 3 рази, порівняно з підкладкою, покритою без Na_2SiO_3. Це доводить, що додавання Na_2SiO_3 може підвищити корозійну стійкість ПЕО - покриття.

У процесі ПЕО фаза покриття кристалічна структура залежить від складу електроліту і напруги процесу. При збільшенні концентрації електроліту Na_2SiO_3 вміст SiO_2 у розчині збільшується, в результаті чого утворюється покриття з більш високим вмістом оксидів і меншою кількістю пор. Більш високий вміст оксидів надає покриттю кращу корозійну стійкість, а менша кількість пор збільшує щільність покриття. Додана напруга визначає товщину та швидкість зростання. Вища напруга збільшує дисоціацію іонів SiO_3 і O_2, що призводить до збільшення кількості SiO_2 у розчині та утворенні товстого шару з більш твердим шаром кремнезему. Це можна контролювати, регулюючи напругу залежно від необхідної товщини покриття [26].

2.4 Методи нанесення покриттів на алюмінієві сплави.

На відміну від ручного та механічного способів нанесення покриття, що застосовуються в промисловості для покриття алюмінієвих сплавів, процес плазмового електролітичного оксидування є відносно менш використовуваним, але технічно найбільш зручним процесом формування покриття для поліпшення характеристик поверхні алюмінію та його сплавів. Плазмове електролітичне оксидування аналогічно анодного окисленню, що використовується для отримання оксидних покриттів на алюмінії. У цьому

процесі анодне окислення відбувається набагато більшою мірою, створюючи покриття з підвищеною зносостійкістю, товщиною, твердістю і несучою здатністю в порівнянні зі стандартними анодними покриттями. Для ПЕО не потрібна грунтовка або верхнє покриття [9].

Процес ПЕО має два основні застосування: захисні та функціональні покриття. У першому випадку для виробництва покриттів, що використовуються для захисту алюмінієвих сплавів від корозії, підвищення зносостійкості та виконання функції діелектричних бар'єрів. У другому випадку, шляхом підбору параметрів процесу можна створювати покриття, які забезпечують підвищену біологічну сумісність, сприяють адгезії та росту клітин та забезпечують остеоінтеграцію [9].

Завдяки високим температурам і тискам, що досягаються під час розрядів, локалізована плазма здатна підтримувати ініціювання та розвиток термічного окиснення та подальше утворення оксидного покриття. Завдяки високій адгезії та когезійній міцності ПЕО-покриттів, а також відносно високим значенням твердості, які можна отримати, вони часто є кращим вибором для спеціалізованих застосувань, де захист поверхні та/або функціональні властивості є ключовими [25]

2.5 Аналіз досліджень покриттів для А7075.

Автори роботи [26] виконали дослідження впливу інгібіторів групи азолів на антикорозійну ефективність покриттів, сформованих на алюмінієвому сплаві. У роботі було показано, що композиційні покриття, сформовані на алюмінієвому сплаві мають високу антикорозійну ефективність при використанні інгібіторів групи азолів. Було встановлено, що з використанням інгібіторів триазольной групи вдалося поліпшити антикорозійні властивості покриттів. У статті також розглядається вплив процесів плазмового електролітичного оксидування на властивості покриттів,

у тому числі на їх структуру, властивості адгезії та зносостійкість. Було показано, що процеси ПЕО дозволяють формувати покриття з покращеними антикорозійними та зносостійкими властивостями, у тому числі агресивних середовищах. Також розглядався вплив додавання до складу електроліту різних інгредієнтів, таких як бензотріазол, солі рідкісноземельних елементів, борати, та органічні інгібітори корозії, на властивості покриттів. Було встановлено, що додавання цих інгредієнтів до електроліту дозволяє поліпшити антикорозійні властивості покриттів.

У роботі [27] досліджувались властивості покриттів, що формувались на алюмінієвих сплавах методом плазмового електролітичного оксидування. У роботі було показано, що формування захисних покриттів на поверхні алюмінієвих сплавів методом ПЕО дозволяє підвищити антикорозійні та зносостійкі властивості сплавів. У статті розглядаються різні типи електролітів, які використовуються при ПЕО, та їх впливом на властивості покриттів. Зокрема, було показано, що використання тринатрійфосфату аналогічно застосуванню алюмінату натрію підвищує pH розчинів, проте ці зміни не настільки суттєві. Введення до складу силікатного електроліту солі фосфорної кислоти забезпечує отримання комплексних сполук, що дозволяють стабілізувати іони кремнію в лужному середовищі і, тим самим, підвищити стійкість системи протягом тривалого часу. У статті також розглядається вплив процесів ПЕО на властивості покриттів, у тому числі на їх структуру, властивості адгезії, корозійну стійкість та зносостійкість. Було показано, що процеси ПЕО дозволяють формувати покриття з покращеними антикорозійними та зносостійкими властивостями, у тому числі в агресивних середовищах. Стаття підтверджує ефективність використання ПЕО підвищення антикорозійних зносостійких та інших властивостей алюмінієвих сплавів, зокрема сплаву А7075.

Робота [27] присвячена дослідженню процесу плазмово - електролітичного оксидування алюмінієвого сплаву А7075 з метою

створення на його поверхні захисного керамічного покриття. У роботі автори вивчили вплив різних параметрів процесу ПЕО на властивості покриття, такі як опір та ємність. Було встановлено, що зміна частоти струму варіює ці властивості в залежності від часу обробки. Крім того, автори провели аналіз поверхні покриття за допомогою електронної скануючої мікроскопії і рентгенівської дифракції. Результати дослідження показали, що при використанні електролітів з добавками базальту вдалося створити покриття з підвищеною зносостійкістю та коефіцієнтом тертя.

2.6 Порівняння з існуючими покриттями.

У літературі повідомляється, що мікротвердість та зносостійкість покриттів збільшуються зі збільшенням часу анодування. Однак мікротвердість по Віккерсу і зносостійкість ПЕО-покриттів значно вище, ніж у аноднованих покриттів в аналогічних умовах випробувань [29]. Також виявлено, що швидкість зносу ПЕО - покриттів має тенденцію до зниження зі збільшенням часу анодування. Однак мікро твердість і зносостійкість цих покриттів не мають певної тенденції з часом анодування. Ці результати важливі для вибору покриття практичного застосування, оскільки покриття ПЕО можуть забезпечити кращу стійкість до зносу. Ширина слідів зносу анодованих покритті має пряму тенденцію до збільшення зі збільшенням навантаження, причому найбільша ширина слідів зносу спостерігається при найвищому використовуваному навантаженні. Також помічено, що глибина плями зносу збільшується зі збільшенням навантаження. Однак коефіцієнт тертя зменшується із збільшенням навантаження [29].

Вид зношування змінюється в залежності від навантажень: окисний знос при малому навантаженні, абразивний при помірному та адгезійний при високому. Збільшення навантаження збільшує площу зносу і об'єм зносу матеріалу, а також глибину зносу ПЕО- покриття при однаковому

навантаженні мають більш вузькі доріжки зносу в порівнянні з анодованими. Однак через більшу площу зносу і вищого тертя анодовані покриття краще справляються з високим навантаженням. При менших навантаженнях ПЕО-покриття мають кращу зносостійкість [29].

Механізми зношування ПЕО-покриттів відрізняються від анодованих. В анодованих переважають розшаруваний і м'яко абразивний знос, що підтверджується наявністю частинок зносу на доріжках. У ПЕО-покриттях основним механізмом є окисний знос, на що вказує утворення чорного окисного шару на слідах зносу. Характеристики слідів внеску і залишки зношування корисні для визначення механізмів, що дає інформацію про руйнації покриттів за різних умов [30].

3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЬ

Використовувалися різні методи визначення характеристик вивчення покриттів, отриманих на сплаві А7075. Ці методи не тільки дають інформацію про природу та тип покриття, але також надають дані про однорідність, пористість та мікроструктуру покриттів, а також про вплив на них технологічних параметрів. Основними трьома методами визначення характеристик є скануюча електронна мікроскопія (SEM), рентгенівська дифракція (XRD) та енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія (EDS). Їх використовували для вивчення покриттів, і результати дуже допомогли з'ясувати зв'язок між мікроструктурою та властивостями покриттів.

3.1 Матеріали для досліджень.

Сплав 7050, відомий також як надтвердий алюміній, відноситься до серії кованих сплавів системи Al-Zn-Mg-Cu, володіє високою міцністю та здатністю до термообробки. Основним легуючим елементом сплаву серії А7050 є цинк. При додаванні магнію до цього сплаву, що містить 3…7.5 % цинку, може утворитися MgZn2 із суттєвим зміцнюючим ефектом, внаслідок чого ефект термообробки сплаву кращий, ніж у звичайного бінарного сплаву Al-Zn. При збільшенні вмісту магнію і цинку в сплаві здатність до розтягування додатково покращуватиметься, а його корозійна стійкість під дію зовнішнього навантаження теж зросте. Після термічної обробки сплаву можна досягати суттєвого покращення характеристик міцності. У цю серію алюмінієвих сплавів також можуть додавати незначну кількість хрому, міді, та інших сплавів. У серії алюмінієвих сплавів 7050 вважають одним з найкращих алюмінієвим сплавом. Він володіє високою міцністю у порівнянні з м'якою сталлю, хорошими механічними властивостями та анодною реакцію.

Алюміній 7050 також відомий як комерційний аерокосмічний сплав. Він володіє рядом якісних властивостей такими як:

- висока стабільність геометричної форми та розмірів при термообробці (А7050 має високу розжарюваність, високі комплексні характеристики при температурі, що нижче середньої та малої деформації при термообробці.
- гарна механічна обробка та високу зносостійкість.
- надзвичайно висока міцність і стійкість до корозії.
- Діапазон твердості алюмінієвого сплаву 7050 знаходиться в межах 52…54 HRC.

Хімічний склад алюмінію 7050 (UNS A97050) наведено в таблиці 3.1, а механічні властивості в таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сплаву А7050

Al	Z	Cu	Mg	Zr	Fe	Si	Mn	Ti	Cr
87,3 - 90,3	5,7 - 6,7	2,0 - 2,6	1,9 - 2,6	0,08 - 0,15	≤ 0,15	≤ 0,12	≤ 0,1	≤ 0,06	≤ 0,04

Таблиця 3.2 – Механічні властивості А7050.

Твердість	Межа міцності на розтяг	Межа плинності	Відносне видовження	Модуль пружності	Коефіцієнт Пуассона	Міцність на зсув
140 НВ	524 МПа	469 МПа	0,11	71,6 ГПа	0,33	303 МПа

Алюмінієвий сплав 7050 погано зварюється, внаслідок розтріскування та утворення пористості. Отриманий зварний шов завжди буде слабшим у

порівнянні з основним металом. Зварювання вольфрамовим електродом у середовищі газу вважається найбільш вдалим для зварювання цього сплаву. Зварювання виробів з алюмінію 7050 вимагає особливої обережності, тому що цей сплав володіє більш високою температурою плавлення, у порівнянні з іншими сплавами з аналогічними характеристиками міцності. При порушенні режиму зварювання збільшується ризик деформацій.

Алюміній 7050 може піддаватися обробкою твердим розчином або термообробці холодною обробкою, з послідуючим старінням для подальшого підвищення міцності матеріалу. Холодна обробка включає додатковий тиск до матеріалу, в той час як обробка твердим розчином включає його нагрівання перед повільним охолодженням. Старіння включає процес витримки матеріалу за кімнатної температури після обробки розчином, що дозволяє додатково зміцнити структуру матеріалу.

Також сплав А7050 можна термічно обробляти за температури 477 °С. Час, що витрачається цей процес, суттєво залежить від товщини поперечного перерізу виробу.

Вироби з А7050 можуть працювати при дуже високих температурах, не втрачаючи своєї міцності без появи крихкості. Така властивість робить цей сплав придатним для використання в таких областях промисловості, які можуть зазнавати суттєвих різких коливань температури в тропічному кліматі або під час експлуатації при високих температурах. Крім того, цей сплав володіє високою теплопровідністю, може швидко розсіювати тепло від ключових компонентів де можуть виникати проблеми з акумулюванням тепла.

Алюміній 7050 володіє відмінною стійкістю до корозійного розтріскування під навантаженням завдяки сумісному поєднанню вмісту магнію і цинку. Ця властивість забезпечує придатність для використання в середовищах дії солоної води або з високою вологістю. Крім того, він має

високу стійкість до корозійного розшарування, що робить його придатним для деталей шасі літаків та іншого аерокосмічного устаткування.

Сплав А7050 відносно не складний в механічній обробці завдяки хорошій оброблюваності якщо порівнювати з іншими сплавами із схожими характеристиками міцності. Вироби з цього сплаву піддаються обробці стандартними різальними інструментами (таких як мітчики і свердла) без значних труднощів та відсутністю проблем пов'язаних зі зношуванням ріжучого інструменту при відповідній швидкості та подачі.

Алюмінієвий сплав 7050 широко використовується в авіації, аерокосмічній, військовій, автомобільній, високошвидкісних поїздах та інших областях.

1. Авіаційна сфера: сплав А7050 застосовують для дуже відповідальних металевих виробів в галузі авіації. Це обшивки фюзеляжу, конструкційні деталі літаків, шасі, гідравлічні системи та інші компоненти. Його високі міцнісні характеристики та низька вага дозволяють знизити вагу літального апарата та підвищити його технічні характеристики і паливну економічність літака.

2. Аерокосмічна область: в аерокосмічній галузі широкого застосування набув алюмінієвий сплав 7050. З нього виготовляють гідравлічні системи, конструкційні деталі, паливні баки, та інші компоненти ракет, супутників та іншого обладнання. Його висока корозійна стійкість і міцність забезпечують надійність і стабільність обладнання в екстремальних умовах роботи.

3. Військова область: сплав А7050 є одним із важливих матеріалів у військовій промисловості, його застосовують для виробництва деталей важкої техніки, зброї, обладнання та інших військових компонентів. Його висока ударна міцність дозволяє підвищити ступінь захисту (броню) та бойову ефективність як зброї так і техніки.

4. Автомобільний сектор: алюмінієвий сплав 7050 також широко використовується в автомобільній промисловості, який може використовуватись для виготовлення кузовів, двигунів, гальмівних систем та інших деталей. Його високі міцнісні та легкі характеристики дозволяють підвищити паливну економічність автомобілів, скоротити викиди вуглекислого газу та задовольнити екологічні вимоги сучасної автомобільної промисловості.

5. Область високошвидкісних поїздів: алюмінієвий сплав 7050 може виробляти кузови, рами, підвісні системи та інші компоненти високошвидкісних поїздів. Його високі міцнісні та легкі характеристики можуть підвищити швидкість руху та стійкість поїзда, а також покращити його характеристики. Безпека та комфорт поїзда.

Алюмінієвий сплав 7050 має широкий спектр застосування та перспектив і займає важливе місце та роль у різних галузях. З безперервним розвитком та прогресом науки і техніки діапазон застосування та ринковий попит на алюмінієвий сплав 7050 також збільшуються.

3.2 Скануюча електронна мікроскопія (SEM).

SEM - це метод візуалізації, який використовується для спостереження матеріалів при дуже великому збільшенні. Він надає інформацію про топографію поверхні матеріалу, що вивчається. Коли твердий матеріал бомбардується електронним променем, частина енергії променя повертається у детектор. Кількість енергії, що повертається, залежить від типу атома і рівня енергії електрона, і ці сигнали потім використовуються для створення зображення матеріалу. SEM-зображення покриття показано на рисунку 3.1.

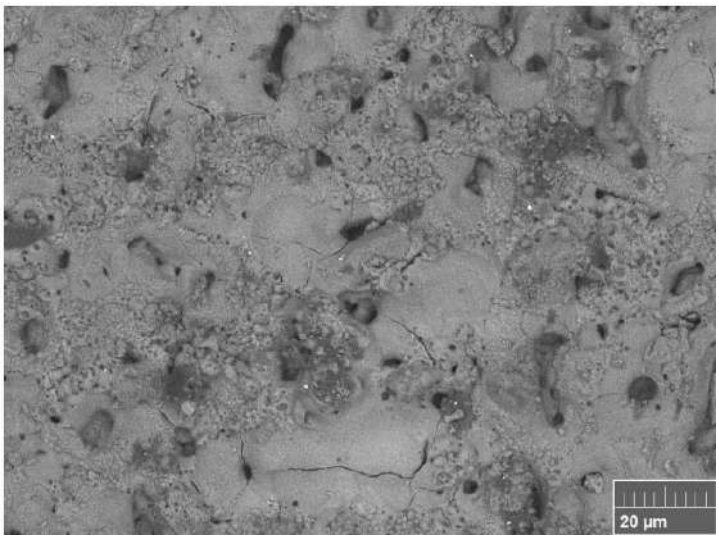


Рисунок 3.1 – Мікроструктура зразка при 200-кратному збільшенні.

На SEM-зображенні добре видно, що поверхня покриття не гладка. Спостерігається безліч пір і тріщини, які можуть вплинути на експлуатаційні характеристики покриттів. Розмір і положення пір можуть змінюватись в залежності від товщини покриття.

Скануючий електронний мікроскоп (SEM) візуалізує поверхні та аналізує товщину покриття та морфологію поверхні покриття відповідно. Зображення дано у відтінках сірого. Товщину покриття можна виміряти, розрізавши покриття на поперечні перерізи. SEM, який створює зображення вторинних електронів, зазвичай використовується для спостереження за морфологією поверхні. У цьому конкретному дослідженні використовувалися JSM-6490LA, що показаний на рисунку 3.2.

JSM-6490LA - це високопродуктивний скануючий електронний мікроскоп із вбудованим аналізатором рентгенівського випромінювання з енерго дисперсійним спектрометром рентгенівським, розроблений компанією JEOL, що дозволяє легко проводити спостереження на аналіз методом EDS.

SEM-зображення алюмінієвого сплаву після анодування наведено на рисунку 6, отримані з роботи [31]. SEM-зображення сплаву алюмінію після ПЕО наведені на РИСУНКУ 3.3.б.

Рисунок 3.2 - SEM установка «JSM-6490LA»

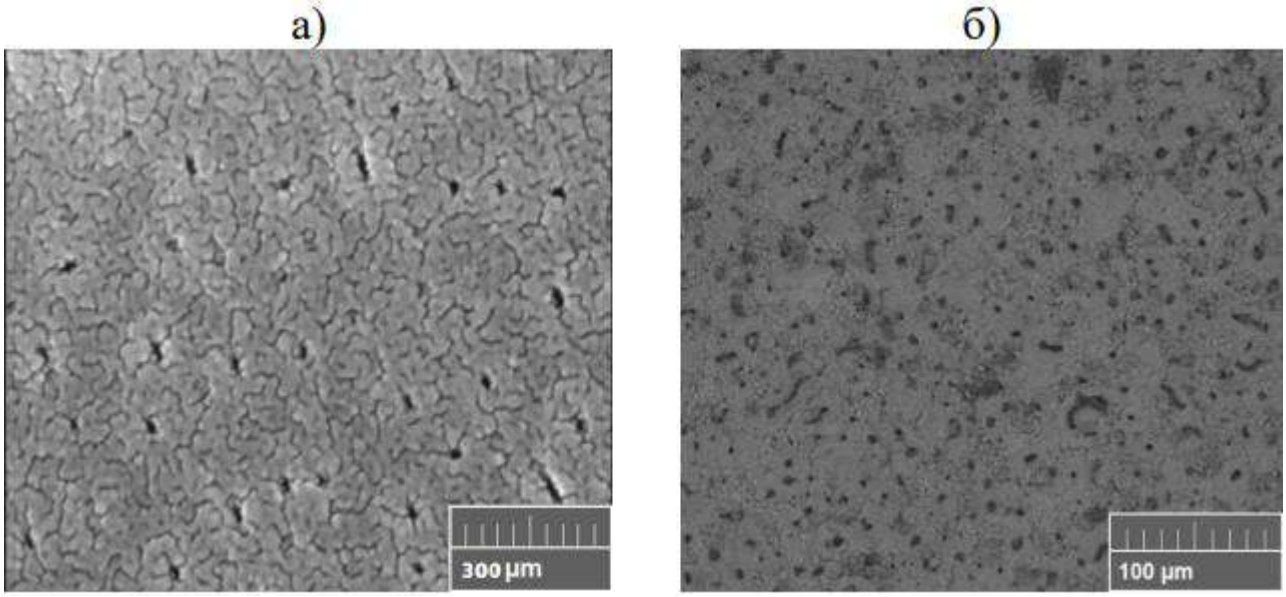


Рисунок 3.3 – Порівняння мікроструктур при анодуванні та ПЕО:

а) - мікроструктура після анодування, б) - мікроструктура після ПЕО.

Зображення показали, що метал алюмінію став шорстким після анодування, але в поверхні після ПЕО утворилося безліч глибоких пор. Однак по SEM-зображенням складно визначити розподіл і розмір пір покриття SEM має деякі обмеження для вимірювань та аналізу, наприклад, SEM з малим збільшенням не може використовуватися для вимірювання товщини покриття Крім того, розміри на зображеннях можуть бути неточними через похибки, викликані шорсткістю поверхні. вказувати на деяку неоднорідність покрита зображенням SEM.

3.3 Рентгенівська дифракція (XRD).

Метод рентгенівської дифракції (XRD) – потужний та універсальний інструмент, який можна використовувати для дослідження практично будь-якого типу кристалічного матеріалу, від полікристалічних матеріалів до монокристалів. Коли рентгенівські промені взаємодіють із кристалічним матеріалом, вони викликають збудження атомів у матеріалі. Однак замість того, щоб виробляти світло, ці збуджені атоми швидко виділяють свою надмірну енергію, яка потім перевипромінюється у вигляді рентгенівського випромінювання. В результаті рентгенівський промінь модифікується кристалічною структурою та утворюється дифракційна картина. Цю картину можна багато в чому використовувати як відбиток пальця: порівнюючи дифрактограму невідомого зразка з дифрактограмами відомих матеріалів, можна ідентифікувати цей матеріал і вивчити його кристалічні характеристики. Крім того, положення та інтенсивність дифракційних піків дають інформацію про розмір елементарного осередку і можливе розташування атомів. Тому метод XRD широко використовується для ідентифікації невідомих кристалічних матеріалів та фазового аналізу. Зрештою, у даних рентгеноструктурного аналізу необхідно визначити деякі важливі параметри. Кут 2-тета є важливим параметром для визначення

положення дифракційного піку: інтенсивність різних піків іноді необхідна для порівняння кількості фаз; а повну ширину піку на половині висоти (FWHM) можна використовувати для перевірки розміру кристалів іди наявності спотворень у кристалічній решітці [32].

Ретельно вивчаючи дані структурного аналізу, можна отримати багато корисної інформації, включаючи фазовий склад, ідентифікацію кристалічного матеріалу та величину напруги. Однак у роботі представлені лише результати фазового аналізу. Маючи такого роду інформацію і деякі розумні результати рентгеноструктурного аналізу, можна скласти думку про внутрішні процеси [32].

У рентгенівському дифрактометрі реєстрація дифракційної картини здійснюється за допомогою лічильників різних квантів рентгенівського випромінювання. Зафіксовану таким чином залежність інтенсивності розсіювання від кута дифракції називають дифрактограмою, а метод, який реалізує таку реєстрацію – дифрактометричним.

Дифрактометр ДРОН-4-13 (Рентгенівський дифрактометр загального призначення) містить три основні вузли:

1. Високовольтне джерело живлення, призначене для підведення до рентгенівської трубки високої напруги (до 60 кВ) та напруги розжарювання катода (струм трубки до 50 мА).

2. Дифрактометричний вузол, що складається з рентгенівської трубки в захисному кожусі та гоніометра з блоком детектування (лічильником). Рентгенівський гоніометр це пристрій для відліку кутів повороту зразка та детектора по відношенню до первинного пучка рентгенівських променів. Він забезпечує синхронний поворот зразка та лічильника навколо загальної осі з необхідними кутовими швидкостями.

3. Рахунково-реєструючий та керуючий пристрій, в якому реєструються імпульси напруги, що виробляються лічильником при попаданні в нього кванта рентгенівського випромінювання, а також

здійснюється управління роботою електродвигунів гоніометра, що дозволяє реалізувати різні способи автоматизованої реєстрації дифрактограм.

Дифрактометр також укомплектований змінними приставками-тримачами зразка для його обертання у власній площині, для дослідження текстур, для вивчення інтенсивності відображення від монокристалу і т.д. Крім того, існують приставки для вивчення малокутового розсіювання та дослідження об'єктів при високих (до 2000 ^{0}C) і низьких (до – 196 ^{0}C) температурах у вакуумі або інертній атмосфері.

У дифрактометрі використовується фокусування Бреггу-Брентано, яка допускає обертання зразка у власній площині. Схема отримання рентгенограми у дифрактометрі наведено на рис. 3.4, а дифрактограма, одержувана таким способом, наведена на рис. 3.5.

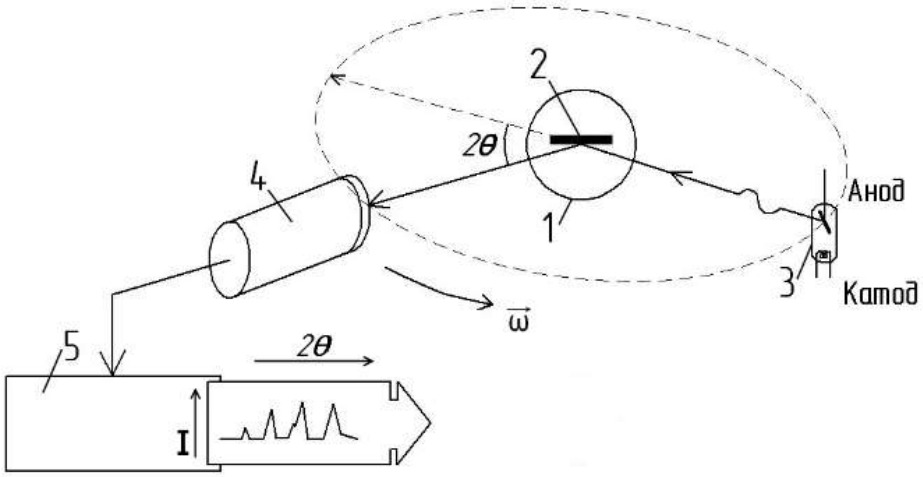


Рисунок 3.4 – Схема отримання рентгенограми в дифрактометрі:
1-гоніометр; 2 – зразок; 3 – рентгенівська трубка; 4 – детектор рентгенівських променів; 5 - лічильно-реєструючий пристрій

Первинний промінь формується системою горизонтальних і вертикальних щілин для отримання заданого ступеня паралельності (розбіжності) і спрямовується на зразок, закріплений гоніометрі. Реєстрація дифракційних картин здійснюється при синхронному обертанні детектора і зразка навколо осі гоніометра, що проходить через центр кола гоніометра,

причому кутова швидкість обертання детектора вдвічі більша за кутову швидкість обертання зразка. Пучок рентгенівських променів, що розходиться, дифрагує від атомних площин паралельних поверхні зразка і фокусується на приймальні щілини детектора. Результати аналізу виводяться на монітор комп'ютера чи діаграмну стрічку в координатах «інтенсивність – кут повороту детектора».

Дифрактометри мають деякі переваги, порівняно з фотографічним методом. Це швидкість отримання рентгенограм для фазового та інших видів аналізу, простота визначення кутового положення дифракційних максимумів; можливість простого та точного кількісного визначення інтегральної інтенсивності лінії на рентгенограмі фігур тощо. Однак дифрактометри загального призначення не дозволяють реєструвати просторовий розподіл інтенсивності (наприклад, за довжиною дебаївського кільця, за різними рефлексами лауе або епіграми тощо). Крім того, за допомогою дифрактометра важко реєструвати максимуми малої інтенсивності, які легко виявити на рентгенограмі візуально.

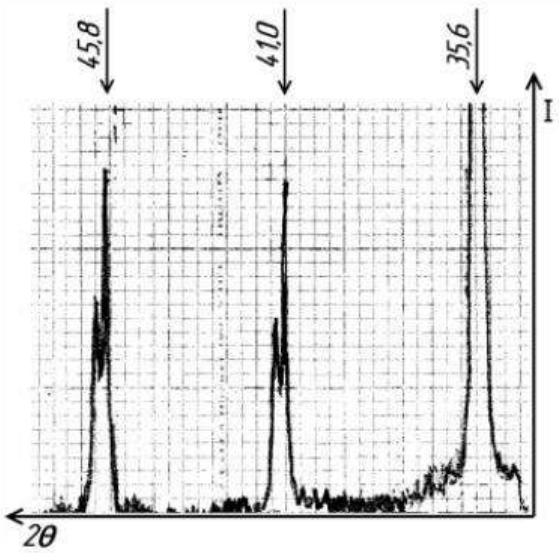


Рисунок 3.5 – Дифрактограма α-заліза, знята у випромінюванні трубки з молібденовим анодом.

У цьому експерименті використовувався прилад XRDynamic 500, показаний рисунку 3.6. Автоматичний багатоцільовий рентгенівський порошковий дифрактометр XRDynamic 500.

• Відразу готовий до використання: найкраща у своєму класі роздільна здатність/відношення сигнал/шум.

• Концепція TruBeamTM: більший радіус гоніометра, проходження надточних пучків променів із високою швидкістю

• Повна автоматизація: зміна рентгенівської оптики та геометрії пучка.

• Висока ефективність: збільшення до 50%.

• Самовирівнювання: інструмент та зразок сконструйовані для максимальної зручності використання.

Рисунок 3.6 – Дифрактометр XRDynamic 500.

Концепція TruBeamTM XRDynamic 500 поєднує великий радіус гоніометра, проходження надточних пучків променів з високою швидкістю і повну автоматизацію налаштування рентгенівської оптики/геометрії променя. Вимірюйте серії зразків, використовуючи різні конфігурації інструменту, інтуїтивно зрозуміле програмне забезпечення та оптимізовані робочі методики. Ви можете досягти кращого у своєму класі дозволу (FWHM

<0,021° для 1-го стандартного піку LaB) за допомогою стандартної конфігурації Брегга-Брентано. Насолоджуйтесь відмінним співвідношенням сигнал/шум зі зменшенням фону вимірювань до 50 % та мінімальним паразитним розсіюванням повітря. Швидко переналаштовуйте прилад для проведення XRD експериментів в особливих умовах або вимірювань SAXS з якістю, що можна порівняти з тим, яке можна отримати на спеціалізованому устаткуванні SAXS.

3.4 Енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія (TDS).

Цей метод використовується для визначення елементного складу поверхні матеріалу. Він заснований на генерації рентгенівських променів у зразку, що бомбардується електронами високої енергії у вакуумній камері. Рентгенівські промені дають інформацію про елементи, що є на поверхні, на глибині від одного до двох мікрометрів. У цьому експерименті використовувався прилад XRDynamic 500, показаний рисунку 3.6.

Рентгенівські промені генеруються у зразку, коли він бомбардується електронами високої енергії. Ці рентгенівські промені, що генеруються, характерні для елементів, присутніх в зоні бомбардування. Детектор зазвичай є енергодисперсійним детектором, що вимірює енергію рентгенівських променів. Кожен елемент має унікальний набір рентгенівських променів. Рентгенівські промені від детектора потім аналізуються багатоканальним аналізатором, а також сортуються за їх енергетичними рівнями. Потім будується спектр всіх виявлених рентгенівських променів в залежності від їх енергетичних рівнів. відповідних елементів Це означає, що рентгенівські піки пов'язані з елементами з вищим відсотковим вмістом атомів у зразках [33].

Енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія - це метод хімічного мікроаналізу, що використовується на платформі SEM. EDS може надати інформацію про хімічний склад покриття. У цьому дослідженні

використовувався XRDynamic 500. Товщину покриття можна виміряти на основі кожного окремого аналізу SEM – EDS та розрахувати середнє значення. Однак через обмежений розмір покриття та шорсткість поверхні покриття для проведення аналізу складу покриття необхідно вибирати кілька точок.

3.5 Устаткування та параметри для процесу ПОЕ.

Процес ПЕО проводився на лабораторній установці ПЕО з високовольтним джерелом живлення постійного струму, що забезпечує максимальну вихідну напругу 600 В. Вона складається з циліндричної камери з акрилового скла системи водяного охолодження для відведення тепла, що виділяється при процесі ПЕО, блоку живлення та осцилографа (рисунок 3.7).

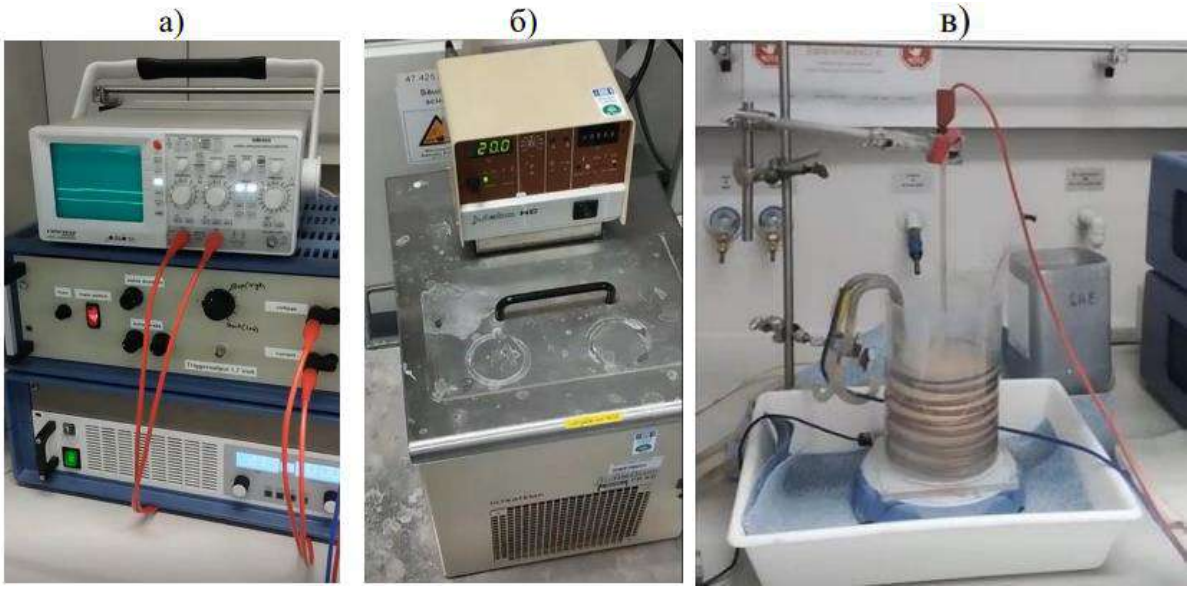


Рисунок 3.7 – Устаткування для ПЕО:
а - блок живлення та осцилограф, б - система охолодження, в - камера ПЕО

При проведенні досліджень хімічний склад та концентрація електроліту, відстань між електродами та тривалість процесу ПЕО зберігалися постійними.

Весь процес ПЕО за часом займав 10 хвилин при постійній напрузі 500 В і кімнатній температурі електроліту, тобто 20 ± 2 °C, а пульсація становила 9 мс. Для кожного із трьох зразків використовувалася різна щільність струму: 100 мАсм^2, 125 мА/см^2 та 150 мАсм^2.

У дослідженні використовувався алюмінієвий сплав А7075. Зразки розміром 15х15х4 мм були виготовлені з плоского листа А7075. Спочатку зразки були відшліфовані серією карбідокремнієвих наждачних паперів зернистості 1200, потім остаточно очищені етанолом. Цей процес був обраний для забезпечення рівної поверхні без подряпин та більш послідовної та надійної обробки ПЕО. Після остаточної очистки зразки повністю висушувалися. У зразках нарізалося різьблення, а після них приєднували до зразкотримача з нержавіючої сталі, щоб зразки були готові до процесу нанесення ПЕО-покриття.

В роботі досліджується вплив різних густин струму електроліту Na_2SiO_3 з додаванням КОН для регулювання pH на одержувані покриття. Співвідношення Na_2SiO_3 - 10 г/л, а КОН - 1 г/л. Щільність струму, що застосовується: 100 мА/см^2, 125 мА/см і 150. Параметри напруги були постійними зі значенням 500 В.

Спочатку морфологію поверхні покриттів аналізували за допомогою скануючого електронного мікроскопа н оптичного мікроскопа. Також була проведена мікроскопічна оцінка з метою виявлення пор і тріщини покриття на поверхні. У цій роботі оцінювалася товщина покриття, щоб зрозуміти вплив різних параметрів процесу ПЕО на зростання покриття і розвиток каналів мікро розряду. Крім того, методом рентгенівської спектроскопії визначався елементний склад покриттів та хімічний склад поверхні покриттів, а після і для поперечного перерізу зразка. Також було проведено фазовий аналіз покриттів за допомогою рентгенівського дифрактометра. Останнім проводився аналіз зносостійкості за допомогою трибометра.

4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.

4.1 Аналіз поперечного перерізу покриття.

Для зручності далі будуть наступні скорочення:

I_100 – зразок, ПЕО якого проходило в електроліті із щільністю струму в 100 мА/см^2.

I_125 – зразок, ПЕО якого проходило в електроліті з щільністю струму 125 мА/см^2.

I_150 – зразок, ПЕО якого проходило в електроліті з щільністю струму 150 мА/см^2.

Морфологія покриття є вирішальним фактором, що визначає корозійну стійкість і зносостійкість покриття. При великому збільшенні поверхня зразка з ПЕО-покриттям виглядає як серія глибоких западин і високих піків На рисунку 4.1 показані поперечні перерізи, зроблені за допомогою SEM трьох зразків.

Склад покриття в основному складається з алюмінію, кисню та кремнію. Однак, кількість кожного елемента в покритті може сильно вплинути на характеристики покриття. Що стосується мікротріщин, то багато з них складаються з алюмінію та кисню. Крім того, наявність мікротріщин вказує на те, що покриття має хороші ізоляційні властивості, що є унікальною перевагою ПЕО-покриття. Товщина покриття на різних ділянках може відрізнятися через хаотичне утворення розрядів на поверхні покриття. Товщину ПЕО-покриття вимірював і порівнював у різних положеннях.

Середня товщина покриття складає близько 10,27 мікрометрів для зразка I_100; 10,36 мікрометрів для I_125 та 10,4 мікрометрів для I_150. Значення наведені нижче та наведені в таблиці 4.1. Усі значення вказані в мікрометрах.

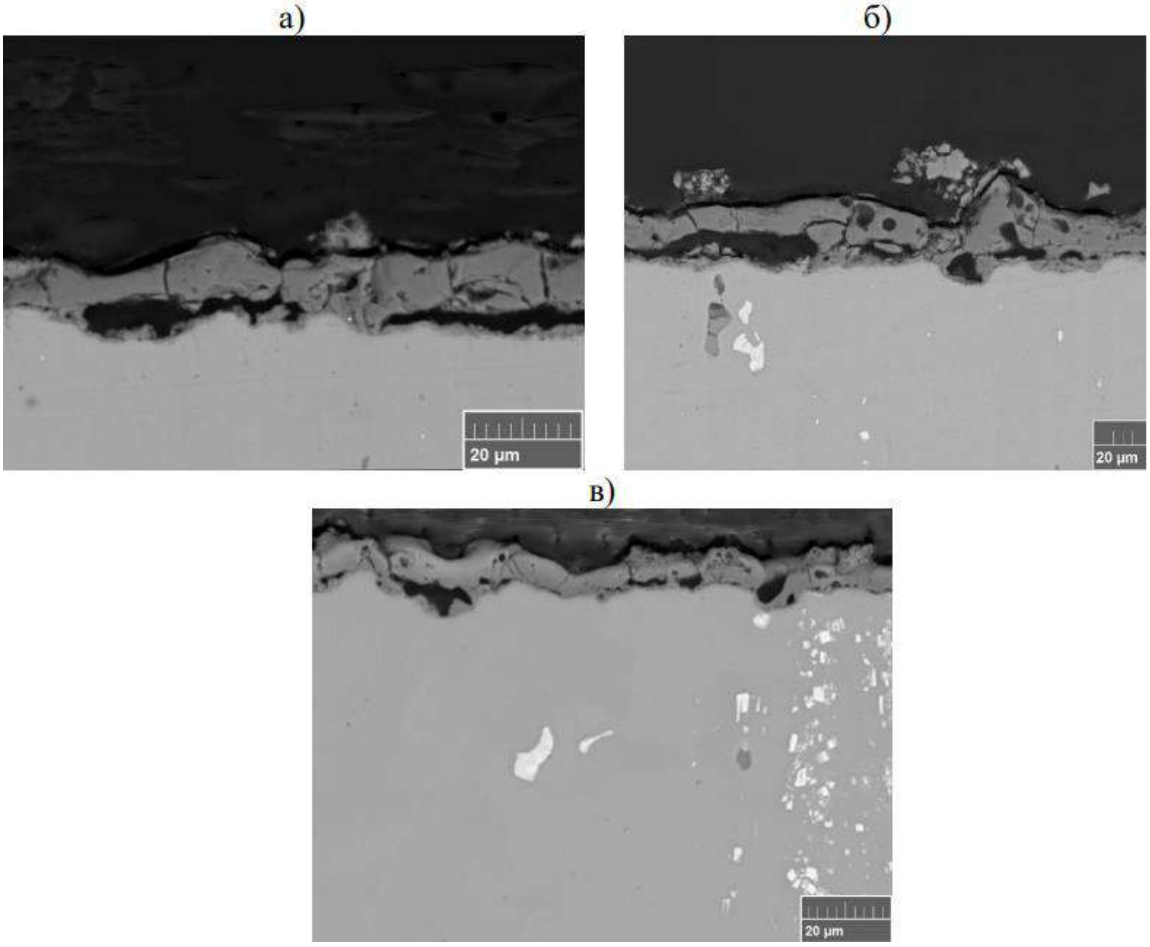


Рисунок 4.1 – SEM зображення поперечного перерізу захисних покриттів при щільності електроліту: а -100 мА/см^2, б-125 мА/см^2, в -150 мА/см^2

Таблиця 4.1 – Середня товщина захисних покриттів

№	I_100	I_125	I_150
1	11,5	7,295	11,013
2	10,625	18,3	7,976
3	7,625	7,048	9,62
4	10,125	12,859	6,329
5	12	9,645	14,051
6	9,75	7,048	13,418
Сер. знач.	10,2708	10,36583	10,40117

4.2 Аналіз морфології покриття.

Візуальне спостереження за морфологією захисного покриття було здійснено з використанням електронного скануючого мікроскопа. Отримані результати представлені рисунку 4.2.

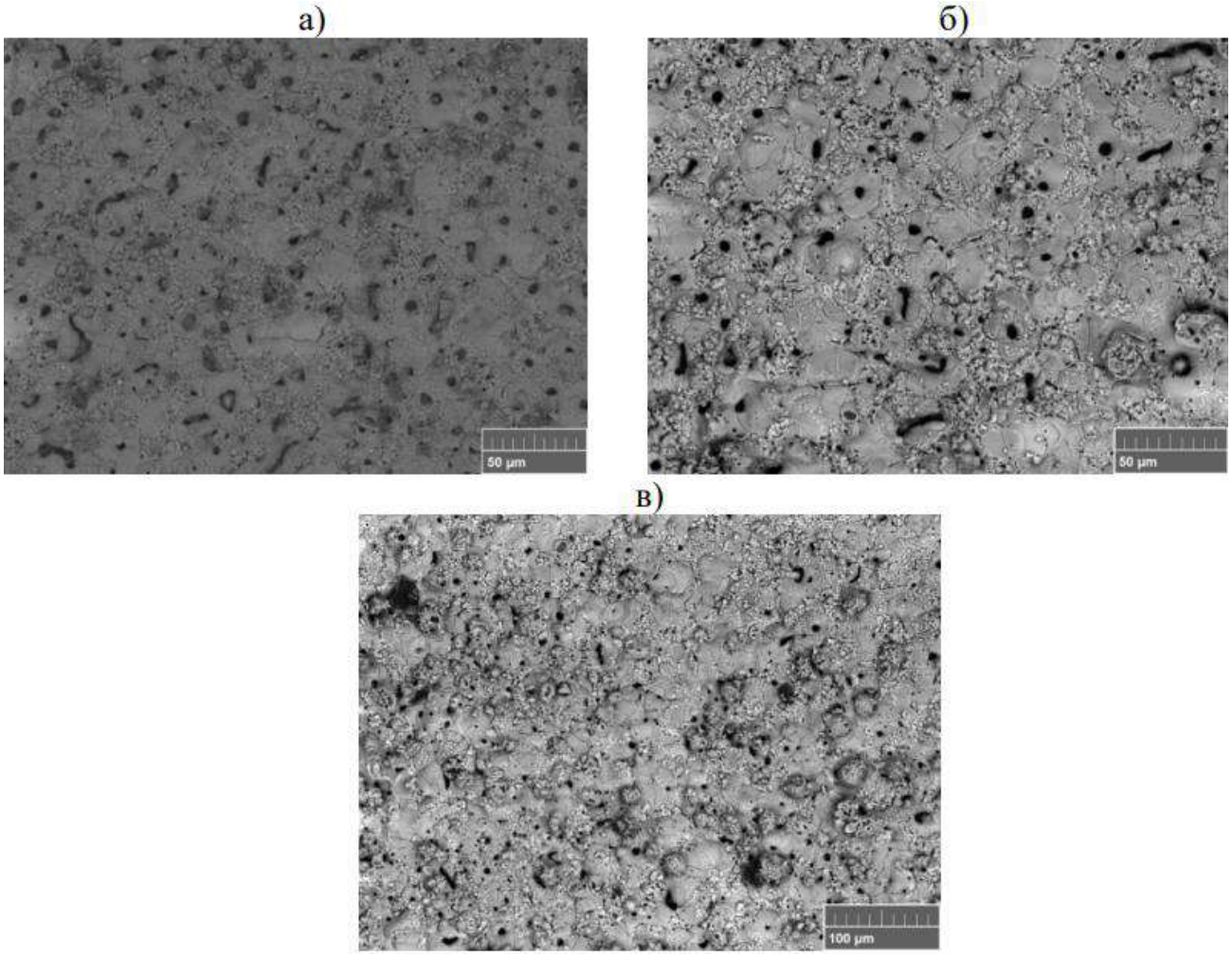


Рисунок 4.2 – Мікроструктура зразка:
а - I_100, б - I_125, в - I_150

Очевидно, що ПЕО-покриття не є гладеньким і має безліч пір на поверхні, розміри яких варіюються приблизно від 2 до 10 мікрометрів. Зображення з великим збільшенням, показане на рисунку 4.3, додатково підтверджує, що пори щільно упаковані, а поверхня покриття дуже шорстка.

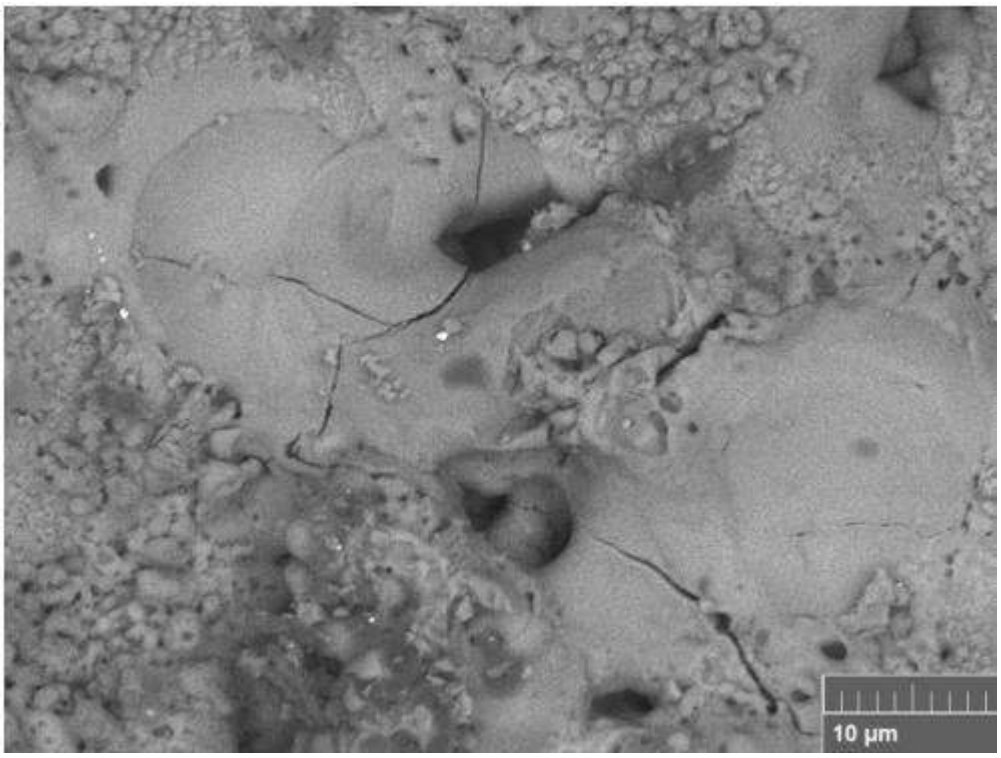


Рисунок 4.3 – Мікроструктура зразка I_100 при 5000 кратному збільшенні

Така морфологія зазвичай є результатом локального вигоряння покриття. При досягненні певної граничної температури матеріал покриття випаровується і утворює локальну пору. Цей процес відомий як мікро іскровий розряд, який є звичайним явищем у ПЕО.

Пори, що утворилися, і поставлений матеріал покриття, що залишився, утворюють характерні вузлики. Шорстка поверхня покриття не тільки сприяє посиленню механічного зчеплення між покриттям і підкладкою, але також збільшує площу поверхні. Це бажано для багатьох інженерних застосувань, наприклад, в галузі біомедицини. оскільки може сприяти адгезії та проліферації клітин на покритті.

Товщина покриття та розмір вузликів сильно залежать від параметрів обробки ПЕО. Наприклад, збільшення напруги призведе до утворення більш товстого покриття, але розміри вузликів зменшяться. Це пов'язано з тим, що більш висока напруга призводить до більш високої пробійної міцності покриття, отже, до вищої швидкості зростання покриття. З іншого боку, коли

утворюється більш товсте покриття, пори можуть проникнути протягом усього процесу ПЕО. В результаті покриття стане бар'єром для електричного поля і процес ПЕО поступово припиниться. Тому діапазон напруг, при яких можна проводити ПЕО, зменшуватиметься зі збільшенням товщини покриття. Аналогічним чином, вплив концентрації та складу електроліту також буде впливати на морфологію покриття. У цій же роботі і напруга і електроліт були постійними, але змінювалася щільність струму електроліту. З її збільшенням загальна шорсткість поверхні зростала, а значить і адгезія у тому числі. Це можна помітити зі збільшенням середнього розміру пір. Значення наведені нижче та зведені в таблиці 4.2. Усі значення вказані у мікрометрах.

Таблиця 4.2 – Середній розмір пор покриття.

№	I_100	I_125	I_150
1	4,834	5,232	5,408
2	6,29	6,243	5,657
3	6,847	3,874	6,519
4	5,155	7,179	5
5	4,406	7,183	5,852
6	5,464	9,422	6,708
7	2,955	8,741	7,5
8	2,578	5,076	9,552
9	6,748	3,309	5,831
10	9,764	5,793	7,159
Серед. знач.	5,5041	6,2052	6,5186

4.4 Аналіз хімічного складу.

Хімічний склад покриттів аналізували за допомогою енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії Аналіз проводився в зоні поперечного перерізу покриттів на глибину близько 10 мкм від поверхні покриття. Аналіз проводився в п'яти конкретних точках і в середньому по площі (рисунок 4.4).

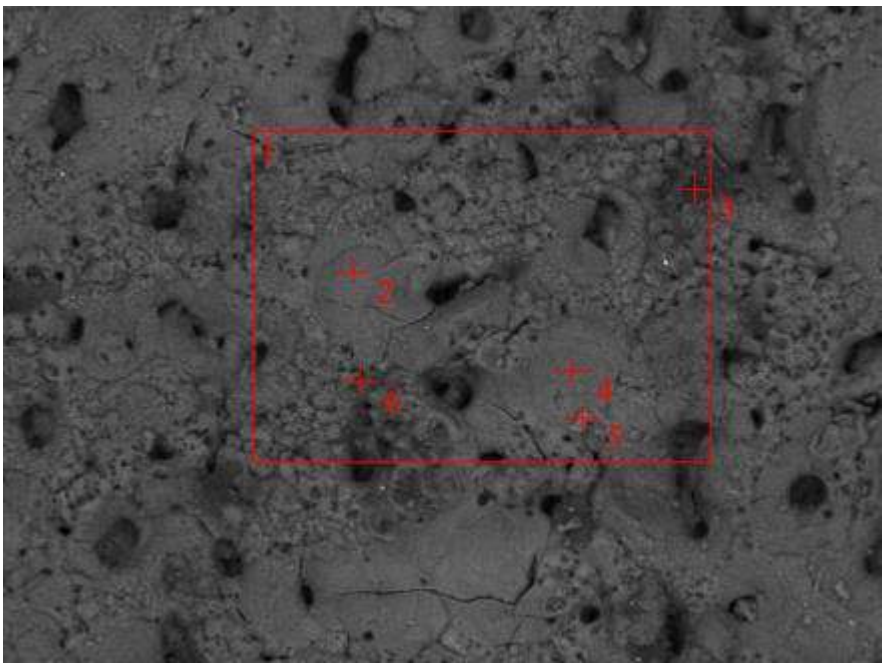


Рисунок 4.4 – Місця вивчення хімічного складу покриття

Було виявлено, що покриття складаються з кисню, алюмінію та кремнію з невеликою кількістю інших елементів, таких як натрій і калій. Графік вмісту елементів у захисному покритті зразка I_100 показаний на рисунку 4.5, для зразка I_125 на рисунку 4.6, а I_150, рисунок 4.7.

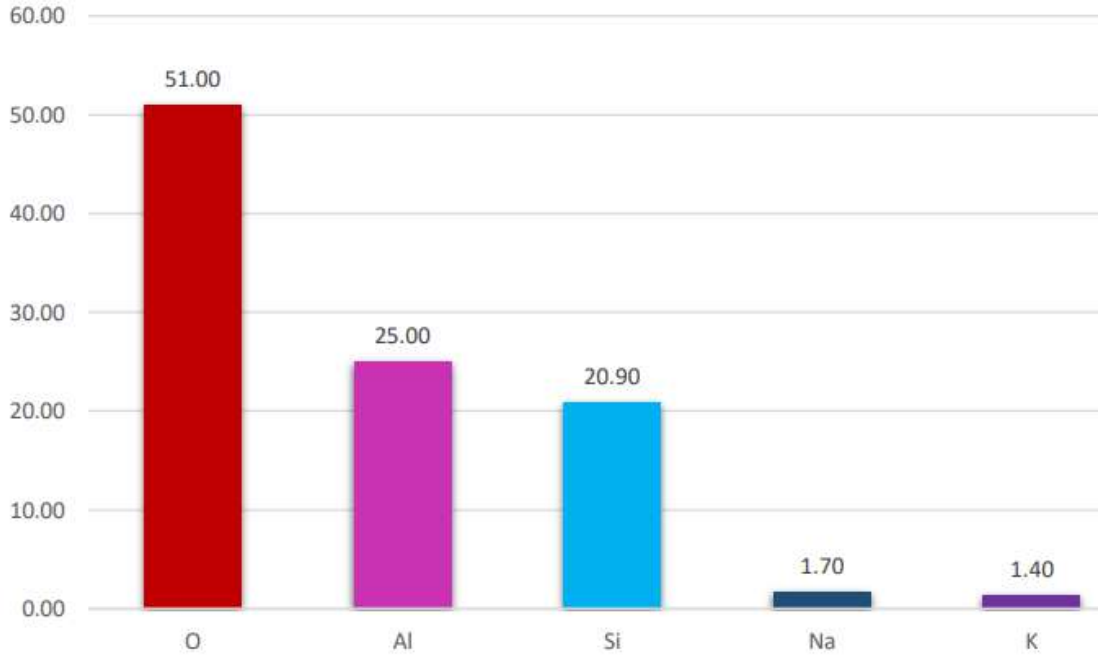


Рисунок 4.5 – Діаграма відсоткового розподілу елементів у зразку I_100

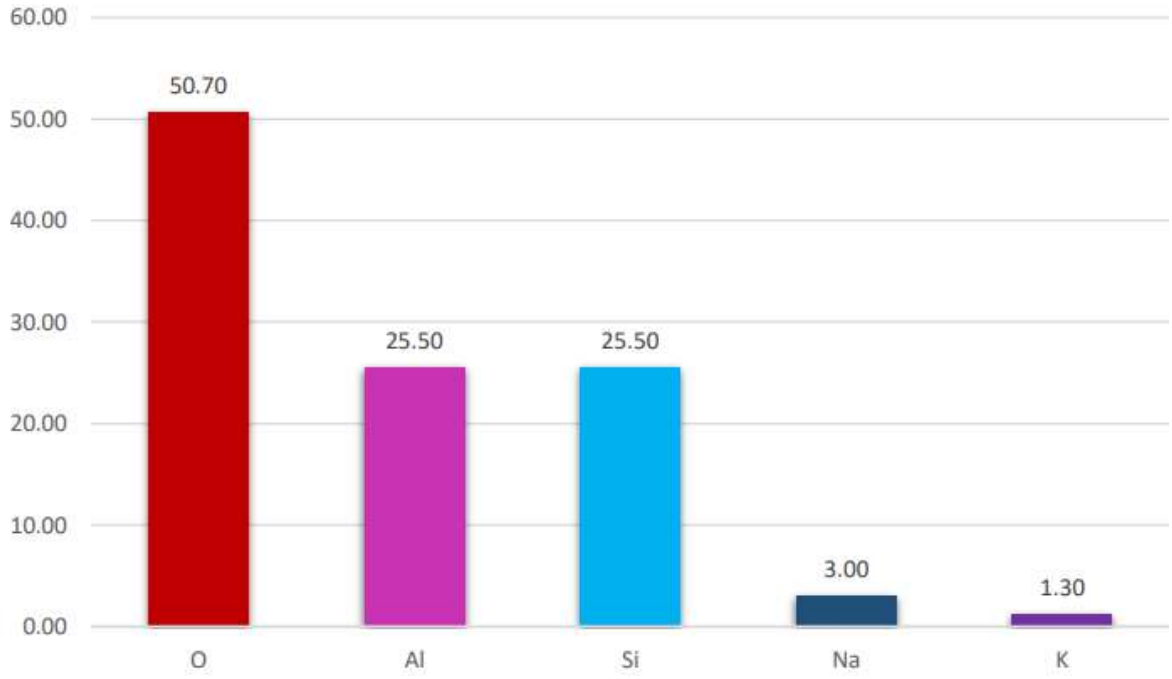


Рисунок 4.6 – Діаграма відсоткового розподілу елементів у зразку I_125

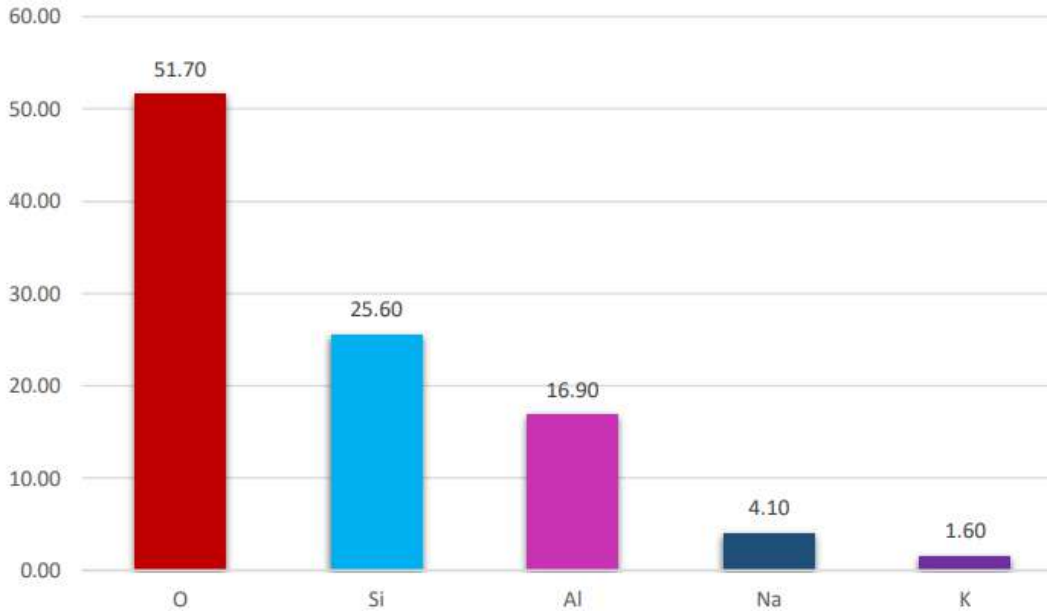


Рисунок 4.7 – Діаграма відсоткового розподілу елементів у зразку I_150

За даними з наданих графіків можна спостерігати тенденцію, пов'язану із зміною складу захисного покриття залежно від щільності струму, що застосовується в процесі плазмового електролітичного оксидування алюмінію з електролітом Na_2SiO_3.

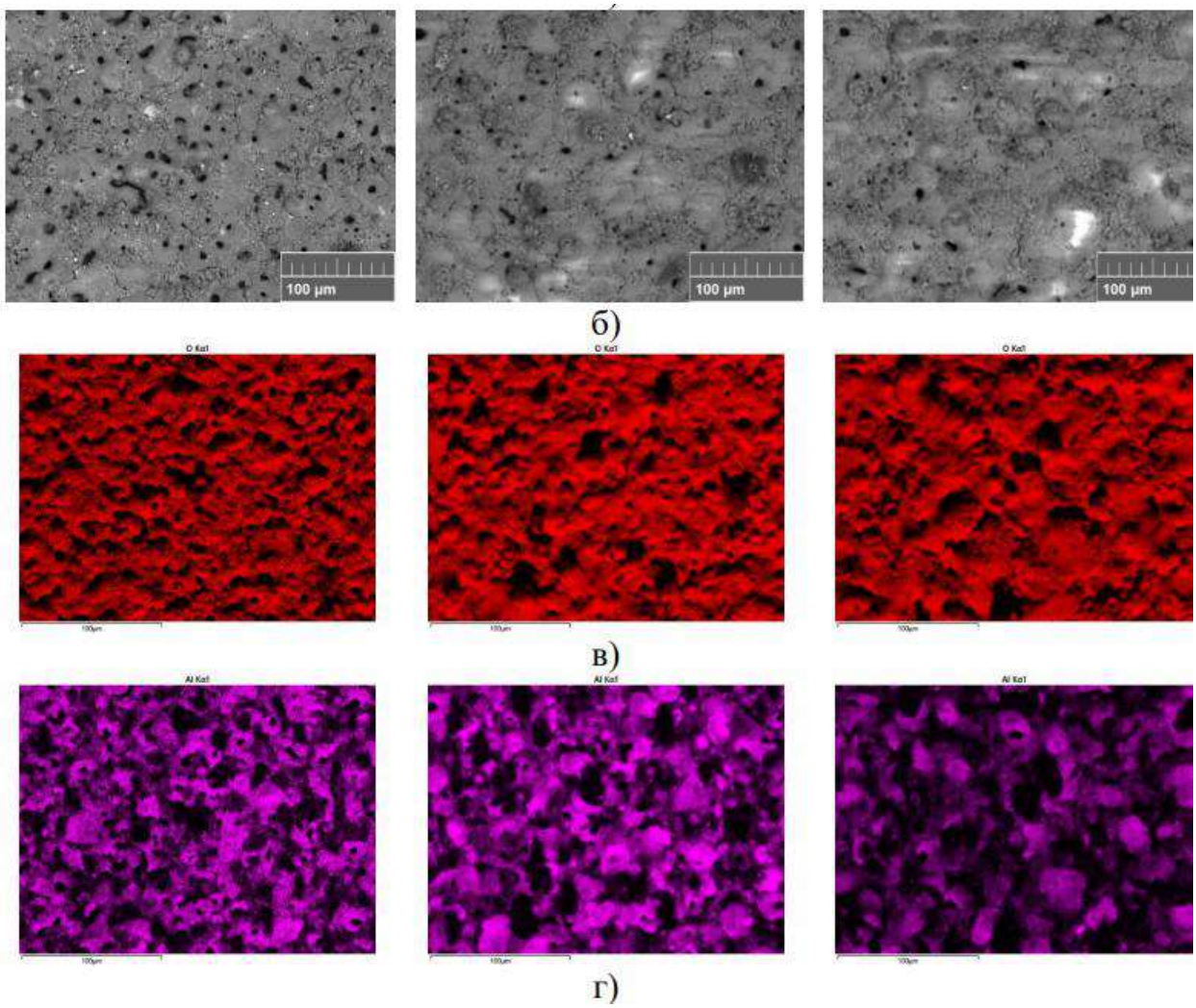
Зменшення процентного вмісту алюмінію у захисному покритті при підвищенні щільності струму говорить про те, що процес оксидування призводить до збільшення концентрації інших елементів, таких як кремній.

Це може бути обумовлено хімічними реакціями між алюмінієм та електролітом, що призводять до утворення більш складних сполук, у яких кремній заміняє алюміній.

Зміст кисню залишається практично незмінним протягом зміни густини струму. Це може вказувати на стабільність процесу утворення оксидної структури на поверхні алюмінію при різних рівнях густини струму.

На підставі цих даних можна зробити висновок про вплив густини струму на хімічний склад та структуру захисного покриття. Підвищення щільність струму призводить до змін у складі покриття, що може мати значення для регулювання її властивостей та оптимізації процесу оксидації.

Для отримання більш детального уявлення про хімічний склад та морфології захисних покриттів, проведені зображення з використанням методу енергодисперсійної спектроскопії. Цей метод дозволяє визначити присутність та розподіл елементів на зразки поверхні з високою точністю. Отримані дані аналізувалися з метою виявлення концентрації та розподілу елементів, що цікавлять. Далі будуть наведені зображення всіх трьох зразків для порівняння, а також для наочності наведено зображення мікроструктури зразка (рисунок 4.8).



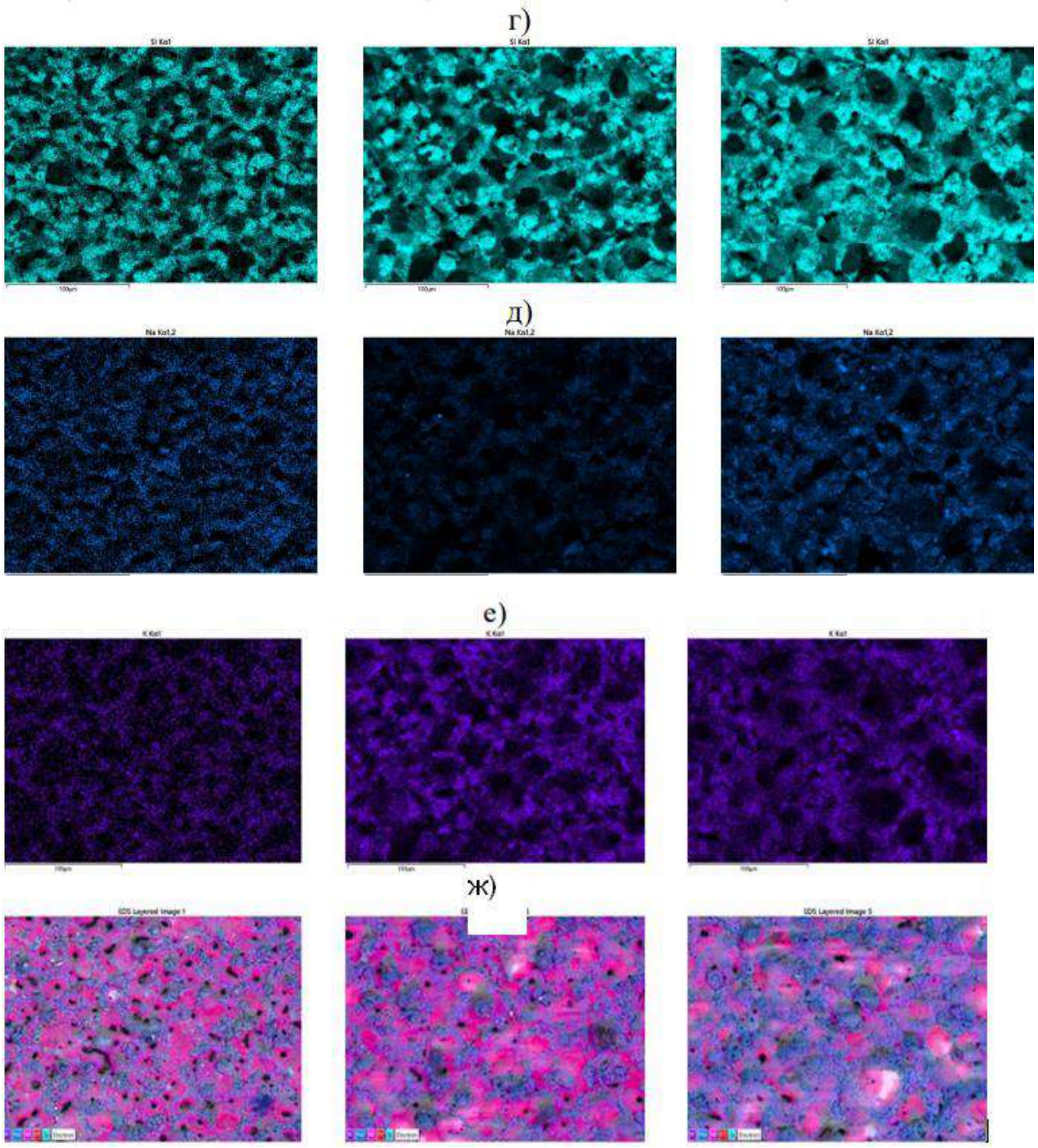


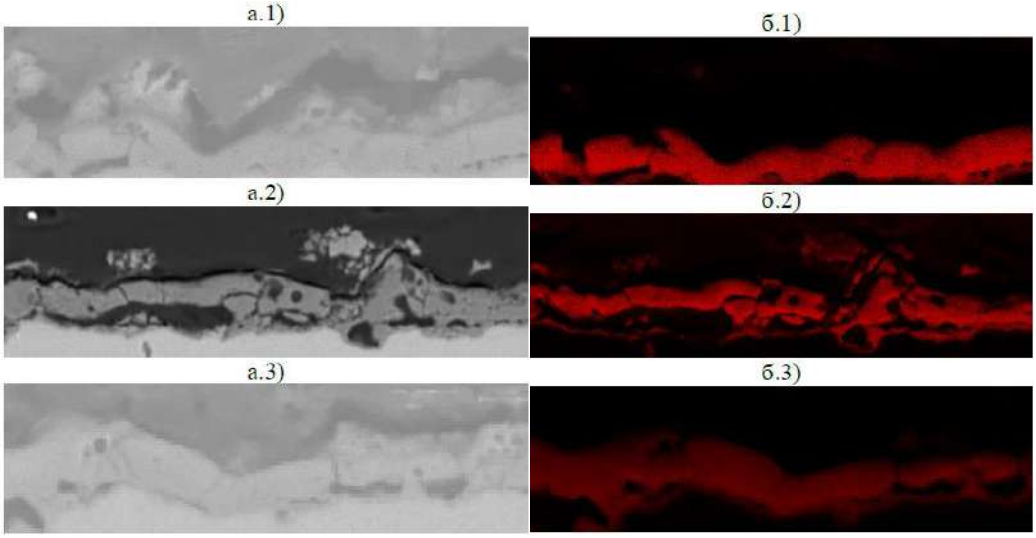
Рисунок 4.8 – Аналіз EDS на поверхні зразка I_100 для першого стовпця, I_125 для другого стовпця та I_150 для третього стовпця. а – зображення мікроструктури зразка, використане для EDS б – вміст кисню, в – вміст алюмінію, г – вміст кремнію, д – вміст натрію, е – вміст калію, ж – вміст елементів, що цікавлять

У ході дослідження було виявлено, що захисне покриття містить елементи, характерні для оксидних покриттів, такі як кисень та алюміній, що свідчить про формування оксидної структури на поверхні алюмінієвого зразка. Крім того, виявлено присутність елементів, пов'язаних із складом електроліту, зокрема, натрій та кремній, що вказує на впровадження даних елементів у структуру захисного покриття. Помічено, що зразок I_150 має менше на поверхні кількість алюмінію та більше кремнію в порівнянні зі зразком I_100, що підтверджують висновки на основі даних діаграм вмісту елементів, зроблені вище.

Аналіз розподілу елементів на поверхні покриття показав їх рівномірний розподіл, що свідчить про високу ступеня гомогенності одержаного покриття. Це є важливим показником якості та ефективності процесу оксидування.

Додатково, для більш повного розуміння структурних характеристик зразків були здійснені знімки поперечних перерізів (рисунок 4.9). Ці зображення дозволяють оцінити мікроструктуру матеріалу та виявити можливі дефекти або особливості його внутрішнього будови.

Для наочності, як і у минулому аналізі, рисунку 4.9, показаний знімок SEM, на основі якого проводився EDS.



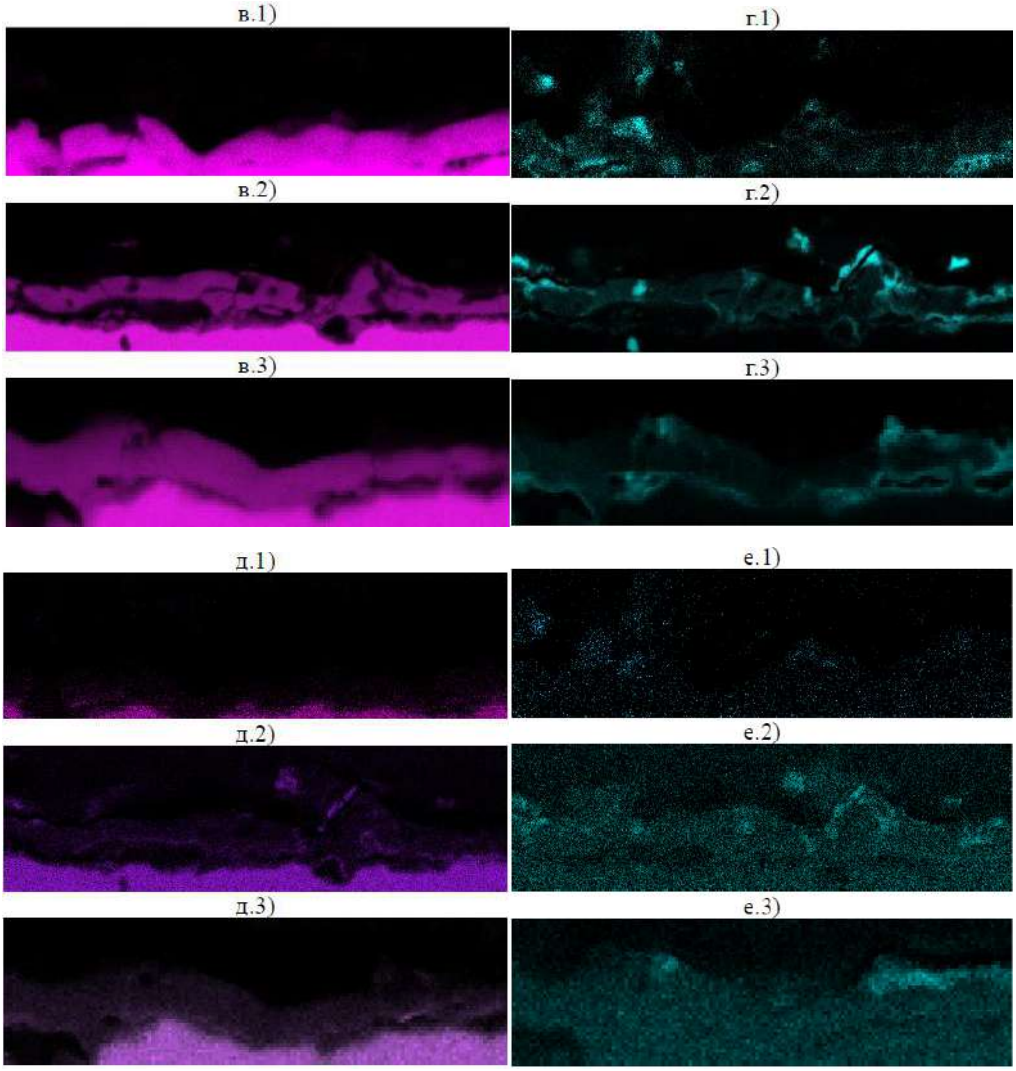


Рисунок 4.9 – Зміст елементів у захисному покритті зразка: а – знімок SEM, а.1 – I_100, а.2 – I_125, а.3 –I_150. б.1 – вміст кисню зразка I_100, б.2 – I_125, б.3 – 150. в.1 – вміст алюмінію зразка I_100, в.2 – I_125, в.3 – 150. г.1 – вміст кремнію зразка I_100, г.2 – I_125, г.3 – 150. д.1 – вміст натрію зразка, I_100, д.2 – I_125, д.3 – 150. е.1 – вміст калію зразка I_100, е.2 – I_125

Аналіз показав, що вміст алюмінію зменшувався, тоді як вміст кисню збільшувався в міру збільшення відстані від межі розділу алюмінієвий сплав-підкладка до поверхні покриття.

Ці спостереження показують, що покриття в основному складаються з оксиду алюмінію (Al_2O_3), що узгоджується з результатами рентгенівської дифракції.

У покриттях спостерігалося чітке розшарування хімічних елементів за вмісту кисню та алюмінію. Найвищий вміст алюмінію було виявлено на кордоні між покриттям та підкладкою з алюмінієвого сплаву, що дозволяє припустити утворення перехідного шару оксиду алюмінію. Вміст кисню поступово збільшується від алюмінієвої підкладки до поверхні покриття, що вказує на підвищений рівень окиснення.

При вивченні конкретних фаз захисного покриття було використано рентгенодіфракційний аналіз. Отримані результати представлені у вигляді в графіків на рисунку 4.10.

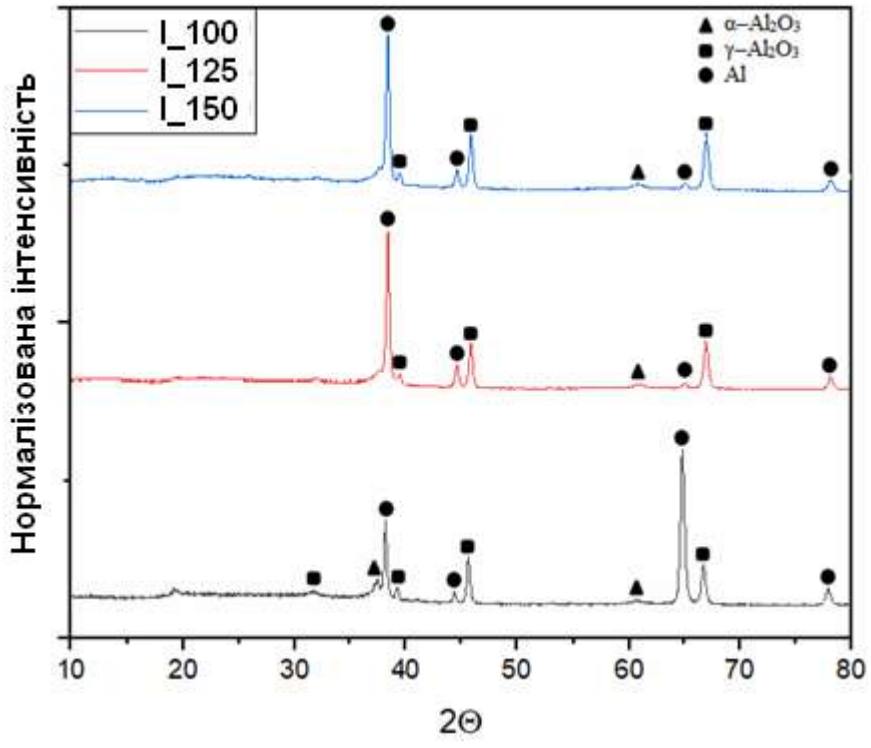


Рисунок 4.10 – Результат XRD для зразків I_100, I_125 та I_150

Аналіз графіка дозволяє ідентифікувати різні кристалічні фази, присутні у захисному покритті. За орієнтацією та інтенсивностю піків можна зробити висновки про структуру та склад захисного покриття.

Наявність характерних піків, що відповідають певним кристалічним фазам, вказує на їх присутність у структурі покриття. Ідентифікація цих фаз може бути здійснена шляхом зіставлення отриманих даних з референтними даними з баз даних кристалічних структур. За основу взято результати схожого експерименту [30].

В результаті аналізу виявлено, що у трьох досліджених покриттях присутні такі фази: α-Al_2O_3, γ-Al_2O_3 і металевий алюміній. Це свідчить про багатофазну структуру захисних покриттів.

Основні відмінності між α-Al_2O_3, γ-Al_2O_3 такі:

- Структура: α–Al_2O_3 має тригональну кристалічну структуру, той час як γ-Al_2O_3 має кубічну структуру з вакантними місцями в позиціях алюмінію.
- Площа поверхні: α-Al_2O_3 має дуже низьку площу поверхні (близько 5 м²/г), тоді як γ-Al_2O_3 має високу площу поверхні (понад 200 м²/г) завдяки своїй пористій структурі.
- Термічна стабільність: α-Al_2O_3 стабільний при високих температурах до 1100 °C, у той час як γ-Al_2O_3 переходить в альфа-фазу при температура 400-600 °C.

Спостерігалися незначні зміни інтенсивності піків через різного поглинання рентгенівського випромінювання, що може бути пояснено неоднорідністю виготовленої поверхні. Це наголошує на важливості обліку таких факторів як щільність струму, адже тільки це значення в експерименті змінювалося від одного зразка до інших.

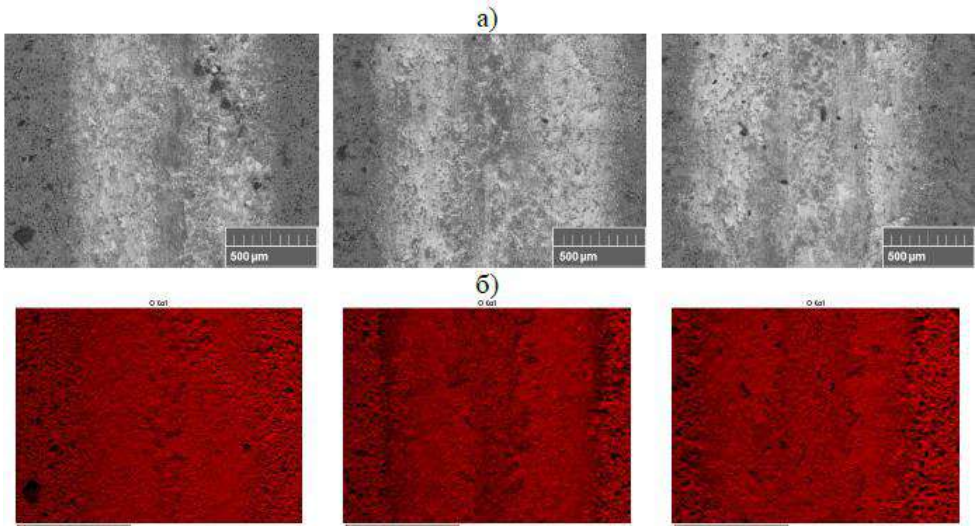
Дві фази оксиду алюмінію, α–Al_2O_3 та γ–Al_2O_3, ідентифіковані як внутрішній та зовнішній шари покриття відповідно. Це свідчить про

формуванні шаруватої структури покриттів, що може бути важливим точки зору їх властивостей та міцності.

Фаза металевого алюмінію була ідентифікована на підкладці завдяки високій глибині проникнення рентгенівських променів.

4.5 Оцінка зносостійкості.

Трибологічні властивості зносу покриття ПЕО оцінювалися з допомогою трибометра. Як матеріал у відповідь використовувався сталева кулька марки 100Cr6 (діаметр 6 мм), випробування проводилися при кімнатної температури. Навантаження було встановлено на 9 Н для зразків I_100 і I_150, а для I_125 10 Н, тому в деяких наведених нижче даних будуть відповідні закономірності. Для зразка I_125 це навантаження було обрано, тому що тільки його захисне покриття могло витримати її, а інші не могли. Довжина сліду становила 10 мм захисного покриття для кожного з елементів після проведення випробувань зразків на трибометрі та знімки SEM вказані на рисунку 4.11.



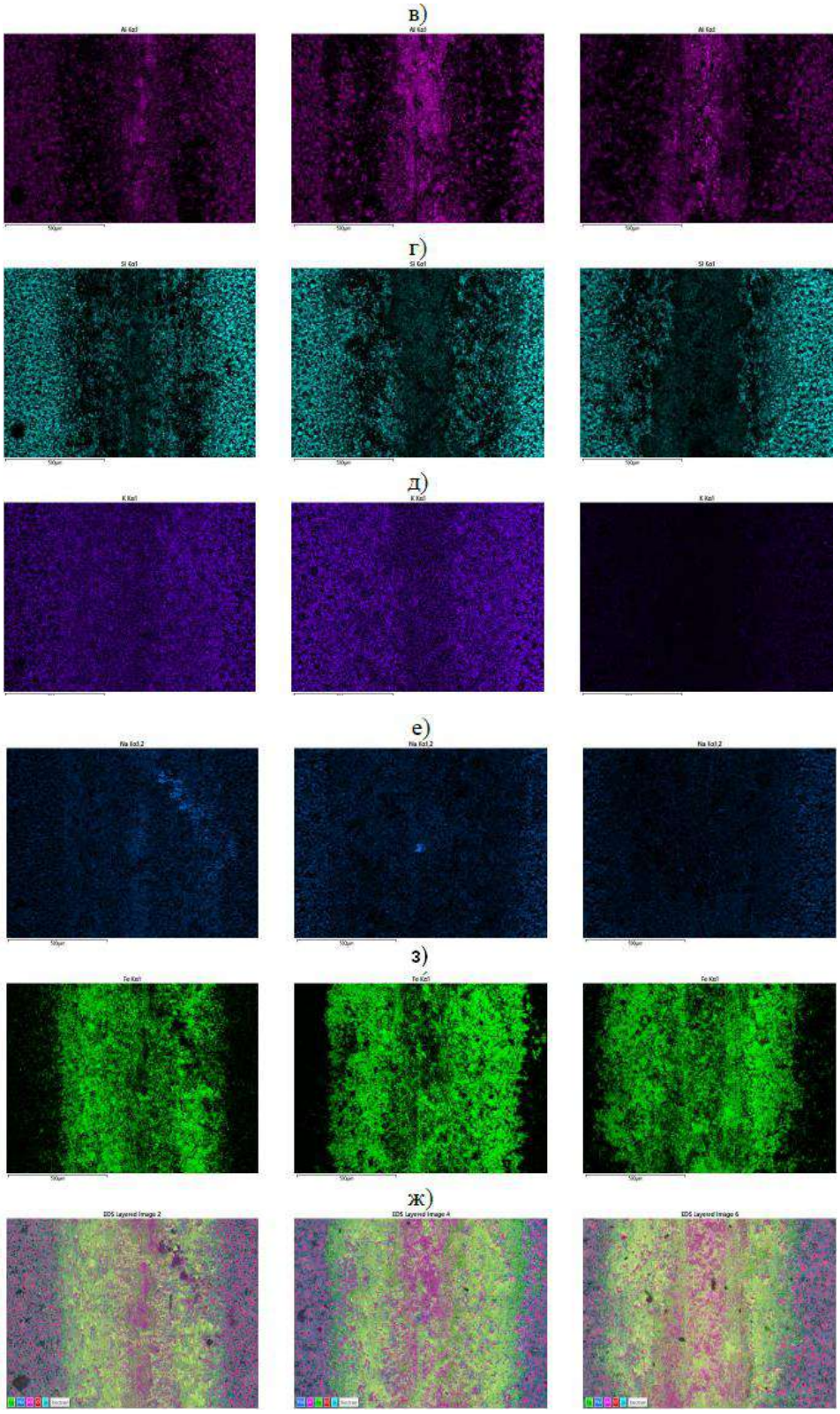


Рисунок 4.11 – Аналіз EDS на поверхні зразка після випробування на зношування

I_100 для першого стовпця, I_125 для другого стовпця та I_150 для третього стовпця, а - знімки SEM поверхні зразка після випробування на зношування трибометром, б - вміст кисню, в - вміст алюмінію, г - вміст кремнію, д - вміст натрію, е - вміст калію, е - вміст заліза, ж - вміст елементів, що цікавлять

За представленими на рисунку 4.12 зображеннями можна оцінити глибину сліду, залишеного трибометром.

Процес визначення середньої глибини сліду включав кілька кроків. Спочатку було обрано кілька областей усередині сліду на кожному зразку для виміру глибини. Потім у кожній обраній області проводилося вимір глибини сліду. Після вимірювання глибини у кількох областях сліду проводився розрахунок середнього значення глибини для кожного зразка.

Розрахунки наведені нижче та зведені в таблиці 4.3. Усі значення вказані в мікрометрах.

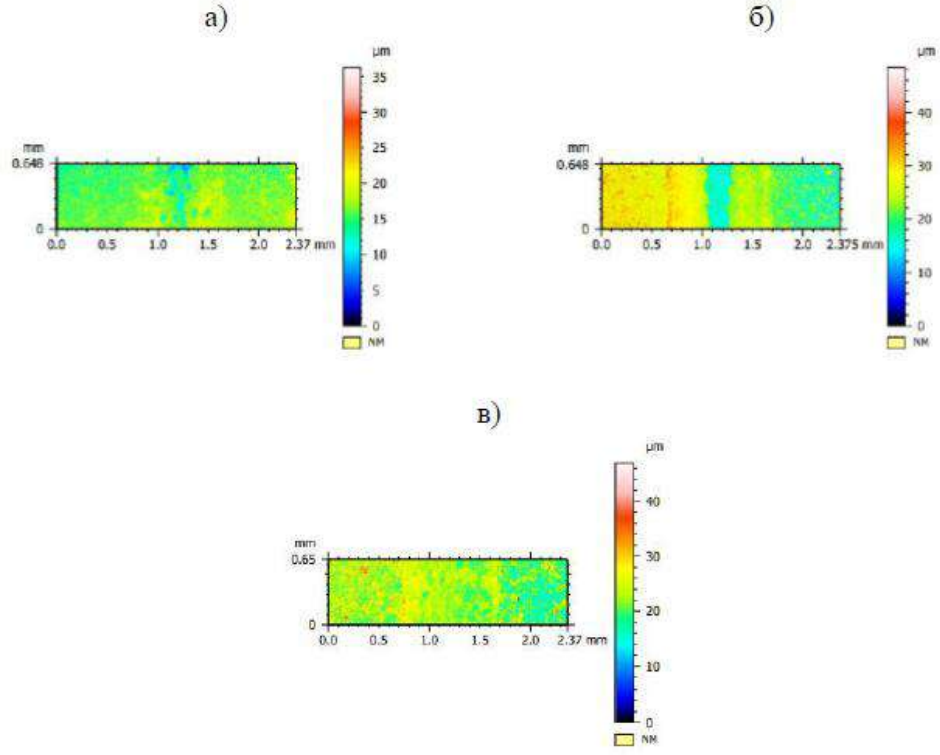


Рисунок 4.12 – Глибина сліду кульки трибометра:
а – зразка I_100, б - зразка I_125, в - зразка I_150

Таблиця 4.3 – Середня глибина сліду

№	I_100	I_125	I_150
1	14,901	22,052	12,744
2	9,443	16,129	15,36
3	14,816	14,065	14,323
Сер. Знач.	13,05333	17,41533	14,14233

Обсяг зносу розраховувався за такою формулою:

$$V = S \cdot L, \tag{4.1}$$

де V - обсяг зносу, мм^3; S – площа сліду, мм^2; L - довжина сліду, мм.

Ширину сліду зображено на рисунку 4.13.

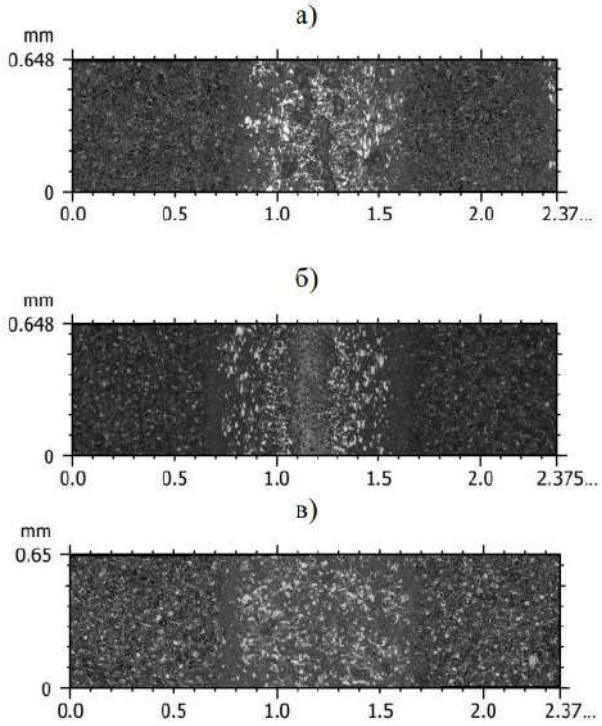


Рисунок 4.13 – Зображення сліду сталевої кульки:
а на поверхні I_100, б - на поверхні I_125, в - на поверхні I_150

За результатами вимірювання ширина сліду для зразка I_100 дорівнює 0,844 мм, для I_125 - 0,993 мм, а для I_150 - 0,929 мм. Величина зворотно-поступального руху для кожного зразка дорівнювала 10 Н.

Площу знаходили помноживши ширину сліду на глибину та на довжину. Довжина сліду дорівнює 10 мм кожного зразка.

Розрахунок обсягу зносу:

$$V1 = (0{,}844 \cdot 0{,}013) \cdot 10 = 0{,}109,$$
$$V2 = (0{,}993 \cdot 0{,}017) \cdot 10 = 0{,}168,$$
$$V3 = (0{,}929 \cdot 0{,}014) \cdot 10 = 0{,}13.$$

А швидкість зносу визначалася за такою формулою:

$$WR = \frac{V}{F \cdot Sd}, \qquad (4.2)$$

де WR - швидкість зносу, мм/Нм, V - об'єм зносу, мм^3, F - навантаження, Н, Sd - відстань ковзання, м.

Відстань ковзання дорівнює 10 м для кожного зразка. Розрахунок швидкості зносу:

$$WR1 = \frac{0{,}109}{(9 \cdot 10)} = 12{,}1 \cdot 10^{-4},$$
$$WR2 = \frac{0{,}168}{(10 \cdot 10)} = 16{,}8 \cdot 10^{-4}$$
$$WR3 = \frac{0{,}113}{(9 \cdot 10)} = 14{,}4 \cdot 10^{-4}$$

Виходячи з проведеного аналізу результатів, можна зробити висновок, що оптимальною щільністю струму для процесу плазмового електролітичного оксидування є 100 мА/см^2. Цей висновок підтверджується найкращими показниками зносостійкості при даній густині струму. Порівняльний аналіз показав, що за щільності струму 100 мА/см^2 обсяг зносу зменшується на 19,27 %, а швидкість зношування на 19,01 % порівняно з зразком I_150. Це свідчить про більш ефективний захист та підвищеної зносостійкості покриття при щільності струму 100 мА/см^2.

4.6 Вплив щільності струму.

Щодо щільності струму, то можна бачити, що в літературі щільність струму може змінюватись від дуже низьких значень до дуже високих. Середній вихід струму покращується при збільшенні щільності струму, але стабілізується, а швидкість зростання покриття буде постійною, коли густина струму перевищує певне значення. Це пояснює, що висока щільність струму сприяє утворенню бар'єрного типу покриття. Тому для отримання хорошої якості покриття необхідно вибрати відповідний діапазон густини струму. Збільшення густини струму сприятиме зростанню покриття бар'єрного типу, що буде корисно для покращення якості покриття. Це підтверджується даними [11], де автори виявили, що повторне анодування покриття, сформованого за більш високої щільності струму, покращить його якість.

Акцентую увагу на вплив зміни щільності струму на мікроструктуру, морфологію і склад ПЕО-покриттів, що розробляються. Температуру електроліту підтримували постійною лише на рівні 20±2 °C. Протягом усього дослідження підкладка була однією і тією ж за складом (алюмінієвий сплав AA7075). Напруга складала 500 В при щільності струму 100 мА/см^2, 125 мА/см2 та 150 мА/см^2.

Зміни у мікроструктурі покриття, що спостерігаються при підвищенні щільності струму з 100 мА/см^2 до 125 мА/см^2 та 150 мА/см^2, вказують на важливі процеси, що відбуваються під час плазмового електролітичного оксидування алюмінію з електролітом Na_2SiO_3.

Зменшення кількості пір при збільшенні щільності струму може бути пов'язане з повнішим заповненням пор на поверхні покриття матеріалом, що утворюється у процесі оксидації. Це може вказувати на більш ефективне покриття поверхні та зменшення ймовірності утворення дефектів.

Збільшення середніх розмірів доби при цьому може бути пов'язане з більш інтенсивним зростанням оксидних структур на поверхні захисного покриття при вищих рівнях щільності струму. Великі пори можуть утворюватися в результаті об'єднання дрібних пір, що відбувається в умовах підвищеної енергії, що є присутньою в процесі.

Збільшення шорсткості поверхні покриття у разі підвищення густини струму також може бути обумовлено більш інтенсивним зростанням оксидних структур та збільшенням розмірів пір. Це призводить до більш нерівної поверхні, що може мати значення для адгезії покриття до базового матеріалу та його механічних властивостей.

При збільшенні щільності струму з 100 мА/см^2 до 125 мА/см^2 і 150 мА/см^2 спостерігалося збільшення товщини покриття. Це явище може бути пояснено інтенсивністю процесу оксидації при підвищених рівнях струму, що сприяє активній освіті та накопиченню оксидних шарів на поверхні алюмінієвого зразка Таким чином, можна зробити висновок, що рівень щільності струму впливає на товщину покриття, причому вищі значення струму сприяють формуванню товстішого покриття. Це явище має важливе практичне значення, оскільки товщина покриття пов'язана з його захисними властивостями.

Що стосується вмісту елементів, то при збільшенні щільності струму у процесі формування захисного покриття спостерігається таке: вміст

алюмінію зменшується, вміст кремнію зростає, а вміст кисню залишається майже незмінним. Ці зміни можуть бути пов'язані з особливостями процесу оксидації алюмінію при різних рівнях струму. Збільшення щільності струму стимулює більше інтенсивна взаємодія алюмінію з електролітом, що призводить до зменшення його вмісту в покритті та збільшенню вмісту кремнію.

Збереження практично постійного вмісту кисню вказує на стабільність процесу формування оксидної структури на поверхні алюмінію за різних рівнів струму.

Аналізи XRD показали, що при збільшенні щільності струму відмінності в фазовому складі зразків немає істотного характеру. Основні фази залишаються стабільними, що свідчить про надійність процесу формування захисного покриття за зміни рівня струму. Це важливо з точки зору збереження структурної стабільності та функціональних властивостей покриття у різних умовах експлуатації.

Однак слід зазначити, що при щільності струму 100 мА/см^2 спостерігається збільшення вмісту металевого алюмінію. Можливо, це пов'язано з невеликою товщиною покриття. Незважаючи на це, решта фази залишаються відносно постійними при зміні рівня струму.

ВИСНОВКИ

1. За результатами комп’ютерного моделювання максимальне еквівалентне напруження 5,9429e-002 МПа в зірці з матеріалу А7075 менше його границі міцності, що дозволяє використовувати його в якості матеріалу для мотоциклетних зірок.

2. Для підвищення зносостійкості мотоциклетних зірок з алюмінієвого сплаву А7075 запропоновано плазмове електролітичне оксидування як найбільш оптимальний метод, але потребуючий оптимальних параметрів.

3. Літературний огляд підтвердив, що щільність струму відіграє ключову роль у процесі утворення захисних покриттів, варіюючи від низьких до високих значень. Наприклад, збільшення щільності струму сприяє формуванню більш товстих покриттів, однак після певного рівня струму швидкість зростання покриттів стабілізується. Це свідчить про важливість вибору оптимального діапазону щільності струму для отримання якісних покриттів.

4. Експериментальні дані, отримані на алюмінієвому сплаві А7075, підтвердили значний вплив зміни щільності струму на мікроструктуру, морфологію і хімічний склад покриттів, що формуються. Оптимальна щільність струму складає 100 мА/см^2 з якою спостерігається найкраща зносостійкість захисного покриття.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kandadi Sai Praneeth Reddy. Design analysis and fabrication of sprocket for formula student vehicle / Kandadi Sai Praneeth Reddy, V Venu Madhav, Boda Krishna, Jarupla Srihari, S Madhu // International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. - Volume:06/Issue:03/March-2024. – PP. 5159-5169. DOI : https://www.doi.org/10.56726/IRJMETS51442

2. M. Santhoshkumar. Modification of Rear Sprocket in Two-Wheeler for Improve the Vehicle Performances / M. Santhoshkumar T. Karthick, S. Gnanasekar, R. Hariharan, C. Karthik // International Journal of Innovative Science and Research Technology. – Volume 3, Issue 3, March– 2018. – PP. 481-485

3. Baksan, B., Tasdemir, A., Celikyurek, I. "Effect of Secondary Aging of AA7075 Aluminum Alloy to Hardness" // The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM) – 2021. – Volume 16. – PP. 20-25.

4. Tushar S. Hingve, Y. A. Kharche and N.A. Kharche, “Diagnosis for the Failure of Sprockets and Chain Drive”, International Journal of Research in Science & Engineering, e-ISSN: 2394-8299, Volume: 3, Issue: 3, May-June 2017, p-ISSN: 2394-8280

5. Sagar N. Vasoya, P. L. Koradiya and B. J. Patel, “Development of Sprocket to Improvement the Torque for Off Road Bike”, IJRSI, Volume IV, Issue I, December 2016, ISSN 2321-2705

6. M. Kaseem, S. Fatimah, N. Nashrah, and Y. G. Ko. "Recent progress in surface modification of metals coated by plasma electrolytic oxidation: Principle, structure, and performance" // Progress in materials science. – 2021. – PP. 48-55

7. H. Zhu and J. Li. "Advancements in Corrosion Protection for Aerospace Aluminum Alloys through Surface Treatment" // International Journal of Electrochemical Science. – 2024. – PP. 338-355.

8. M. Aliofkhazraei, D. D. Macdonald, E. Matykina, et al. "Review of plasma electrolytic oxidation of titanium substrates: Mechanism, properties, applications and limitations" // Applied Surface Science. – 2021. – Volume 3, – PP. 9-15.

9. S. Sikdar, P.V. Menezes, R. Maccione, T. Jacob, et al. "Plasma electrolytic oxidation process—processing, properties, and applications" // Nanomaterials. – 2021. – № 1375. – PP. 124-133.

10. T. Zehra and M. Kaseem. "Recent advances in surface modification of plasma electrolytic oxidation coatings treated by non–biodegradable polymers" // Journal of Molecular Liquids. – 2022, № 75. – PP. 94-104.

11. L. An, M. A. Ying, X. Yan, W. Sheng, and Z. Wang. "Effects of electrical parameters and their interactions on plasma electrolytic oxidation coatings on aluminum substrates" // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2020. – Volume 30(1), – PP. 1-12.

12. M. Mohedano, B. Mingo, H. Mora–Sánchez. "Effects of preanodizing and phosphates on energy consumption and corrosion performance of PEO coatings on AA6082" // Surface and Coatings Technology. – 2021. – PP. 10-21.

13. P. Behzadi, M. Badr, and A. Zakeri. "Duplex surface modification of pure Ti via thermal oxidation and gas nitriding: Preparation and electrochemical studies" // Ceramics International. – 2022. – PP. 22-30.

14. K. Babaei, A. Fattah–alhosseini, and R. Chaharmahali. "A review on plasma electrolytic oxidation of niobium: Mechanism, properties and applications" // Surfaces and Interfaces. – 2020. – PP. 105-112.

15. L. Rodriguez, J. Y. Paris, J. Denape, and K. Delbé. "Micro–arcs oxidation layer formation on aluminium and coatings tribological properties—A Review" // Coatings. – 2023. – PP. 45-52.

16. D. Wang, X. Liu, Y. Wang, Q. Zhang, D. Li, X. Liu, et al. "Role of the electrolyte composition in establishing plasma discharges and coating growth

process during a micro–arc oxidation" // Surface and Coatings Technology. – 2020. – PP. 85-92.

17. M. Molaei, K. Babaei, and A. Fattah–alhosseini. " Improving the wear resistance of plasma electrolytic oxidation coatings applied on Mg and its alloys under the addition of nano– and micro–sized additives into the electrolytes: A review " // Journal of Magnesium and Alloys – 2021. – PP. 33-42.

18. P.B. Santos, V.V. de Castro, E.K. Baldin, C. Aguzzoli. "Wear resistance of plasma electrolytic oxidation coatings on Ti–6Al–4V eli alloy processed by additive manufacturing" // Metals. – 2022. – PP. 323-352.

19. J. Martin, P. Haraux, V. Ntomprougkidis, S. Migot. "Characterization of metal oxide micro/nanoparticles elaborated by plasma electrolytic oxidation of aluminium and zirconium alloys" // Surface and Coatings Technology. – 2020, Volume: 385. – PP. 123-132.

20. Makurat–Kasprolewicz and A. Ossowska. "Recent advances in electrochemically surface treated titanium and its alloys for biomedical applications: A review of anodic and plasma electrolytic oxidation methods" // Materials Today Communications. – 2023. – PP. 133-139.

21. Y. Kang, S. Yan, Z. Li, Z. Wang, A. Yang, W. Ma, W. Chen. "Influence of Anodic Oxidation on the Organizational Structure and Corrosion Resistance of Oxide Film on AZ31B Magnesium Alloy" // Coatings. – 2024. – PP. 13-19.

22. L. Zhu, X. Ke, J. Li, Y. Zhang et al. "Growth mechanisms for initial stages of plasma electrolytic oxidation coating on Al" // Surfaces and Interfaces. – 2021. – PP. 3-11.

23. H. Mora–Sanchez, R. Del Olmo, J. Rams, B. Torres. "Hard anodizing and plasma electrolytic oxidation of an additively manufactured Al–Si alloy" // Surface and Coatings Technology. – 2021. PP. 18-31.

24. L. Wang, G. Wang, H. Dong, M. Ye, X. Li, L. Liu, et al. "Plasma electrolytic oxidation coatings on additively manufactured aluminum–silicon

alloys with superior tribological performance" // Surface and Coatings Technology. – 2022– PP. 112-122.

25. L. Xuan, Z. Peng, L. Shen, T. Qi, Q. Zhou, X. Li, et al. "Properties of low–modulus sodium silicate solution in alkali system" // Journal of Nonferrous Metals Society of China. – 2021. – Volume 31(5). – P.P. 1234–1245

26. A. Santos–Coquillat, E. Martinez–Campos, et al. "Hybrid functionalized coatings on metallic biomaterials for tissue engineering" // Surface and Coatings Technology. – 2021. – Volume 405. – P.P. 234–244

27. F. Songur, E. Arslan, and B. Dikici. "Taguchi optimization of PEO process parameters for corrosion protection of AA7075 alloy" // Surface and Coatings Technology. – 2022. – P.P. 112–119.

28. Abdelgawad and K. Al–Athel. "Effect of TGO thickness, pores, and creep on the developed residual stresses in thermal barrier coatings under cyclic loading using SEM image–based finite element" // Ceramics International. – 2021. – P.P. 92–110.

29. E. Santecchia, M. Cabibbo, A.M.S. Hamouda, et al. "Dry sliding tribological properties of a hard anodized AA6082 aluminum alloy" // Metals. – 2020. – P.P. 112–130.

30. R. J. K. Wood and P. Lu. "Coatings and surface modification of alloys for tribo–corrosion applications" // Coatings. – 2024. – P.P. 82–90.

31. T. Cheng and C. Chou The. "Electrical and Mechanical Properties of Porous Anodic 6061–T6 Aluminum Alloy Oxide Film" // Journal of Nanomaterials. –2015. – P.P. 1–5.

32. P. Sedigh Rahimabadi, M. Khodaei, et al. "Review on applications of synchrotron - based X - ray techniques in materials characterization" // X - Ray Spectrom. – 2020. – P.P. 221–230.

33. T. Willson. "Basic Radiation Physics: X–Rays" / Willson T. // Clinical Atlas of Bone SPECT/CT. – 2022. – P.P. 26–35.

ДОДАТКИ