

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Факультет технічних систем та енергоефективних технологій

Кафедра «Прикладне матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ О.П. Гапонова
«__» _____ 2020 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

зі спеціальності 132 «Матеріалознавство»

Тема: «Дослідження структури та властивостей захисних покриттів на алюмінієвих сплавах»

Студент гр. МТ.м-91	_____	Зінченко І.Д.
Керівник	_____	Гапонова О. П.
Консультант з економічної частини	_____	Берладір Х.В.
Консультант з охорони праці	_____	Говорун Т. П.
Нормоконтроль	_____	Дегула А.І.

Суми 2020

Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра «Прикладне матеріалознавство та технології конструкційних матеріалів»
зі спеціальності 132 «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ О.П. Гапонова

«___» _____ 2020 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Зінченко І.Д

1. Тема проекту (роботи) Дослідження структури та властивостей захисних покриттів на алюмінієвих сплавах затверджена наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін здачі студентом закінченого проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

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

6. Консультанти з проекту (роботи), із значенням розділів проекту, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці			
Економічна частина			

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пор.	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка

7. Дата видачі завдання _____

Студент _____

(підпис)

Керівник проекту _____

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Зінченко Іван Денисович. Дослідження структури та властивостей захисних покриттів на алюмінієвих сплавах. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота на здобуття кваліфікації магістра зі спеціальності 132 – Матеріалознавство. – Сумський державний університет, Суми, 2020.

У роботі проведені дослідження властивостей алюмінієвих сплавів після нанесення на них захисних покриттів методом електроіскрового легування.

В наш час досить широкого застосування набули алюмінієві сплави, однак, алюміній і його сплави володіють недостатньою зносостійкістю. Для цього застосовують методи модифікації поверхні, які формують на поверхні сплавів захисний шар. Перспективним напрямком модифікації поверхні алюмінієвих сплавів є електроіскрове легування (ЕІЛ). Істотними перевагами електроіскрового легування є: висока адгезія покриття з основою, можливість локальної обробки поверхні, відсутність необхідності в попередній підготовці поверхні і екологічність процесу. Тому актуальним є дослідження особливостей формування на алюмінієвих сплавах захисних шарів, що володіють достатньою суцільністю та зносостійкістю.

В роботі показано, що при низькій енергії імпульсів $J < 0,8$ Дж покриття на алюмінієвому сплаві Д1 з приростом шару не утворюються через сильний знос матеріалу з зразка (катода), поверхня зразка тільки модифікується. Приріст шару відбувається при підвищенні енергії імпульсів до $J > 0,8$ Дж. Крім того, в покритті виявлені мікро - та нанонитки з оксидів олова, що утворюються в результаті дії електромагнітних сил. Показано, що мікро - та нанонитки переносяться на поверхню зразка, утворюючи покриття зі зміненими властивостями. Отримані мікро - та нанонитки грають роль «арматури», що зв'язує покриття в шар і сприяє його збільшенню, що дає можливість використання таких покриттів для відновлення зношених деталей.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОІСКРОВЕ ЛЕГУВАННЯ, АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ, НАНОСТРУКТУРУВАННЯ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ

ABSTRACT

Zinchenko Ivan Denisovich. Investigation of the structure and properties of protective coatings on aluminum alloys. - Manuscript.

Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 132 - Materials Science. - Sumy State University, Sumy, 2020.

The study of the properties of aluminum alloys after the application of protective coatings by electrospark alloying.

Nowadays, aluminum alloys are widely used, however, aluminum and its alloys have insufficient wear resistance. To do this, use surface modification methods that form a protective layer on the surface of the alloys. A promising direction of surface modification of aluminum alloys is electrospark alloying (EIL). Significant advantages of electrospark alloying are: high adhesion of a covering with a basis, possibility of local processing of a surface, absence of need for preliminary preparation of a surface and environmental friendliness of process. Therefore, it is important to study the peculiarities of the formation of protective alloys on aluminum alloys, which have sufficient continuity and wear resistance.

It is shown that at low pulse energy $J < 0.8$ J coatings on aluminum alloy D1 with layer increment are not formed due to strong wear of the material from the sample (cathode), the surface of the sample is only modified. The increase of the layer occurs when the pulse energy increases to $J > 0.8$ J. In addition, micro - and nanowires of tin oxides formed as a result of electromagnetic forces are detected in the coating. It is shown that micro - and nanowires are transferred to the surface of the sample, forming a coating with altered properties. The obtained micro - and nanowires play the role of "reinforcement", which binds the coating to the layer and contributes to its increase, which allows the use of such coatings to restore worn parts.

Keywords: ELECTRO SPARK ALLOYING, ALUMINUM ALLOYS, NANOSTRUCTURING, WEAR RESISTANCE

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра включає 84 сторінок, у тому числі 19 рисунків, 6 таблиць, бібліографії із 71 джерел на 8 сторінках.

Мета роботи полягає у встановленні закономірностей формування покриттів на алюмінієвих сплавах методом електроіскрового легування електродами Al-Sn, що представляють собою механічну суміш.

Об'єктами досліджень є структура та властивості покриттів, отриманих методом електроіскрового легування, електродами Al-Sn.

Предмет дослідження: зразки з алюмінієвого сплаву Д1, електроди зі сплаву Al-Sn (АО20-1).

Задачі досліджень:

- провести літературний огляд методів підвищення зносостійкості алюмінієвих сплавів;
- оцінити вплив режимів електроіскрового легування на структуру алюмінієвих сплавів;
- дослідити можливість формування нанониток у покритті, синтозоного методом ЕІЛ;
- вивчити фазовий склад покриттів, отриманих при різних режимах ЕІЛ електродами Al-Sn.

Методами досліджень обрано: макроскопічний аналіз, мікроскопічний аналіз, електронномікроскопічний та рентгеноструктурний аналізи, вимірювання твердості.

Наукова новизна отримання результатів

Встановлено, що в умовах електроіскрового легування електродами Al-Sn, що представляють собою механічну суміш, можливе утворення на обробленій поверхні мікродисперсний частинок, в тому числі мікро- та нанониток, що складаються з легкоплавкого компонента і його оксидів, що утворюються в процесі перенесення з анода, завдяки чому отриманий нанокompat, що володіє високою зносостійкістю поверхні.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОІСКРОВЕ ЛЕГУВАННЯ, АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ, НАНОСТРУКТУРУВАННЯ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ

Зміст

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	11
1.1. Алюмінієві сплави	11
1.1.1. Деформовні алюмінієві сплави, що зміцнюються термічною обробкою.....	11
1.1.2. Сплави, що зміцнюються термічною обробкою.....	13
1.1.3. Ливарні алюмінієві сплави.....	15
1.2. Модифікування поверхні алюмінієвих сплавів.....	17
1.3. Наноструктурування алюмінієвих сплавів.....	25
1.4. Електроіскрове легування робочих поверхонь деталей з алюмінієвих сплавів 31	36
Висновки.....	36
РОЗДІЛ 2 УСТАТКУВАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	37
2.1. Устаткування для електроіскрового легування	37
2.2. Методика отримання обробних електродів і виготовлення технологічних зразків	38
2.3. Макроскопічний аналіз	40
2.4. Мікроскопічний аналіз.....	41
2.4. Рентгеноструктурний аналіз.....	43
2.5. Вимірювання твердості.....	44
Висновки.....	46
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ	47
3.1 Отримання покриттів на сплавах Д1 при електроіскровому легуванні в ручному режимі.....	47
3.1.1 Ефекти переносу маси.....	47

3.1.2	Склад і морфологія отриманих покриттів.....	50
3.1.3.	Фізичні основи одержання мікро - та нанониток.	53
	Висновки.....	58
	РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	59
	Висновки.....	66
	РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ, НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ТА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ.....	67
5.1.	Охорона праці як складова безпеки життєдіяльності	67
5.2.	Техніка безпеки при проведенні зварювальних робіт.....	68
5.3.	Охорона навколишнього середовища	72
	Висновки.....	74
	ВИСНОВКИ	75
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	77

ВСТУП

Актуальність роботи. У сучасних умовах все більше посилюються вимоги до експлуатаційних характеристик виробів. Зміцнення нововиготовлених, а також відновлення зношених деталей з одночасним збільшенням ресурсу, є особливо важливим в умовах, коли фінансові та матеріальні ресурси підприємств істотно обмежені. Одним з методів вирішення проблеми підвищення експлуатаційних характеристик деталей є впровадження нових матеріалів, що володіють низькою щільністю, але при цьому задовольняють, як технологічним, так і механічним вимогам. До таких матеріалів відносяться сплави алюмінію. У машинобудуванні за останні роки застосування алюмінієвих сплавів збільшується, але жорсткість умов експлуатації сучасної техніки і агресивність застосовуваних середовищ не дозволяють забезпечити необхідну зносостійкість поверхонь.

Більшість з існуючих способів відновлення і зміцнення непридатні для відновлення зношених деталей з алюмінієвих сплавів, що мають великий знос. Багато з них не дозволяють зміцнювати робочі поверхні, що негативно позначається на ресурсі деталей. Найбільш поширеними способами відновлення деталей в даний час є різні види зварювання і наплавлення. Однак при напавленні або зварюванні до деталі підводиться велику кількість тепла, що веде до їх викривлення і необхідності подальшого доопрацювання шляхом правки і подальшої механічної обробки, що далеко не завжди можливо і економічно доцільно. Останнім часом електроіскрове легування набуває все більшого поширення при відновленні розмірів зношених деталей. Електроіскрове легування дозволяє отримувати покриття з заданими властивостями.

Мета роботи полягає у встановленні закономірностей формування покриттів на алюмінієвих сплавах методом електроіскрового легування електродами Al-Sn, що представляють собою механічну суміш.

Об'єктами досліджень є структура та властивості покриттів, отриманих методом електроіскрового легування, електродами Al-Sn.

Предмет дослідження: зразки з алюмінієвого сплаву Д1, електроди зі сплаву Al-Sn (AO20-1).

Задачі досліджень:

- провести літературний огляд методів підвищення корозійної стійкості алюмінієвих сплавів;
- оцінити вплив режимів електроіскрового легування на структуру алюмінієвих сплавів;
- дослідити можливість формування нанониток у покритті, синтезованого методом ЕІЛ;
- вивчити фазовий склад покриттів, отриманих при різних режимах ЕІЛ електродами Al-Sn.

Методами досліджень обрано: макроскопічний аналіз, мікроскопічний аналіз, рентгеноструктурний аналіз та вимірювання твердості.

Наукова новизна отримання результатів

Встановлено, що в умовах електроіскрового легування електродами Al-Sn, що представляють собою механічну суміш, можливе утворення на обробленій поверхні мікродисперсних частинок, в тому числі мікро- та нанониток, що складаються з легкоплавкого компонента і його оксидів, що утворюються в процесі перенесення з анода, завдяки чому отриманий нанокompозит, що володіє високою зносостійкістю поверхні.

Апробація результатів роботи. Робота представлена на VI Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 16 – 19 квітня 2019 р.), VII Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 21–24 квітня 2020 р.), Міжнародній науковій конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 8» (м. Київ, 6 – 7 грудня 2018 р.)

Ключові слова: ЕЛЕКТРОІСКРОВЕ ЛЕГУВАННЯ, АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ, НАНОСТРУКТУРУВАННЯ, КОРОЗІЙНА СТІЙКІСТЬ

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Алюмінієві сплави

Алюмінієві сплави – легкі сплави на алюмінієвій основі, до складу яких входить один або декілька легуючих елементів. В промисловості використовують сплави алюмінію на основі систем: Al-Si, Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Mn, Al-Mg [1]. Переважно, структура сплавів на основі алюмінію складається при кімнатній температурі з α -твердого розчину та інтерметалідної фази. Легуючі елементи (магній, мідь, цинк, манган, кремній) вводять в алюміній перш за все, з метою підвищення його міцності.

Основними перевагами алюмінію та сплавів на його основі, це висока міцність (в перерахунку на одиницю маси), мала густина ($2,5 \dots 2,8 \text{ г/см}^3$), стійкість проти атмосферної корозії, порівняно невисока вартість, а також легкість отримання і обробки.

Сплави на основі алюмінію використовуються, в авіаційній (обшивка літаків, лонжерони, паливні та масляні баки), автомобільній (блоки циліндрів, головки блоків циліндрів, поршні ДВЗ) суднобудівній (корпуси суден), приладобудівній та багатьох інших галузях промисловості, а також у виробництві споживчих товарів [1].

За способом переробки у виробі алюмінієві сплави поділяють на:

- деформівні — призначені для пластичного деформування при виготовленні напівфабрикатів та деталей, до яких відносяться: деформівні алюмінієві сплави, що не піддаються зміцненню при термообробці; деформівні алюмінієві сплави, що зміцнюються термообробкою.
- ливарні — призначені для переробки методом литва.

1.1.1. Деформовні алюмінієві сплави, що зміцнюються термічною обробкою.

До цього типу сплавів відносяться сплави систем Al-Mg, Al-Mn, що характеризуються низьким рівнем міцності та високою пластичністю.

Сплави типу АМг. Сплави системи Al-Mg (магналії) характеризуються поєднанням достатньої міцності, корозійної стійкості, високої пластичності та зварюваності, а також стійким до вібрацій. Магналії застосовують для зварних конструкцій. Маркують: АМг_{0,5} (0,4 - 0,8 Mg), АМг₂ (1,7 - 2,4 % Mg), АМг₅ (4,8 - 5,8 % Mg), АМг₆ (5,8 - 6,8 % Mg) — зі збільшенням порядкового номера зростає міцність. Напівфабрикати можуть бути «м'якими» (АМг₅М), напівнагарттованими (АМг₅П) та нагарттованими (АМг₅Н, ступінь деформації — 20 - 30 %) [2].

Магналії мають властивості, схожі до властивостей бронзи і латуні, характеризується високою міцністю і стійкістю до корозії у прісній та морській воді;

- стійкий до впливу азотної кислоти з додаванням ортофосфатної, сірчаної кислоти, а також у середовищах, в яких присутній діоксид сірки (SO₂);
- добре зварюється;
- легко піддається механічній обробці, добре полірується.
- має високу пластичність;

Зміцнення даних сплавів можливо лише за рахунок наклепу при холодній пластичній деформації.

Сплави типу АМц (Al-Mn). Промислові сплави марки АМц містять від 1 до 1,5 % Mn, характеризуються високою пластичністю, технологічністю, добре зварюються і є корозійностійким. Термічною обробкою даних сплавів є: рекристалізаційний відпал (450 - 470 °C). Недоліком цих сплавів є схильність до аномального росту зерна під час відпалення, причиною виникнення дефекту вважається неоднорідність структури, яка пов'язана з низькою дифузійною рухомістю марганцю в алюмінії. Початком рекристалізації є утворення невеликої кількості центрів, в яких зерно встигає зрости до початку рекристалізації в інших об'ємах. Напівфабрикати зі сплаву АМц випускають у напівнагарттованому (АМцП), м'якому та відпаленому (АМцМ) станах. До сплавів, що призначені для виготовлення листових заготовок, що піддаються подальшому формуванню, допускається введення титану до 0,2 % [3].

Легуючими компонентами даних сплавів є магній (сплави АМг) і марганець (сплави АМц). В марці, цифра показує вміст легуючого елемента (наприклад, сплав АМг2 містить 2% Mg). Сплави АМг містять крім магнію 0,2-0,6% марганцю. Збільшення вмісту магнію викликає зростання меж міцності і плинності. Таким чином, межа міцності сплаву складає: АМг2 – 130 МПа, а сплаву АМг6 – 340 МПа, при цьому пластичність сплавів знижується незначно [4].

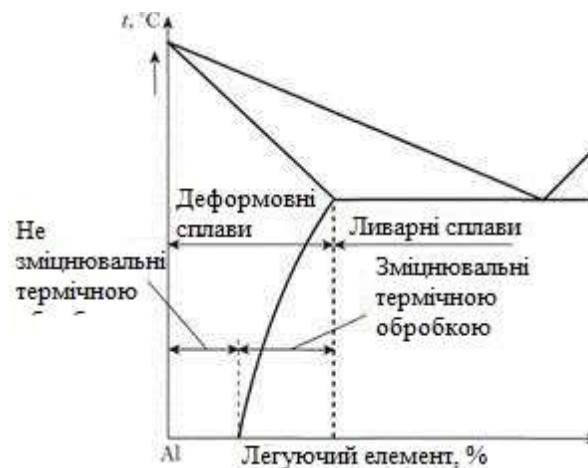


Рисунок 1.1. Діаграма стану сплавів системи "алюміній - легуючий компонент" [5]

1.1.2. Сплави, що зміцнюються термічною обробкою

Такі сплави (рисунок 1.1.) в рівноважному стані при цеховій температурі мають двофазну структуру, що складається з α -твердого розчину і вторинної фази. Зміцнення досягається в результаті твердіння. Дана операція можлива, оскільки розчинність другого компонента, знижується при зменшенні температури.

Найбільше застосування знайшли сплави системи Al - Cu - Mg, що мають назву - дюралюміни. Дані сплави маркуються літерою "Д", після якої далі йде номер сплаву (Д1, Д16, Д18).

Зміцнююча термічна обробка складається з операцій гартування і старіння. Наведемо режими термічної обробки сплавів Д1 і Д18:

- гартування виконують від температури 485 - 510° С зі швидким охолодженням у воді;

– природне старіння при цеховій температурі проводять протягом чотирьох діб.

Твердість і міцність дюралюмінів приблизно така ж, як і у низьковуглецевих сталей. Однак, при цьому, алюмінієві сплави значно перевершують сталь за питомою міцністю, так як щільність алюмінієвих сплавів ($2,7 \text{ г / см}^3$) що майже в три рази нижче, ніж у сталі ($7,8 \text{ г / см}^3$). Дана характеристика відіграє важливу роль для конструкцій, в яких необхідна мінімальна вага. Саме через це, дюралюміні знайшли широке застосування в авіації. Дюралюміні, як відомо, мають високу пластичність, їх випускають у вигляді листів, труб, пресованих і катаних профілів [6].

Коефіцієнт тертя ковзання алюмінієвих сплавів значно вищий, ніж у сплавів на основі заліза і особливо мідних. Даний фактор обмежує можливість застосування цих сплавів для деталей, які працюють в парах тертя.

Крім дюралюміна, до сплавів що деформуються, зміцнюється термічною обробкою, відносяться сплав Авіаль (АВ), який поступається дюралюмінам в міцності, але має більш високу пластичність. Високоміцні алюмінієві сплави системи Al - Zn - Mg - Cu з добавками марганцю і хрому, також відносяться до зміцнюючи та маркуються буквою "В" (В95, В96), їх міцність 600 - 700 МПа. Для роботи при підвищених температурах використовують жароміцні сплави АК4, Д20 [7].

Авіалі (сплави системи Al-Mg-Si). Характерною особливістю даних сплавів, є висока пластичність та корозійна стійкість. Сумарний вміст легуючих елементів в авіалях знаходиться на рівні 1 - 2 %. Маркують авіалі [8] літерами: АВ (0,45 - 0,90 % Mg), АД31 (0,45 - 0,90 % Mg), АД33 (0,8 - 1,2 %Mg), АД35 (0,6 - 1,2 %Mg). Додатковим елементом, до складу авіалів можуть входити хром, мідь (0,5 %) та манган.

Термічна обробка авіалів складається з гартування від температур 510 - 530°C та штучного або природного старіння (155 - 175 °C протягом 12 - 15 годин). Найбільш висока міцність відповідає природному старінню (тривалість процесу — до двох тижнів).

За міцністю, авіалі поступаються дюралюмінам. Згідно з прийнятою класифікацією [8] для алюмінієвих сплавів авіалі марок АД31, АД33 і САВ-1 відносять до групи матеріалів з низькою міцністю ($\sigma_b \leq 30$ кгс/мм²), а сплави марок АВ і АД35 — до групи із середньою міцністю ($30 \leq \sigma_b \leq 45$ кгс/мм²). Їх механічні властивості (як і всіх сплавів що зміцнюються термічною обробкою) суттєво залежать від термічної обробки.

Авіалі використовують для виготовлення лопатей повітряних гвинтів вертольотів, а після анодування — для виготовлення декоративних елементів оздоблення автомобілів, корпусів годинників.

Внаслідок того, що в області низьких температур (до -196 ° С) міцність і пластичність авіалів зростають, дані сплави використовують у криогенній техніці. Сплав АД31 застосовують в електротехнічній промисловості для виробництва різних провідників (профілі, труби та шини), що визначаються високими електропровідними властивостями сплаву після спеціальної термомеханічної обробки [1].

1.1.3. Ливарні алюмінієві сплави

Як відомо [6], однією з найважливіших вимог до ливарних сплавів - хороша текучість, яка тим вище, чим нижче температура затвердіння - лінія солідус. При самій низькій температурі відбувається затвердіння евтектики, тому ливарними є сплави, в структурі яких є евтектика. Найбільш високими ливарними властивостями володіють сплави евтектичного складу, коли температури ліквідусу і солідусу збігаються, вони кристалізуються при постійній температурі, що запобігає ліквідації. Такі сплави добре заповнюють ливарні форми, залишаючись в однофазному, рідкому стані до низьких температур [6].

В якості ливарних можуть бути використані сплави систем "Al- Si", "Al- Mg", але найбільш широке застосування в промисловості знайшли *силуміни* - сплави алюмінію з кремнієм (рисунок 1.2), що володіють кращими ливарними властивостями.

Маркування сплавів: літера А - алюмінієвий сплав; літера, що позначає легуючий компонент (К - кремній, М - мідь, Ц - цинк); цифра за буквою - середній вміст компонента (аналогічно позначенню сталей). Наприклад, склад сплаву АК5М7 - 5% Si, 7% Сі, решта (88%) – Al [6].

Найбільш високими ливарними властивостями володіє сплав АК12, що має евтектичну структуру. Недоліком сплаву є наявність в його структурі кристалів кремнію, що приводить до зниження механічних властивостей (поліпшення технологічних і експлуатаційних властивостей досягається модифікуванням). Даний сплав не піддається термічній обробці, має низькі твердість і міцність, використовується для виготовлення малонавантажених деталей (корпуси приладів).

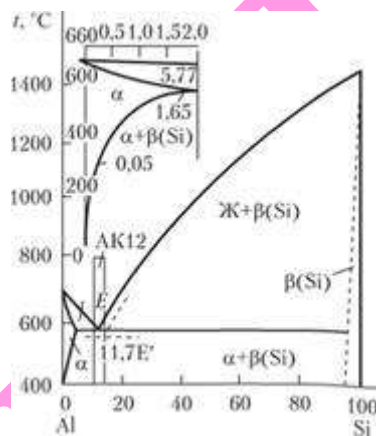


Рисунок 1.2. Діаграма стану сплавів системи "Al - Si" [5]

Деякі ливарні сплави можна зміцнити за рахунок твердіння, їх піддають термічній обробці - гартуванню й наступному штучному старінню. До зміцнюючих відноситься сплав АК9 (середній склад - 9% Si, 0,25% Mg, 0,4% Mn). Термічна обробка - гартування і подальше старіння; зміцнювальна фаза - Mg_2Si . Цей сплав застосовують для середніх і великих деталей відповідального призначення: корпусів компресорів, картерів, блоків і т.д.

Силуміни за рядом характеристик поступаються чавунам, що застосовуються у промисловості в якості ливарних сплавів, внаслідок більш низьких механічних властивостей, високого коефіцієнта тертя, великий ливарної усадки. Крім того, їх вартість у кілька разів вище. Широке застосування силумінів

визначається основною перевагою перед чавунами. Це мала щільність, а значить, і істотно менша маса виливків з силумінів при однакових габаритах з виливками з чавуну [9].

1.2. Модифікування поверхні алюмінієвих сплавів

Метою поверхневої обробки металів і сплавів є, підвищення їх стійкості проти впливу зовнішніх агресивних середовищ при нормальній і підвищеній температурах.

В наш час досить широкого застосування набули алюмінієві сплави, які використовуються в різних галузях промисловості. Однак, алюміній і його сплави мають ряд недоліків: низький модуль пружності, невисока зносостійкість, недостатня корозійна стійкість при високих температурах і механічній напрузі. Для усунення цих недоліків застосовують методи модифікації поверхні, які формують на поверхні сплавів захисний шар.

В даний час розробляються нові способи і технології нанесення покриттів, в тому числі багат шарових і багатокомпонентних, на металеві поверхні [10]. Для підвищення зносостійкості деталей отримують все більший розвиток високоенергетичні технології нанесення покриттів, що використовують висококонцентровані джерела енергії [11]. Стосовно до алюмінієвих сплавів – це зміцнення поверхонь іонною імплантацією киснем [12], електроіскровим легуванням [13], іонно-плазмовим напиленням [14], мікродуговим оксидуванням, випромінюванням ОКГ, оксидуванням в плазмі тліючого розряду, анодуванням і т.д.

Методи поверхневого зміцнення відрізняються один від одного фізико-хімічною природою зміцнюючого впливу, технічними показниками і ефективністю. Велика відмінність існує і в застосуванні обладнання.

В силу різних причин сфера використання деяких із зазначених технологічних процесів найчастіше досить обмежена, тому в конкретних умовах виробництва вибирається найефективніший технологічний процес з точки зору якості поверхні, економічності, енергоємності тощо.

Зміцнювальні покриття, які, покращуючи властивості поверхні (зносостійкість, твердість, корозійну стійкість і інші властивості), практично не змінюють розмір деталі на місці нанесення покриття. Процес нанесення таких покриттів можна назвати поверхневим модифікуванням. Такі покриття необхідно наносити на щойно виготовлені деталі. До зміцнювальних способів, що застосовується для деталей з алюмінієвих сплавів, відносяться: іонна імплантація, оксидування в плазмі тліючого розряду, іонно-плазмове напилення та інші.

З перерахованих вище способів для отримання зносостійких покриттів на алюмінієвих сплавах більш придатними процесами є мікродугове оксидування (МДО) і електроіскрове легування (ЕІЛ). Обидва способи відносяться до групи зміцнювальних методів обробки поверхні, заснованих на впливі висококонцентрованих потоків енергії на поверхню деталі, що призводить до значного підвищення зносостійкості деталей [15].

Суть методу МДО [16] полягає в формуванні на поверхні деталі в умовах впливу мікродугових розрядів зносостійкого покриття, що складається переважно з корунду. За властивостями МДО покриття значно перевершують покриття, одержувані звичайним анодуванням: по мікротвердості в 3 рази, по зносостійкості – майже в десять разів. МДО покриття на алюмінієвих сплавах мають твердість в 4,5 рази більшу, ніж твердість загартованої сталі, а зносостійкість при роботі в парі зі сталлю знаходиться на рівні твердих сплавів.

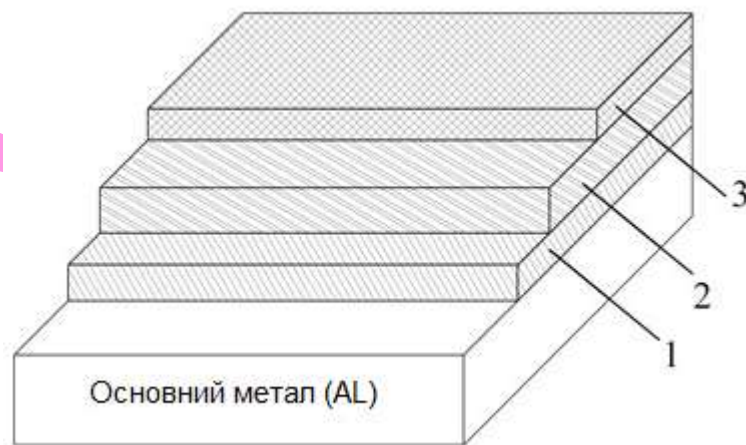


Рисунок 1.3. Схема структури покриття при мікродуговому оксидуванні алюмінію: 1 – перехідний шар; 2 – робочий шар; 3 – технологічний шар [16]

Основними перевагами методу МДО алюмінієвих сплавів є [15]:

- можливість формування покриттів на деталях, що мають складну конфігурацію, в тому числі внутрішні порожнини;
- отримання твердих зносостійких покриттів товщиною від 0,1 до 1 мм в залежності від марки сплаву, складу електроліту і режиму обробки;
- стійкий, легко відтворений процес;
- просте і компактне обладнання, що дозволяє повністю механізувати процес [15].

МДО є досить складним і багатофакторним процесом. Вплив окремих факторів на властивості і якість покриттів досліджується досить широко, але в даний час відсутні дослідження, що встановлюють залежність хімічного і фазового складу МДО-покриттів на корозійну стійкість.

У процесі формування МДО-покриття велику роль відіграють плазмохімічні і термічні процеси. На поверхні металу формується покриття, що включає оксид алюмінію і поверхневі комплекси, що утворюються в результаті взаємодії з силанольними групами. основу зовнішнього пухкого (технологічного) шару МДО-покриття становить мулліт ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), який представлений у вигляді голчастих кристалів-двійників, зустрічаються також окремі глобули з α - і γ - Al_2O_3 [17]. Такі кристали мулліта притаманні тільки на приповерхневій зоні, в основному і перехідному шарах МДО-покриття мулліт знаходиться в дрібнокристалічному стані. Зовнішній шар характеризується високою шорсткістю, невисокою зносостійкістю і використовується для нанесення різних органічних і лакофарбових покриттів.

Основний (робочий) шар в основному складається з фаз γ - Al_2O_3 і α - Al_2O_3 [17]. Внутрішній шар складається в основному з фази α - Al_2O_3 , яка утворюється в результаті невисокої швидкості охолодження і повинна обумовлювати високу мікротвердість, зносо та корозійну стійкість покриття.

Широко поширеним способом підвищення експлуатаційних властивостей алюмінію і його сплавів є азотування поверхні за допомогою різних іонно-

плазмових методів. Щодо великий час обробки виробів з алюмінію для збільшення концентрації і глибини проникнення азоту - один з основних недоліків цих методів. Обробка компресійними плазмовими потоками є новим перспективним способом підвищення механічних властивостей матеріалів [18], перш за все, через високу швидкість обробки (від 100 мкс) і великої глибини модифікації поверхневого шару (кілька десятків мікрметрів).

Використання в даному методі азоту в якості плазмоутворюючої речовини дозволяє очікувати формування в поверхневому шарі алюмінієвих сплавів нітриду алюмінію, що призводить до збільшення твердості і зносостійкості сплавів. Разом з тим, висока енергія плазмового потоку обумовлює модифікацію не тільки алюмінієвої матриці, але і інтерметалідних фаз.

Для зразків, підданих впливу компресійних плазмових потоків, характерна розвинена морфологія поверхні, що залежить від параметрів обробки. Найбільш розвинений рельєф поверхні спостерігається при збільшенні E . В роботі [17] вказується, що формування рельєфу поверхні обумовлено впливом цілого ряду чинників, пов'язаних з процесами швидкого нагріву і охолодження поверхні, а також складним характером взаємодії налітаючої плазми з поверхнею матеріалу.

Зміна мікротвердості алюмінієвого сплаву при різних режимах плазмової обробки корелює зі структурно-фазовими змінами. Розчинення зміцнюючих фаз в поверхневому шарі веде до зменшення його твердості після обробки. Максимальне зменшення твердості спостерігається при $\xi = 13$ Дж/см² - режимі, обумовлюючим максимальне розчинення.

Як відомо [6], алюміній і його сплави характеризуються порівняно низькою зносостійкістю, що істотно обмежує область їх застосування. Для поліпшення трибологічних характеристик матеріалу часто напилюють тверді зносостійкі покриття [19]. Напилення твердого покриття на порівняно м'яку підкладку часто призводить до передчасного руйнування або відшаровування покриття в процесі механічних і теплових навантажень. Рішенням даної проблеми є попередня зміцнююча обробка поверхні виробу або деталі концентрованими потоками енергії, насичення поверхні атомами металів і газів і т.д. [20-21].

В якості матеріалу для дослідження був використаний технічно чистий алюміній марки А7. Напилення нітридного покриття складу ZrN (товщина покриття 0,5 мкм) здійснювали на вакуумній іонно-плазмовій установці «Квінт» [22]. В якості випаровуємого катода використовувався технічно чистий цирконій.

Авторами роботи запропоновано наступний режим опромінення системи «покриття (ZrN) / (А7) підкладка»: щільність енергії пучка електронів $ES = 10$ Дж / $см^2$; тривалість імпульсу впливу $t = 150$ мкс; кількість імпульсів $N = 10$ імпульсів.; частота проходження імпульсів $f = 0,3$ $с^{-1}$ [23]. Опромінення в даному режимі дозволяє плавити тонкий поверхневий шар алюмінію. Перед напиленням покриття зразки алюмінію піддавали азотуванню в плазмі несамостійного тліючого розряду з порожнистим катодом при низькому ≈ 1 Па тиску на експериментальній установці [24]. Параметри азотування були обрані за результатами попередньо виконаних досліджень [25]. А саме, температура азотування - 550 ° С, час азотування - 1-7 годин, робочий тиск азоту - 1 Па; напруга горіння тліючого розряду - 200 В; струм тліючого розряду - 50 А; напруга електричного зміщення зразків - -200 В; коефіцієнт заповнення імпульсу - 100%.

Методами скануючої електронної мікроскопії встановлено, що азотування алюмінію в плазмі несамостійного тліючого розряду з порожнистим катодом при низькому (≈ 1 Па) тиску супроводжується формуванням на поверхні зразків структури островкового типу, розмір кристалітів якої 200-250 нм (рисунок 1.4).

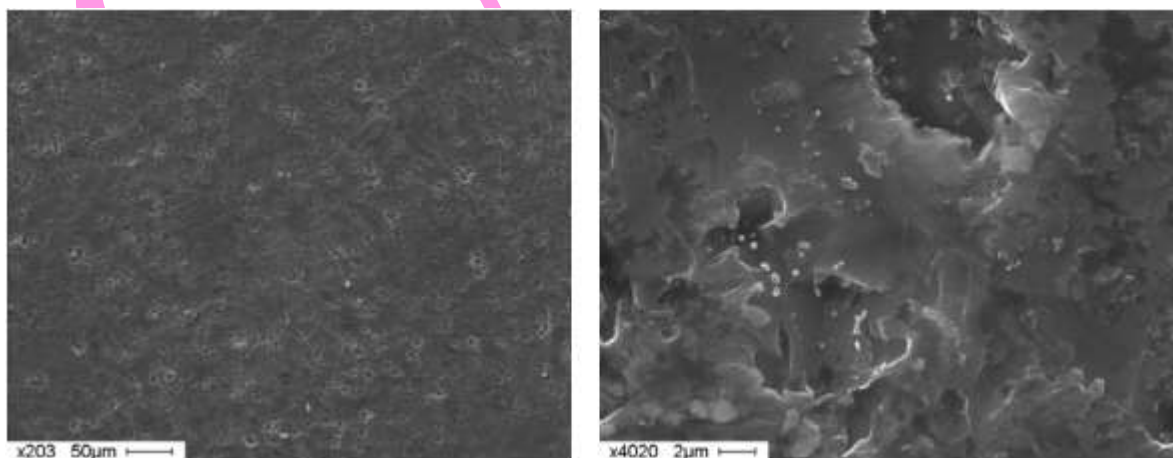


Рисунок 1.4. Електронно-мікроскопічне зображення поверхні зразків технічно чистого алюмінію марки А7 після азотування протягом 7 год [26]

Встановлено, що острівці мають нанокристалічним структуру з розміром кристалітів 5-15 нм (рисунку 1.4). Мікроелектронограмми, отримані з острівців, є кільцевими, що також вказує на нанокристалічну будова матеріалу. Ідентифікування мікроелектронограмми показало, що дифракційні кільця сформовані рефlekсами нітриду алюмінію з гексагональної кристалічною решіткою ($a = 0,3113$ нм, $c = 0,4981$ нм).

Шляхом вимірювання мікротвердості виявлено формування поверхневого шару, твердість якого змінюється немонотонним чином, досягаючи максимального значення при азотуванні протягом 3 ч, рівного 2040 МПа, що в $\approx 7,7$ рази перевищує мікротвердість вихідного алюмінію. Параметр зносу (величина, зворотна зносостійкості) після даної обробки в $\approx 4,7$ рази менше параметра зносу вихідного алюмінію. Коефіцієнт тертя модифікованого шару в $\approx 1,2$ рази менше коефіцієнта тертя вихідного алюмінію.

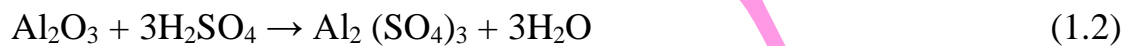
Таким чином, азотування зразків технічно чистого алюмінію марки А7 в плазмі несамостійного тліючого розряду з порожнистим катодом при низькому тиску ≈ 1 Па призвело до формування багатофазної багат шарової нанокристалічної структури, поверхневий шар якої утворений нанорозмірними частинками нітриду алюмінію з гексагональної кристалічною решіткою. У поверхневому шарі в обсязі зерен алюмінію розташовуються нанорозмірні частинки нітриду алюмінію з гранецентрованою кубічної кристалічною решіткою. Показано, що після азотування мікротвердість алюмінію в $\approx 7,7$ рази перевищує мікротвердість вихідних зразків; параметр зносу (величина, зворотна зносостійкості) в $\approx 4,7$ рази, а коефіцієнт тертя в $\approx 1,2$ рази менше відповідних показників вихідного алюмінію марки А7.

Для підвищення адгезії покриттів на алюмінієвих деталях пропонується спеціальна підготовка поверхні, до якої можна віднести процес анодування.

Анодні оксидні плівки знаходять застосування для захисту металу від корозії і стирання, для електричної і теплової ізоляції, для нанесення гальванічних покриттів. Цей процес дозволяє отримати підшар, що складається з оксиду

алюмінію необхідної товщини (не менше 3 мкм), з досить розвиненою системою пір для подальшого нанесення гальванопокриття [27].

При виборі електроліту і режимів роботи необхідно враховувати залежність товщини плівки від анодної щільності струму і часу анодування. Характер зміни товщини оксидної плівки в процесі анодування пов'язаний зі зменшенням швидкості росту плівки оксиду (1.1) внаслідок збільшення швидкостей її розчинення (1.2) і виділення кисню (1.3):



Якісні гальванічні покриття отримують при осадженні їх на анодну плівку, сформовану в розчині ортофосфатної кислоти концентрацією 350-670 г/дм³ при температурі 18-30°C і щільності струму 1-2 А/дм², протягом 5-15 хвилин [28]. Істотним недоліком процесу анодування в ортофосфатної кислоти є його велика чутливість до найменших змін в складі оброблюваних сплавів, що обмежує області його застосування. Більш універсальним є електроліт, що містить суміш 15 об.% H₂SO₄ і 15 об.% H₃PO₄. Такий електроліт дозволяє проводити анодування практично всіх алюмінієвих сплавів.

Авторами роботи [29] для отримання анодних оксидних плівок на алюмінієвих сплавах марок АД31, АМг2 були використані 30% розчин ортофосфатної кислоти і електроліт, що містить суміш 15 об.% H₃PO₄ і 15 об.% H₂SO₄.

Було виявлено, що при кімнатній температурі (20°C) анодування в ортофосфатній кислоті відбувається при досить високій напрузі на ванні (50-60 В). У цьому електроліті зростаюча оксидна плівка легше розчиняється, ніж в сірчаній кислоті, що призводить до зниження її товщини і збільшення пористості. У той же час початковий безпористого бар'єрний шар оксиду товщі, ніж в плівці, отриманої в розчині сірчаної кислоти, внаслідок чого процес анодного оксидування протікає при більш високій напрузі [28], що вимагає використання спеціального обладнання. Застосування ж електроліту, що містить в своєму складі

суміш сірчаної та ортофосфатної кислот, дозволяє значною мірою знизити напругу до 16-20 В, тобто в 3-4 рази.

Істотний вплив на процес анодування надає робоча температура електроліту. При кімнатній температурі в початковий момент часу напруга різко зростає, що пов'язано з освітою на поверхні металу щільного бар'єрного шару.

Якщо вести анодування при температурі 35-40°C, спостерігається значне зниження напруги на ванні (до 6-9 В) в порівнянні з процесом анодування при кімнатній температурі, що значно знижує енерговитрати.

Однак зниження напруги в розчині ортофосфорної кислоти спостерігається в значно меншому ступені. У цьому випадку воно залишається високим і становить 15-20 В.

Критерієм якісного зчеплення гальванопокриття з алюмінієвої основою є товщина оксидної плівки. Згідно [28], вона повинна становити не менше 3 мкм.

В результаті проведених досліджень було виявлено, що при малих щільності струму (до 1 А / дм²) товщина плівки занадто мала (до 1-1.5 мкм) і не може забезпечити якісного зчеплення гальванопокриття з основою (рисунок 1.5).

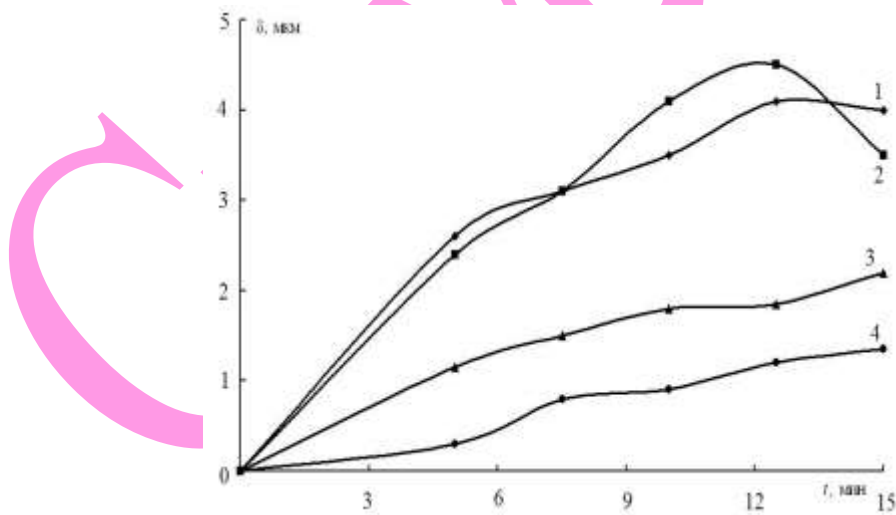


Рисунок 1.5. Залежність товщини оксидної плівки від часу анодування при різних щільності струму в електроліті, що містить суміш кислот при кімнатній температурі: 1 - 2, 2 - 3, 3 - 1, 4 - 0.5 А/дм² [28]

Таким чином, запропонований електроліт, що складається з суміші кислот (сірчаної і ортофосфатної) і підібраний режим роботи (температура, анодна щільність струму і час) дозволяють отримати оксидну плівку необхідної товщини для нанесення якісних гальванопокриття, міцно зчеплених з алюмінієвої основою, без додаткової термообробки.

1.3. Наноструктурування алюмінієвих сплавів

В роботі [30] описується дослідження наноструктурування поверхні алюмінію і ряду алюмінієвих сплавів при електрохімічному оксидуванні в розчинах електролітів (анодування).

В процесі електрохімічного оксидування алюмінію в розчинах електролітів (анодування) часто має місце конкуренція декількох анодних процесів, таких як освіта плівки, розчинення плівки і розчинення металу [31]. Це забезпечує можливість формування анодних оксидів алюмінію (АОА) з широким спектром структурно-морфологічних і електрофізичних характеристик за рахунок зміни складу електроліту і умов процесу анодування. На алюмінії (і в цілому ряді сплавів на його основі) можуть бути отримані як щільні, бар'єрного типу, так і пористі АОА, в тому числі самоорганізовані плівки з регулярно розташованими циліндричними порами нанорозмірного діаметра. Якщо товщина (δ) щільних плівок, як правило, не перевищує 1 мкм, то для пористих АОА вона може становити сотні мікрометрів.

Спектр функціональності пористих оксидних плівок (незважаючи на більш низькі в порівнянні з бар'єрними діелектричні характеристики) дуже широкий: вони застосовуються як захисно-декоративні, електроізоляційні, зносостійкі, антикорозійні покриття, використовуються в мікроелектроніці, оптиці, мембранної техніки, різних датчиках.

У ряді випадків формування пористих оксидних плівок застосовується для створення підшарів, що забезпечують поліпшену адгезію при подальшій обробці (нанесенні лакофарбових, деяких гальванічних покриттів і ін.). так, наприклад, отримання гальванічних покриттів високої якості на алюмінії досягається при

використанні попереднього анодування алюмінію в розчині фосфорної або азотної кислоти [31].

Слід зазначити, що електрохімічні процеси при формуванні наноструктурованих анодно-оксидних плівок на алюмінії і його сплавах здійснюються з використанням слабких, нетоксичних електролітів при більш низьких температурах і нормальному тиску, ніж технологічні процеси отримання керамічних покриттів, що визначає значно менші енерговитрати і більш високу ступінь екологічності.

Анодування алюмінію і його сплавів в широкому діапазоні умов (так зване традиційне анодування) [32] призводить до формування пористих анодних оксидів алюмінію (ПАОА), будова яких помітно відрізняється від ідеальної моделі типу «бджолиних сот». Як видно з фотографій поверхні бар'єрного (рисунок 1.6, а) і пористого (рисунок 1.6, б) шарів ПАОА, сформованого таким способом в 3% $C_2H_2O_4$, осередки мають неправильну форму, а їх взаємне розташування відхиляється від ідеально гексагонального.

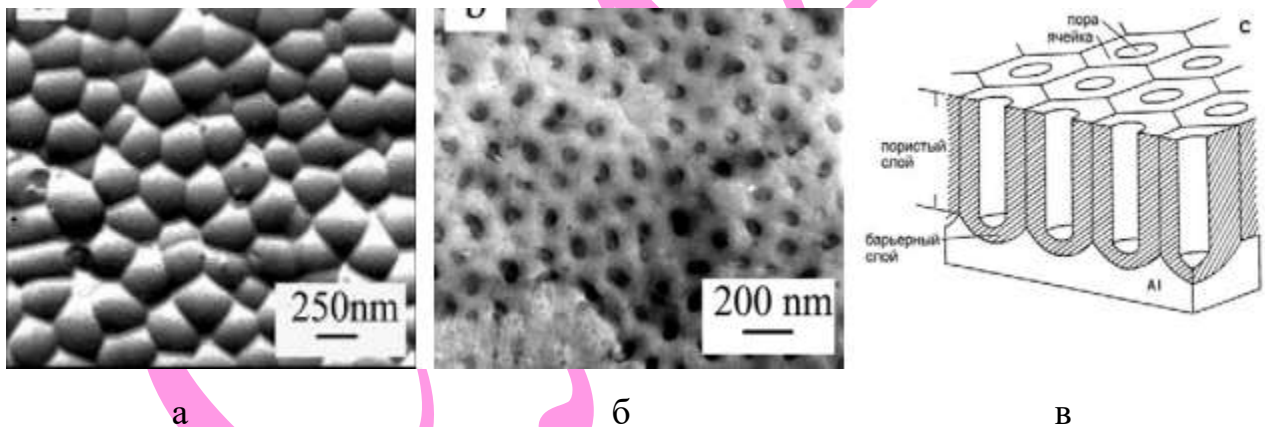


Рисунок 1.6. Фотографії реплік поверхні пористого (а) і бар'єрного (б) шарів оксидної плівки, сформованої при анодуванні алюмінію в 3% $C_2H_2O_4$. Схематичне зображення будови ПАОА (в) [30]

При термічних впливах відбувається кристалізація аморфного оксиду [33].

В процесі термічної кристалізації ПАОА утворюються багатофазні полікристалічні окисні плівки, що, мабуть, обумовлено різними значеннями швидкості фазових перетворень областей чистого аморфного Al_2O_3 і матеріалу

оксиду, збагаченого аніонами електроліту [34]. При цьому необхідно зазначити, що аж до відпалу при тисячу двісті двадцять три К морфологічні зміни в ПАОА не відбуваються, і зберігається регулярна комірчато-пориста структура [34]. Порушення в періодичності розташування відзначаються лише при більш високій температурі відпалу.

Пролонговане анодування зазвичай проводиться при низькій температурі, обов'язковому перемішуванні електроліту, тривалому часу анодування (2-4 дні) і, відповідно, характеризується повільною швидкістю зростання оксидної плівки (1-2 мкм / год) [35].

Методика багатоступінчастого анодування, як правило, включає два ступені, передбачає первинне анодування алюмінію в обраному електроліті з наступним видаленням оксидної плівки, а потім повторне анодування в тому ж електроліті [36]. При цьому на першому етапі утворюється пориста плівка з аморфної мезоструктур. Після видалення оксиду на поверхні металу залишається нанорозмірний рельєф, який забезпечує більш високу ступінь порядку в розташуванні осередків / добу на другому етапі анодування, приводячи до формування ПАОА з полікристалічної мезоструктур. Згідно з дослідженнями [36], розмір домену визначається тривалістю процесу анодування на першій стадії. В роботі [37] експериментально було встановлено, що для досить малого часу анодування (до 5 годин) зв'язок між площею домену і тривалістю першого ступеня має вид $S_d \sim 0.55 \cdot t_a$. Пояснень емпіричної залежності автори не представили. До безперечних достоїнств методики ДСА слід віднести простоту і дешевизну технології та апаратного оформлення, відсутність необхідності створення шаблонів для текстуровання анодуємої поверхні, а так само незначний час формування високо впорядкованих ПАОА.

Причини і механізм формування доменної мезоструктури пористих АОА, отриманих в умовах самоорганізованого зростання, до сих пір точно не з'ясовані. Прийнято вважати, що вона, швидше за все, обумовлена особливостями будови поверхні анодуемого металу [38]. Необхідно відзначити, що лінійні розміри доменів приблизно в 100 разів менше, ніж зерен металу. Відповідно до цього,

висувається припущення, що доменна структура оксиду пов'язана з розподілом дислокацій або інших дефектів металу. Проте, прямих доказів цього факту досі не отримано.

До теперішнього часу розроблений ряд ефективних методів створення наноструктур, в їх числі методи, засновані на принципі самоформування [39]. Методи самоформування включають агрегацію наночастинок в структури з заданою формою і розміром. Одним із прийнятних матеріалів для створення наноструктур на основі самоформування є пористий оксид алюмінію. Відмітна його особливість - потенційна можливість його синтезу з високим ступенем впорядкованості структури. Це вкрай важливо, так як в упорядкованих структурах здійснюється можливість дослідження фізичних властивостей окремих нанoeлементів на основі вивчення властивостей масиву таких нанoeлементів. Впорядковані наноструктури мають важливе практичне застосування. Наприклад, інтеграція нанoeлементів в сучасні інтегральні схеми можлива тільки при використанні ансамблів ідентичних нанoeлементів.

Технологія отримання пористого оксиду алюмінію відома досить давно [40]. Однак дослідники безперервно розвивають методи синтезу пористого оксиду алюмінію і розробляють досконаліші технології, що забезпечують отримання оксиду алюмінію з підвищеним ступенем впорядкованості структури.

До теперішнього часу розроблений ряд методів самовпорядкування шарів пористого оксиду алюмінію. Так, в [41] розглянуто метод наноімпрінтинга, що полягає в створенні на поверхні алюмінію відбитка з використанням матриці, літографічно виготовленої на основі SiC, і подальшому анодуванню алюмінію. При цьому управління періодом наноструктури у оксиду алюмінію здійснюється за допомогою вибору періоду малюнка на матриці. Авторами продемонстрована можливість створення ідеально впорядкованих масивів пір діаметром 100, 150 і 200 нм. В роботі [42] запропонований метод створення штучного нанорельєфу скануючим зондовим мікроскопом. За допомогою зонда попередньо в алюмінії формують масив впорядковано розташованих нанорозмірних ямок. Далі проводять анодне окислення цієї галузі. Авторами показана можливість створення

упорядкованих шарів анодного оксиду алюмінію з розмірами пор від 100 до 400 нм. Однак перерахованих методів досить складні і прецизійні.

Одним з методів синтезу пористого анодного оксиду алюмінію, що характеризуються відносно простою технологією, є анодування товстих підкладок алюмінію [40]. Даний метод заснований на попередньому вирощуванні «жертвовного» пористого оксиду товщиною близько 100 мкм. Показано, що в міру збільшення товщини зростаючого оксиду випадкове розташування пір перетворюється в упорядковану структуру. Після селективного видалення «жертвовного» шару оксиду поверхню алюмінію успадковує упорядкований рельєф оксиду алюмінію. Подальше анодування алюмінію з таким рельєфом призводить до формування оксиду з високим ступенем впорядкованості.

Практичне значення мають шари пористого оксиду алюмінію, отримані анодуванням тонких шарів алюмінію, нанесених на підкладки. Однак з використанням відомих режимів анодування в таких структурах не вдається отримати оксид алюмінію з високим ступенем впорядкованості структури.

Пористий оксид алюмінію можна представити у вигляді щільно упакованих гексагональних осередків, кожна з яких містить в центрі пору. Механізм утворення пористої структури оксиду такий, що пора завжди відокремлена від нижчого шару алюмінію бар'єрною оксидною плівкою.

Будова пористого оксиду алюмінію можна охарактеризувати наступними геометричними параметрами [43]:

- розмір оксидної осередки (період пористої структури), який представляє собою діаметр кола, вписаного в шестикутну проекцію осередку;
- діаметр пори;
- товщина бар'єрного шару;
- товщина пористого шару.

В роботі [44] розглянуто вивчення процесу формування прозорої наноструктурованої сітки алюмінію методом анодування тонкого шару алюмінію з наступним хімічним видаленням пористого оксидного шару.

Процес формування пористого оксиду алюмінію здійснювали за допомогою електрохімічної установки, що включає двоелектродний електрохімічний осередок з графітовим катодом, джерело постійного струму марки DC POWER SUPPLY HY3020, термостат 5OK-20/0 05CI-03 і універсального мультиметра. В якості анода використовували скляні пластини розміром 1×2 см з шаром алюмінію товщиною 1 мкм, нанесеного на поверхню методом магнетронного напилення. Анодування зразків здійснювали в 0,3 М розчині шавлевої кислоти при температурі від 4 до 20 °С і напрузі від 30 до 80 В.

Сформований анодний оксид алюмінію піддавався ступінчатому розчиненню в розчині, що містить, г / л: CrO_3 - 18; H_3PO_4 - 60 ($\rho = 1,69$ г / см³) при температурі 80 °С, до встановлення постійної маси зразків. Тривалість кожного ступеня травлення становила 15-20 с.

Дані хромоамперометрії вказують на те що залежно сили струму від тривалості анодування містять два піки. Перший пік пов'язаний із розвитком поверхні Al при анодуванні в результаті формування шару бар'єрного оксиду алюмінію при анодній поляризації електрода.

З ростом товщини бар'єрного анодно-оксидного шару збільшується електроопір анода, що викликає падіння струму в ході анодування. При цьому посилюється процес виділення джоулевого тепла, що викликає локальний розігрів тонкого шару алюмінію і збільшує швидкість хімічного розчинення оксиду алюмінію в шавлевій кислоті.

Підвищення напруги анодування з 50 до 60 В зменшує висоту першого піку, що пов'язано з підвищеною швидкістю анодного розчинення алюмінію на початковій стадії анодування при формуванні бар'єрного шару і самоструктуризації пористого оксидного шару. Подальше підвищення напруги анодування до 80 В і температури до 15°C призводить до зникнення другого піку на хроноампераграмах, що можливо при відсутності локального нагріву тонкого шару провідника на завершальній стадії анодування, і призводить до формування однорідної пористої матриці.

Електрономікроскопічні дослідження шарів пористого оксиду алюмінію показали, що з ростом температури анодування від 10 до 15 ° С спостерігається збільшення середнього діаметра пір з 98 до 213 нм і зменшення їх полідисперсності, це пов'язано з впливом процесу хімічного розчинення оксиду алюмінію в щавлевої кислоти.

За допомогою профелометричних вимірювань встановлено, що наноструктурування алюмінієві плівки, отримані після травлення анодного оксиду алюмінію, характеризуються шорсткістю $Rz = 70,6$ нм, і максимальна глибина проникнення алмазного щупа - 30 нм.

Спектрофотометричним методом встановлено, що отримані наноструктуровані плівки алюмінію забезпечують оптичне пропускання у видимій області спектра на рівні 40-70%. Найбільше оптичне пропускання спостерігається для плівок, отриманих при використанні анодування алюмінію в 0,3 М розчині щавлевої кислоти при напрузі 80 В і температурі 10 ° С. Показано, що зменшення напруги з 80 до 50 В проводить до істотного зниження проникної здатності зразків, це може бути пов'язано з розупорядкуванням профільованої алюмінієвої структури [44].

1.4. Електроіскрове легування робочих поверхонь деталей з алюмінієвих сплавів

В даний час з усіх перерахованих методів поверхневого зміцнення по ряду параметрів найефективнішим є електроіскрове легування, яке дозволяє отримувати на поверхні алюмінієвих деталей покриття з різних матеріалів досить простим способом, як в технологічному відношенні, так і в апаратній оформленні, що є його великою перевагою.

Процес електроіскрового легування заснований на переважному руйнуванні (ерозії) матеріалу анода при іскровому розряді [45]. Основні закономірності та явища, що визначають процеси ЕІЛ, залежать від матеріалу легувального електрода й режимів обробки. Іншими істотними перевагами електроіскрового легування є: висока адгезія покриття з основою, можливість локальної обробки

поверхні, відсутність необхідності в попередній підготовці поверхні і екологічність процесу. Висока адгезія покриття, отриманого методом електроіскрового легування, до підкладки пояснюється тим, що електроіскрове легування – процес дифузійний, тобто атоми покриття дифундують в підкладку і відрив покриття від підкладки практично неможливий.

Однак спосіб електроіскрового легування, як і інші способи зміцнення, має недоліки, які обмежують область його застосування [45]:

- висока шорсткість поверхні ($Ra \approx 20\text{мкм}$);
- мала товщина одержуваного покриття ($t \leq 0,2\text{ мм}$).

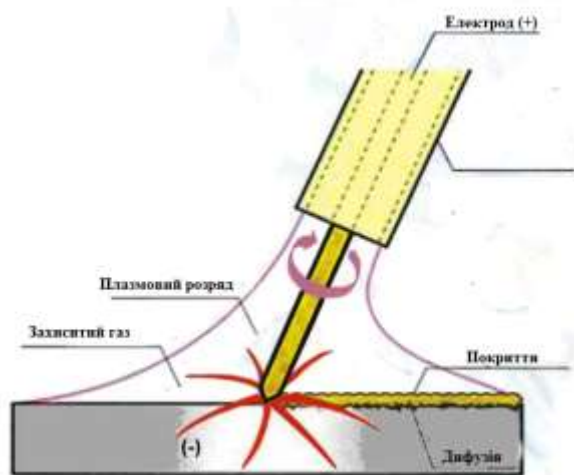


Рисунок 1.7. Схема нанесення електрода на поверхню металу [45]

Шорсткість покриття можна знизити механічною обробкою: шліфуванням, поліруванням, розкочуванням, алмазним вигладжуванням і т.д.

Останнім часом збільшується кількість досліджень, присвячених отриманню на поверхнях за допомогою електроіскрового легування нанопокриттів або наноструктурування їх поверхонь [46], що дозволяє значно поліпшити фізико-механічні властивості поверхні деталей. Поява наноструктур і нанокристалів в поверхневому шарі покриття на сталі дозволяє збільшити зносостійкість сталевих деталей на порядок. У зв'язку з цим можна припустити, що формування покриттів за участю наночастинок на алюмінієві деталі призведе до значного підвищення їх зносостійкості [47].

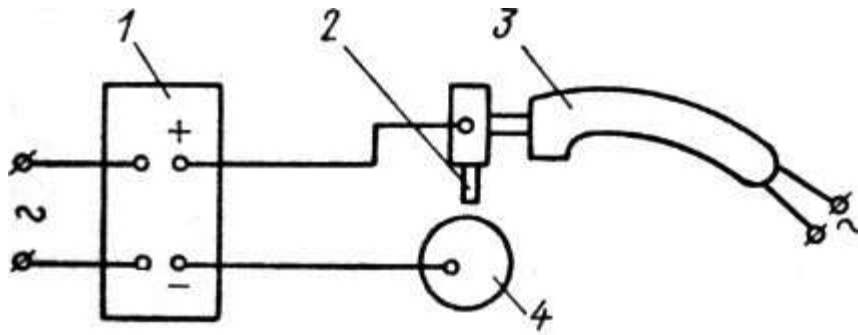


Рисунок 1.8. Схема установки електроіскрового легування [47],
де: 1 – генератор імпульсів; 2 – легуючий електрод; 3 – електромагнітний
вібратор; 4 – легуючий матеріал

У набагато меншому ступені досліджено процес отримання нанопокриттів і наноструктурування поверхні алюмінієвих сплавів, зокрема, алюмінієво-мідних сплавів типу дюралюміна, які широко застосовуються в промисловості. В основному ведуться дослідження властивостей поверхневих шарів алюмінієвих сплавів при введенні в них нанопорошків способом електроіскрового легування. При електроіскровому легуванні поверхні литих деталей з алюмінієво – кремнієвих сплавів (АК12, АК9) із застосуванням в електродах ультрадисперсних порошків отримані позитивні результати: твердість поверхні збільшилася в два рази, а її зносостійкість – у три рази [48]. Однак при цьому слід враховувати значне подорожчання технології, так як сам процес отримання ультрадисперсних порошків з тугоплавких сполук є досить трудомістким і дорогим.

Питання отримання зносостійкого покриття на алюмінієвих сплавах за допомогою електроіскрового легування є виключно важливим, так як дозволяє відкрити нові можливості для застосування цих сплавів у вузлах тертя з використанням покриття отриманого методом електроіскрового легування і розширити сферу їх застосування в машинобудуванні.

У статті [49] проаналізовано сучасний стан застосування методів нанесення покриттів на алюмінієві сплави. Визначено зміни в структурі локальних зон і мікротвердості після процесу легування сплаву АЛ25

перехідними металами. Показано, що легування перехідними металами дає змогу в більш, ніж у три рази підвищити твердість вихідного матеріалу.

Сучасний етап розвитку техніки характеризується посиленням експлуатаційних параметрів, інтенсифікацією виробничих процесів, різким збільшенням потужностей машин і агрегатів. Усе це потребує створення нових матеріалів та захисних покриттів із заданими властивостями і, в першу чергу, для вузлів тертя, тому що переважна більшість машин і механізмів виходять з ладу внаслідок втрати працездатності вузлів тертя. У зв'язку з тим, що алюмінієві сплави знаходять все більше застосування в конструкціях вузлів тертя, оскільки вони володіють високою питомою міцністю, але недостатньою зносостійкістю, то розробка методів нанесення триботехнічних покриттів на їх робочі поверхні, є актуальною.

До нового покоління матеріалів для нанесення зносо- та корозійностійких покриттів належить композиційна кераміка $Zr-B-Si-Y$ і $Al-Zr-Si-O$, що відрізняється утворенням високотемпературних поліоксидних структур у складі як окалини, так і вторинних плівок у зоні трибоконтакту, що забезпечують високий рівень службових характеристик при температурах менше $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ [49]. Дослідження електроіскрових і лазерноелектроіскрових покриттів на сплаві АЛ25 з використанням як електродів із композиційної кераміки показали високу зносостійкість покриттів.

Робота [50] присвячена дослідженню мікротвердості і зносостійкості алюмінієвого сплаву (АК5М7) після обробки його поверхні електроіскровим легуванням (ЕІЛ) електродами А (Cu) і Р (Cu + P) з різною прикладеною енергією. Дослідженнями встановлено, що при використанні обох видів електродів зі збільшенням енергії зростають мікротвердість і зносостійкість. Зразок був модифікований електродом Р з енергією 0,79 Дж. У цьому випадку максимальне значення мікротвердості збільшилася в 5,3 рази, зносостійкості - в 1,6 рази. Показано, що при ЕІЛ на поверхні досліджуваного сплаву утворюються нові інтерметалідні фази Al_2Cu і Cu_3P . Якщо значення використовуваної енергії максимально (0,79 Дж), то концентрація фази Al_2Cu збільшується в 5 і 9 разів з

електродами А і Р відповідно, а концентрація фази Cu_3P збільшується більш ніж в 4 рази при використанні електрода Р. Отримані експериментальні дані свідчать про зменшення розмірів ОКР та збільшенні значень мікродеформації для всіх наявних на поверхні фаз Al, Al_2Cu і Cu_3P . Збільшення енергії при ЕІЛ призводить до підвищення дефектності і зміни фазового складу знову отриманих

Отже, отримані результати свідчать про ефективність ЕІЛ поверхні сплаву АК5М7 різними електродами і з різною енергією. Поверхні, отримані таким методом, зношуються менше.

СУМДУ

Висновки

В першому розділі розглянута класифікація алюмінієвих сплавів, їх властивості та застосування у промисловості. Встановлено, що основними перевагами алюмінію та сплавів на його основі, є висока міцність, мала густина, порівняно невисока вартість, а також легкість отримання і обробки. З метою підвищення зносостійкості деталей з алюмінієвих сплав застосовують поверхневу обробку.

Розглянуті методи модифікування поверхні алюмінієвих сплавів – зміцнення поверхонь іонною імплантацією киснем, електроіскровим легуванням, іонно-плазмовим напиленням, мікродуговим оксидуванням, анодуванням. У даний час з усіх розглянутих методів поверхневого зміцнення за рядом параметрів, найефективнішим є електроіскрове легування, яке дозволяє отримувати на поверхні алюмінієвих деталей покриття з різних матеріалів досить простим способом, як в технологічному відношенні, так і в апаратному оформленні. Процес електроіскрового легування заснований на переважному руйнуванні (ерозії) матеріалу анода при іскровому розряді. Перевагами електроіскрового легування є: висока адгезія покриття з основою, можливість локальної обробки поверхні, відсутність необхідності в попередній підготовці поверхні й екологічність процесу. Висока адгезія покриття, отриманого методом електроіскрового легування, до підкладки пояснюється тим, що електроіскрове легування – процес дифузійний, тобто атоми покриття дифундують в підкладку і відрив покриття від підкладки практично неможливий.

Представлений аналіз літературних джерел щодо можливості формування наночасток у покриттях, отриманих різними методами. Показано, що при ЕІЛ можливе явище наноструктурування покриття. Актуальним є дослідження впливу енергетичних параметрів ЕІЛ і електродних матеріалів на формування структури та фазового складу покриття.

РОЗДІЛ 2

УСТАТКУВАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Устаткування для електроіскрового легування

Для проведення досліджень використовувалися установки для нанесення покриттів в ручному режимі

Приладом для електроіскрової обробки служила установка ALIER-31 (фірма SCINTI, Молдова)



Рисунок 2.1. Установка для електроіскрового легування ALIER31

Таблиця 2.1.

Параметри покриття, одержуваного на установці ALIER-31 [51]

Режим	Товщина покриття, мм	Шорховатість покриття, R_a , мкм	Продуктивність, $\text{см}^2/\text{хв}$
1	0,01	3	6,0
2	0,03	10	6,0
3	0,05	20	6,0
4	0,07	30	6,0
5	0,09	40	6,0
6	0,12	50	6,0
7	0,2	100	6,0

Установка ALIER-31 для електроіскрового легування має потужність - $W = 0,25$ кВт - і призначена для формування електроіскрових покриттів

самих різних видів [51] Незважаючи на невелику потужність, установка має широкі технологічні можливості (таблиця 2.1).

Особливістю цієї установки є компактність, малі габарити, невелика споживана потужність, але при цьому широкий діапазон регулювання параметрів: енергії і частоти імпульсів, а також амплітуди вібрації.

Іншою особливістю установки є те, що частота генеруючих імпульсів безпосередньо не пов'язана з частотою вібрації обробного електрода, а задається незалежно. При цьому частота залежить від енергії в імпульсі [52].

2.2. Методика отримання обробних електродів і виготовлення технологічних зразків

В якості обробних електродів використовувалися стрижні діаметром від $2 \cdot 10^{-3}$ м до $8 \cdot 10^{-3}$ м і довжиною $50 \cdot 10^{-3}$ м, відлиті з антифрикційного сплаву Al-Sn (AO20-1).

При ручному нанесенні покриттів на зразки з алюмінієвого сплаву використовувалася наступна технологія:

- для забезпечення однаковості і однакових умов проведення процесу електроіскрового легування технологічні зразки застосовувалися тільки одного розміру і не проходили ніякої спеціальної підготовки поверхні (мийки, знежирення і т.д.);
- швидкість переміщення обробного електрода вибиралася такою, щоб загальний час обробки становило ~ 4 хв / зразок;
- електрод тримався перпендикулярно по відношенню до оброблюваної поверхні. Допускався нахил не більше $10 - 15^\circ$;
- робоча частина електрода мала форму конуса з радіусом при вершині $2 - 4 \times 10^{-3}$ м .;
- при зношуванні кінця електрода форма періодично відновлювалася шляхом його виправлення;

- швидкість переміщення електрода підтримувалася рівномірною. Покриття наносилося смугами. Оброблюючий електрод переміщався вручну круговими рухами з перекриттям попередніх шарів на 0,25 величини смуги;

- електрод під час руху не відривався від оброблюваної поверхні від початку обробки методом електроіскрового легування і до кінця. Це було необхідно, тому що при відриві обробного електрода від зразка виникає сильне іскріння, що приводить до місцевої ерозії оброблюваної поверхні (у вигляді лунки), і до зміни параметрів приросту (або виносу) як технологічного зразка, так і обробного електрода;

- при нанесенні покриття вручну використовувався тільки віброуючий електрод з постійною частотою вібрації (~ 100 Гц);

- покриття наносилося на широкую поверхню технологічного зразка.

Після нанесення покриття ребра віддалялися вручну шляхом обпилювання;

При ручному нанесенні покриттів стабільні параметри зберегти важко, так як швидкість переміщення обробного електрода по поверхні зразка, зусилля притиску його до зразка, розмір перекриття слідів нанесеного шару задаються оператором і можуть значно коливатися (спрацьовує «людський фактор»). В таких умовах важливі параметри технологічного процесу стають погано контрольованими.

Електроіскрове легування технологічних зразків проводили в звичайній атмосфері.

Отримання покриттів методом електроіскрового легування в ручному режимі для випробувань на зносостійкість здійснювали двома методами. Згідно з одним методом нанесення покриття виробляли послідовно по 0,25 частини технологічного зразка протягом 1 хв, тобто загальний час нанесення покриття на зразок становило 4 хв. За другим методом покриття наносилося відразу на всю поверхню зразка протягом 1

хв, але потім поверх першого шару наносилася ще 3, тобто загальний час нанесення покриття на весь зразок становило теж 4 хв.

2.3. Макроскопічний аналіз

Макроскопічний аналіз полягає у вивченні будови металу шляхом перегляду його зламу або спеціально підготовленій поверхні (макрошліфів) неозброєним оком або при невеликих збільшеннях - до 30 разів [53].

Макроаналіз дозволяє оцінити якість матеріалу, виявити наявність у ньому макродефектів, характер його попередньої обробки (лиття, обробка тиском, різання, зварювання, наплавлення, термічна і хіміко-термічна обробка та ін.), структурну і хімічну неоднорідність, волокнистість, причини і характер руйнації. Структура матеріалів, що спостерігається неозброєним оком або при невеликих збільшеннях, називається макроструктурою. Її можна зафіксувати фотознімком або рисунком [53].

За допомогою макроаналізу можна дати загальну оцінку стану великих поверхонь матеріалу або деталі в цілому і вибрати невеликі найбільш важливі та типові ділянки для подальшого поглибленого вивчення. Макроаналіз проводять шляхом вивчення зламів, макрошліфів або зовнішніх поверхонь заготовок і деталей [54].

Зовнішні, або поверхневі, макродефекти розташовані безпосередньо на поверхні виробів. Якщо вироби отримані методом лиття, то на їх поверхні найбільш часто зустрічаються такі дефекти:

- пригар, що у вигляді твердої і важко відокремлюваної кірочки утворюється на поверхні вилівка як результат фізичної або хімічної взаємодії металу, формової суміші та шлаку;
- усадочні пустоти (раковини, пори), що утворюються в результаті усадки металу (зменшення об'єму) при його твердненні;

- газові раковини (бульбашки), які з'являються в металі під час його кристалізації внаслідок як значної газомісткості самого металу, так і проникнення в метал газів, які виділяються з ливарної форми;
- ужимини – порожнини, заповнені формувальним матеріалом;
- тріщини, що з'являються як результат високих напружень у виливках через опір форми їх усадці (неподатливості форми), а також неоднакових швидкостей охолодження різних частин литої заготовки;
- неметалеві включення, що утворюються в результаті взаємодії компонентів сплаву, наприклад заліза, із розчиненими в ньому киснем, сіркою, азотом та внаслідок попадання шлаку і формової суміші при руйнуванні форми [54].

2.4. Мікроскопічний аналіз

Мікроскопічний аналіз (мікроаналіз) металів і сплавів полягає в дослідженні будови (мікроструктури) металу за допомогою оптичного (при збільшенні від 50 до 1500 разів) або електронного (при збільшенні до 100000 разів) мікроскопа [54]. Між мікроструктурою металів та їх властивостями існує чіткий зв'язок. Мікроаналіз дозволяє визначити форму і розміри окремих зерен і фаз, а також їх вміст, відносно розташування, виявити наявність у металі включень, мікрodefektів і судити про властивості металів і сплавів, про попередню обробку цих матеріалів (лиття, деформування, термічна обробка). Мікроаналізу піддають спеціально підготовлені зразки, які називають мікрошліфами.

Вивчення структури металу проводять за допомогою мікроскопа у відбитому світлі. Зразок металу ретельно обробляють під площину на металорізальному верстаті, шліфують і полірують. Після такої підготовки він відбиває промені як дзеркало.

Дослідження і фотографування мікроструктури проводять за допомогою спеціального стаціонарного металографічного мікроскопа.

Одним з основних приладів для дослідження структури металів є металографічний мікроскоп – МИМ-7.

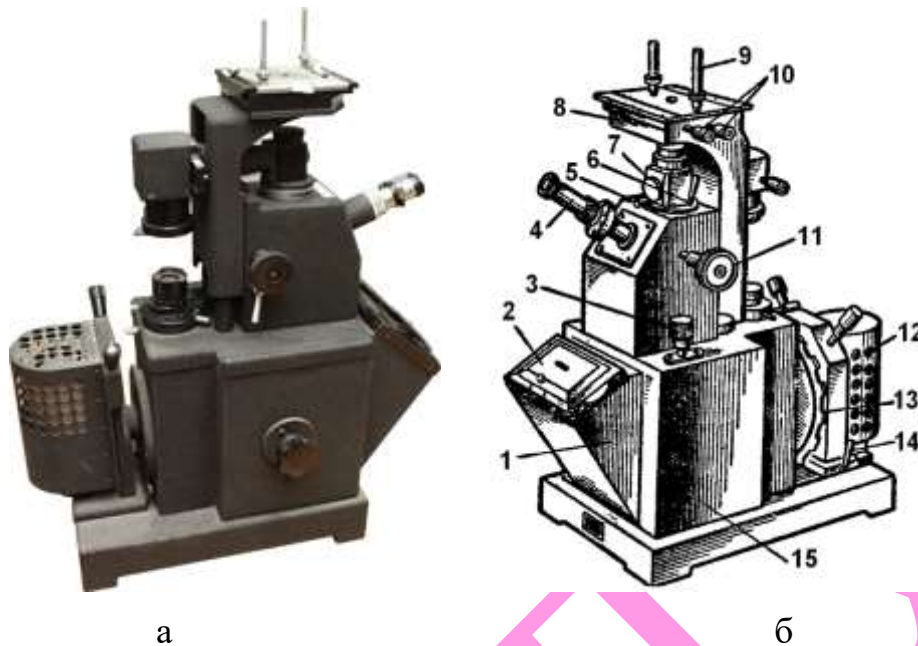


Рисунок 2.2. Загальний вигляд мікроскопа МИМ-7 [55]:

а – фото; б – схема: 1 – фотокамера; 2 – касета з матовим склом; 3 – мікрометричний гвинт подачі об'єктива; 4 – окуляр; 5 – аналізатор, що вставлений у паз під корпус ілюмінатора; 6 – рукоятка діафрагми темного поля; 7 – ілюмінатор; 8 – предметний столик; 9 – клєми для фіксації мікрошліфа; 10 – гвинти для переміщення предметного столика; 11 – гвинт грубої подачі предметного столика; 12 – джерело світла (освітлювач); 13 – диск з набором світлофільтрів; 14 – рукоятка, що закріплює джерело світла; 15 – корпус приладу

Крім оптичної мікроскопії, для виявлення більш тонких структур використовувалася електронна мікроскопія. Аналіз проводився за допомогою скануючого електронного мікроскопа TESCAN з приставкою для елементного аналізу поверхні INCA Energy EDX (Oxford, Велика Британія). За допомогою електронної мікроскопії проводився морфологічний аналіз поверхні електродів-анодів і електродів-катодів, як до електроіскрової обробки, так і після. Крім того, за допомогою

електронної мікроскопії вивчалася поява в структурі мікродісперсних частинок, їх розташування і склад.

2.4. Рентгеноструктурний аналіз

Рентгеноструктурний аналіз – це метод дослідження будови тіл, що використовує явище дифракції рентгенівських променів, а також структури речовини з розподілу в просторі та інтенсивністю розсіяного на аналізованому об'єкті рентгенівського випромінювання [56].

Дифракційна картина залежить від довжини хвилі використаних рентгенівських променів і будови об'єкта. Для дослідження атомної структури застосовують випромінювання з довжиною хвилі порядку розмірів атома. Рентгеноструктурний аналіз є основним методом визначення структури кристалічних об'єктів та плівок. Це обумовлено тим, що кристали мають сувору періодичність будови і представляють собою створеною самою природою дифракційні ґрати для рентгенівських променів.

Однак він дає цінну інформацію і при дослідженні тіл з менш впорядкованою структурою, таких, як рідини, аморфні тіла, рідкі кристали, полімери тощо. На основі численних розшифрованих атомних структур може бути вирішене і зворотне завдання: за рентгенограмою полікристалічної речовини можливо встановити кристалічний склад речовини, тобто виконати фазовий аналіз. Рентгеноструктурний аналіз дозволяє об'єктивно встановлювати структуру кристалічних речовин, в тому числі таких складних, як вітаміни, антибіотики, координаційні сполуки тощо. Повне структурне дослідження кристала часто дозволяє вирішити й чисто хімічні задачі, наприклад встановлення або уточнення хімічної формули, типу зв'язку, молекулярної ваги при відомій щільності або щільності при відомій молекулярній вазі, симетрії та конфігурації молекул і молекулярних іонів. Рентгеноструктурний аналіз з успіхом застосовується для вивчення кристалічного стану полімерів [57]. Цінну

інформацію дає рентгеноструктурний аналіз і при дослідженні аморфних і рідких тіл.

2.5. Вимірювання твердості

Твердість алюмінію та сплавів на його основі зазвичай вимірюють за методом Брінеля [58].

Метод Брінеля – один з основних методів визначення твердості. Визначення твердості за методом Брінеля здійснюється вдавнення металевої кульки певного діаметра в випробуваний зразок під дією заданого навантаження протягом певного часу.

Цей метод запропонував шведський інженер Юхан Август Брінелль (1849-1925) в 1900 році. Метод Брінеля став першим широко використовуваним і стандартизованим методом визначення твердості в матеріалознавстві.

Число твердості по Брінеллю визначається як середній тиск сферичної поверхні відбитка сталевий кульки і обчислюється за формулою:

$$HB = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.1)$$

де: P – прикладене навантаження;

D – діаметр кульки, мм;

d – діаметр відбитку, мм.



Рисунок 2.3. Твердомір для вимірювання вердості за методом Брінелля [58]

Випробування проводиться наступним чином:

- спочатку зразок підводять до індентора;
- потім вдавлюють індентор в зразок з плавно наростаючим навантаженням протягом 2-8 секунд;
- після досягнення максимальної величини, навантаження на індентор витримується в певному інтервалі часу;
- потім знімають прикладене навантаження, відводять зразок від індентора і вимірюють діаметр отриманого відбитка.

В якості індентора використовуються кульки з твердого сплаву діаметром 1; 2; 2.5; 5 і 10 мм. Величину навантаження і діаметр кульки вибирають в залежності від досліджуваного матеріалу [58].

Висновки

У другому розділі роботи проведений вибір матеріалу та устаткування для проведення електроіскрового легування. Розгляна методику отримання електродів та технологічних зразків.

Методами дослідження зразків обрано мікро- і макро аналіз, рентгеноструктурний аналіз та визначення твердості.

Макроскопічний аналіз полягає у вивченні будови металу шляхом перегляду його зламу або спеціально підготовленій поверхні неозброєним оком або при невеликих збільшеннях - до 30 разів. Макроаналіз дозволяє оцінити якість матеріалу, виявити наявність у ньому макродефектів, характер його попередньої обробки, структурну і хімічну неоднорідність, волокнистість, причини і характер руйнації.

Вивчення структури металу проводять за допомогою мікроскопа у відбитому світлі. Одним з основних приладів для дослідження структури металів є металографічний мікроскоп – МИМ-7.

Рентгеноструктурний аналіз являє собою метод дослідження будови тіл, що використовує явище дифракції рентгенівських променів, а також структури речовини з розподілу в просторі та інтенсивністю розсіяного на аналізованому об'єкті рентгенівського випромінювання.

Твердість алюмінію та сплавів на його основі зазвичай вимірюють за методом Бріннеля. Визначення твердості за методом Брінелля здійснюється вдавленням металевої кульки певного діаметра в випробуваний зразок під дією заданого навантаження протягом певного часу.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

З метою визначення закономірностей отримання покриттів на алюмінієвих сплавах за допомогою електроіскрового легування обробними електродами зі сплаву Al-Sn було проведено ряд експериментів зі змінними параметрами роботи установки ALIER-31: режимами роботи (1 - 7), амплітудою вібрації (0,2 - 1) , коефіцієнтом енергії (0,1 - 1,0). Нанесення покриття здійснювалося в ручному режимі при зміні швидкості переміщення обробного електрода щодо зразка від $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $2,0 \cdot 10^{-3}$ м / сек.

3.1 Отримання покриттів на сплавах Д1 при електроіскровому легуванні в ручному режимі.

Результати експериментів з нанесення покриттів в ручному режимі наведено в таблицях 3.1 - 3.7 і на рисунках 3.1 - 3.3.

3.1.1 Ефекти переносу маси.

Результати першої серії випробувань з нанесення покриття зі сплаву Al-Sn на сплав Д1 наведені в таблиці 3.1.

Досліди показали, що приріст зразків забезпечується тільки на 6 і 7 режимах роботи установки. З 1 по 5 режим відбувається зміна поверхні - з'являються лунки, змінюється колір зі світлого на сірий, збільшується шорсткість, відбувається модифікування поверхні. Відбувається спад як електрода так і зразка.

Зі збільшенням енергії імпульсу (з 1 по 4 режим) збільшується винесення матеріалу електрода в 27 разів, у той час як винесення матеріалу зразка збільшився всього лише в 2 рази. Це говорить про те, що матеріал електрода переноситься на зразок, але винесення матеріалу зразка перевершує приріст від матеріалу електрода. Особливо сильно

відбувається приріст зразка при переході від 6 до 7 режиму (майже на 100%), в той час як збільшення виносу електрода становить 17%. Після невеликого часу роботи установки було виявлено, що робочий кінець електрода покривається чорним нальотом. За припущенням, це окис олова, так як з усіх з'єднань, що беруть участь в процесі перенесення речовин, тільки SnO₂ має чорний колір.

Таблиця 3.1

Результати дослідів з перенесення речовини Al-Sn з електрода на алюмінієву підкладку зі сплаву Д1 при електроіскровому легуванні на установці ALIER-31

Номер зразку	Умови електроіскрового легування			Вага зразків, г.		Зміна ваги зразку, г	Вага електрода, г.		Зміна ваги електрода	Коефіцієнт переносу $K = \Delta m_{el} / \Delta m_{zr} $
	режим	амплітуда	Час обробки	До покриття	Після покриття		До покриття	Після покриття		
1	1	0,5	60	3,4405	3,4385	-0,0020	6,9901	6,9900	-0,0001	0,0500
2	2	0,5	60	3,4810	3,4774	-0,0036	6,9901	6,9900	-0,0002	0,0555
3	3	0,5	60	3,2060	3,2000	-0,0060	7,2528	7,2501	-0,0027	0,4500
4	4	0,5	60	3,4010	3,3970	-0,0040	6,9900	6,9873	-0,0027	0,6750
5	5	0,5	60	3,6425	3,6441	+0,0016	7,2501	7,2467	-0,0033	2,0635
6	6	0,5	60	3,1075	3,1096	+0,0021	7,2467	7,2384	-0,0083	3,9524
7	7	0,5	60	3,3750	3,3852	+0,0102	7,2384	7,2287	-0,0097	0,9510

За результатами випробувань можна зробити наступні висновки:

– на четвертому режимі роботи установки ALIER-31 у всіх чотирьох зразків спостерігається спад ваги від 0,001 до 0,011 г. ;

– поява чорного нальоту на електроді ніяк не позначається на прирості зразка;

– спад електрода також залишається однаковою, незалежно від наявності або відсутності чорного нальоту.

З огляду на більш рівномірний, з низькою шорсткістю, характер покриття зразків, одержуваний на 6 режимі роботи установки, а також досить товстий шар покриття при використанні коефіцієнта енергії 0,8 - 1,0, ці режими прийняті за оптимальні для даних сплавів.

Випробування показали, що при нанесенні 4 шарів вручну тільки перший шар дає приріст, другий і наступні шари приросту не дають, хоча руйнування анода відбувається за рахунок розпилення матеріалу в міжелектродному просторі.

При нанесенні покриттів з алюмінієво-олов'яних сплавів енергія роботи установки грає виключно важливу роль, особливо в тих випадках, коли необхідно нарощування шару для відновлення зношених поверхонь алюмінієвих деталей.

При збільшенні енергії в імпульсі картина істотно змінюється. І при досить високих енергіях спостерігається полярне перенесення матеріалу електрода на поверхню зразка, що супроводжується збільшенням його у вазі.

Коефіцієнт перенесення K (відношення приросту зразка до ваги речовини, віддаленого з обробного електрода) в середньому був рівним $K \sim 0,3$. Область II на рисунку 3.1 представляє собою класичний варіант електроіскрового легування стосовно використаному матеріалу обробного електрода. У проміжній області спостерігався значний знос обробного електрода при відносно низькому перенесення матеріалу на поверхню зразка (рисунок 3.3).

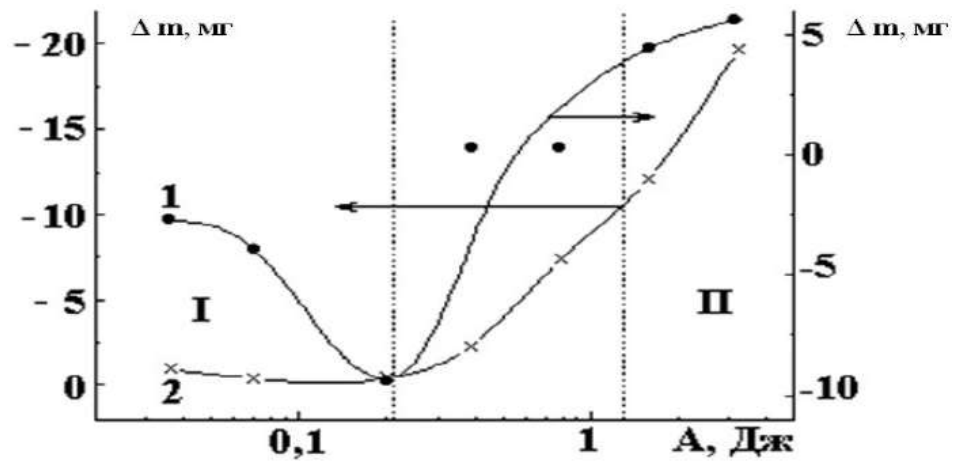


Рисунок 3.1. Узагальнений графік впливу енергії імпульсу на зміну маси зразка (1) і обробного електрода (2)

3.1.2 Склад і морфологія отриманих покриттів.

На рисунку 3.2 приведена морфологія поверхні зразка і обробного електрода після обробки при режимах, відповідних області I на рисунку 3.3. З результатів елементного аналізу (таблиця 3.2) видно, що вони представляють суміш оксидів і нітридів алюмінію (зразок), а також оксидів алюмінію, олова і міді.

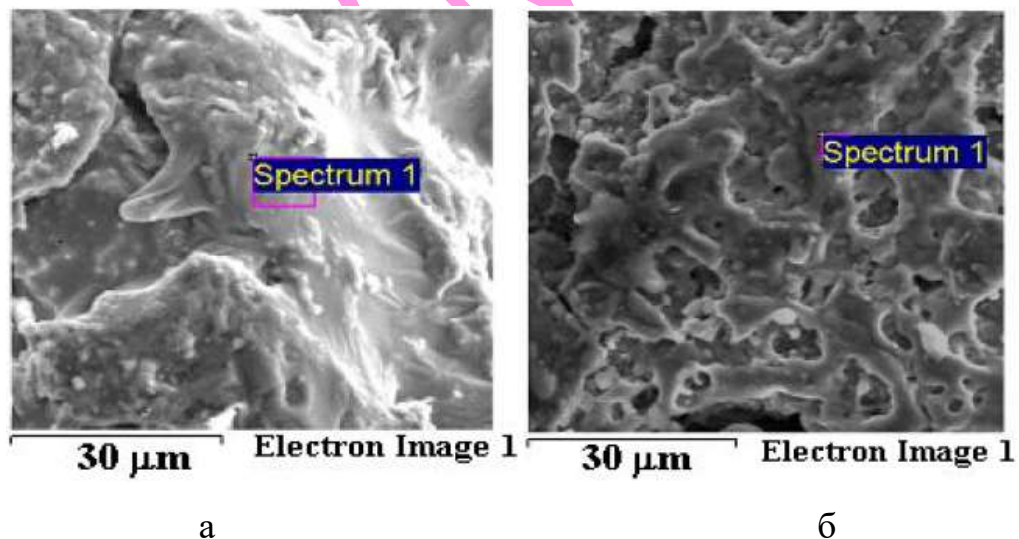


Рисунок 3.2. Морфологія поверхні обробного електрода (а) і зразка (б) після обробки методом електроіскрового легування в режимах 4 (а) і 1 (б)

Таблиця 3.2.

Склад (вагові%) поверхні зразка після обробки в режимах, відповідних області I.

Елемент		C	N	O	Al	Cu	Sn
Зразок	в режимі 1	4,1	13,1	29,4	53,3	-	-
Оброблюючий електрод	в режимі 4	10,4	-	3,3	82,7	1,8	1,3

Наведені фотографії поверхні і результати аналізу типові для обробки в режимах 1 - 5. При цьому склад поверхонь міг незначно змінюватися. Зокрема, на поверхнях зразків в режимах 2 - 5 присутнє олово (в незначних кількостях), а іноді - і мідь. До складу обробного електрода і зразка входив вуглець. Це може бути обумовлено тим, що плавку обробного електрода проводили в графітовому тиглі. Морфологія поверхонь, отриманих в зазначених умовах, є характерною для оплавлених поверхонь.

Наведені результати підтверджують результати вимірювань втрат у вазі, з яких випливає, що область I - це область електроерозійної обробки в повітряному середовищі. Схожа картина спостерігається для зразків, оброблених при режимах 4, 5 (див. Область проміжних режимів, представлених на рисунку 3.3).

Що ж стосується області II графіка на рисунку 3.1, то поряд зі складом і морфологією поверхні, характерних для області I і проміжної області, на поверхнях зразків і обробного електрода, оброблюваних при цих режимах, зафіксовані специфічні структури у вигляді ниток, діаметр яких менше 1 мкм (рисунок 3.5). На рисунку 3.4 мікро - та нанонитки представлені при більшому збільшенні. У таблиці 3.3 представлений склад поверхні зразків після обробки в цих умовах.

Таблиця 3.3.

Склад поверхонь зразків після обробки в режимах 6 і 7
(середні значення)

Елемент	Al	Sn	O	N	C
Вага, %	$50,0 \pm 4,8$	$34,8 \pm 2,6$	$7,7 \pm 1,5$	$2,2 \pm 0,6$	$5,3 \pm 2,6$

Видно, що в порівнянні з іншими режимами різко зростає концентрація олова на поверхні зразка (таблиця 3.3). Аналіз складу ниток показує, що в основному це діоксид олова (таблиця 3.4).

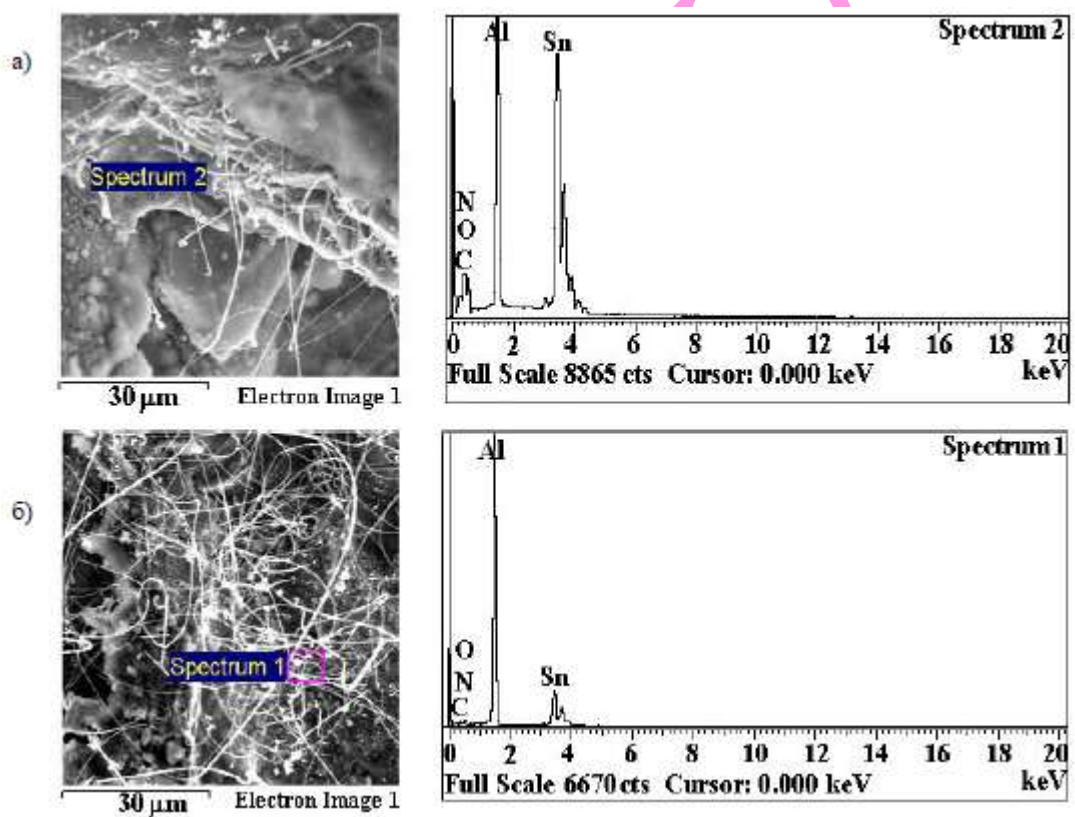


Рисунок 3.3. Морфологія поверхні та EDX-спектри обробного електрода (а) і зразка (б) після обробки в режимах 6 (а) і 7 (б)

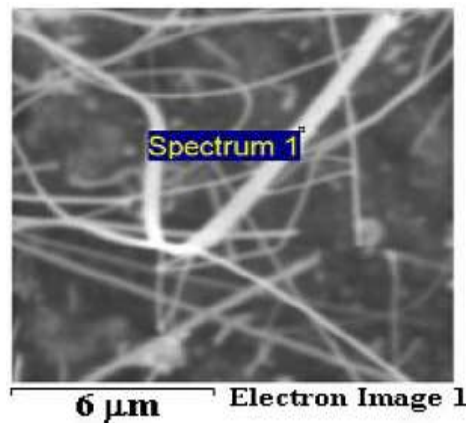


Рисунок 3.4. Поверхня зразка після обробки в режимі 7 (фрагмент
рисунок 3.5, б)

Таблиця 3.4

Елементний склад нитки на зразку після обробки в режимі 6

Елемент	Al	Sn	O	N	C
Вага,%	19,1	61,5	11,5	4,9	3,0

У таблиці 3.4 представлені результати елементного аналізу великого фрагмента нитки на зразку, з якого випливає, що концентрація олова в нитки понад 60% (вага.), А кисню більше 11%. Однак, однозначно відповісти на питання, чи є вони виключно складаються з олова (його оксидів) або містять також алюміній і його оксиди, але в меншому, ніж олово кількості, не можна. Причиною такого становища є обмеженість методу аналізу EDX, так як цей метод фіксує наявність компонентів не тільки в обсязі нитки, але і частково включає обсяги поверхневих шарів, на яких ці нитки знаходяться.

3.1.3. Фізичні основи одержання мікро - та нанониток.

Для з'ясування причин появи мікро - та нанониток двоокису олова (SnO_2) в алюмінієвій матриці, яка за припущенням забезпечує високу зносостійкість покриття на сплаві Д1, був проведений аналіз діаграми стану подвійної системи Al-Sn (рисунок 3.5) [59]. Видно, що при

кімнатній температурі (до температури плавлення олова - 228°C) матеріал, який використовується в якості обробного електрода (АО20-1), повинен являти собою алюмінієву матрицю з дисперговані в ній металевим оловом.

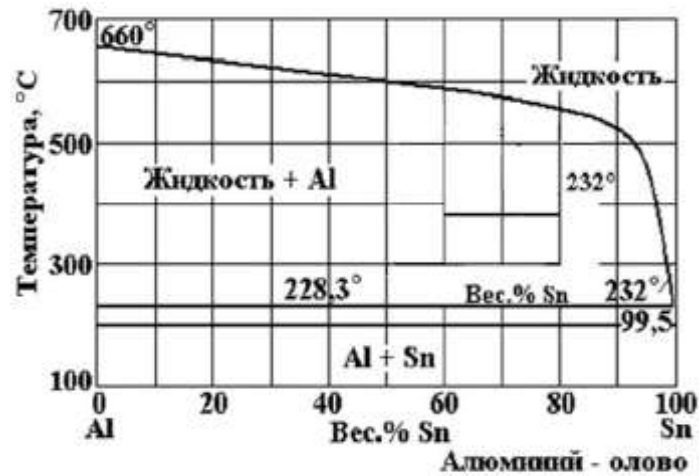


Рисунок 3.5. Діаграма стану системи алюміній - олово

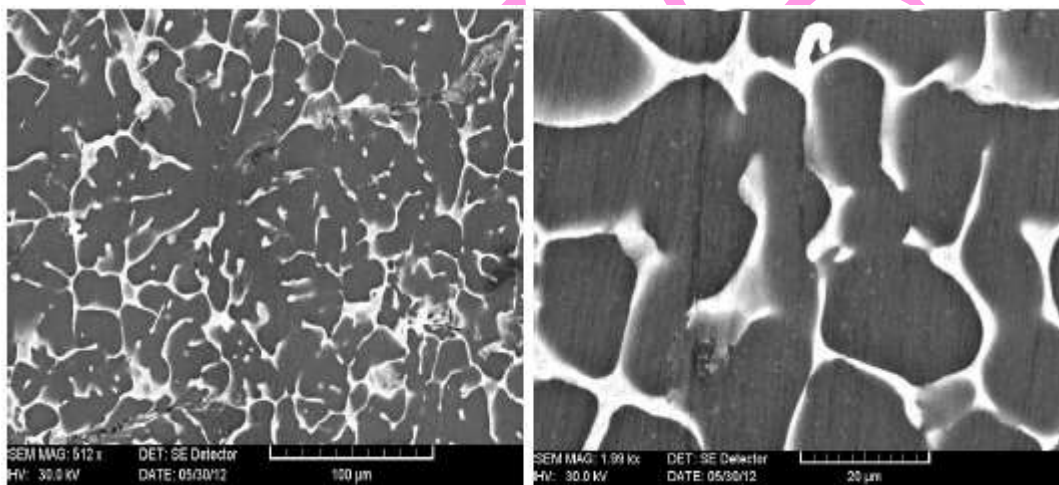


Рисунок 3.6 Мікрофотографії структури електрода зі сплаву Al-Sn при різному збільшенні. (Світла сітка-олово, темні зерна - алюміній)

Це підтверджується результатами скануючої електронної мікроскопії та EDX- елементного аналізу (рисунок 3.7), а також сканування по поверхні зразка з одночасним визначенням алюмінію і олова (рисунок 3.8).

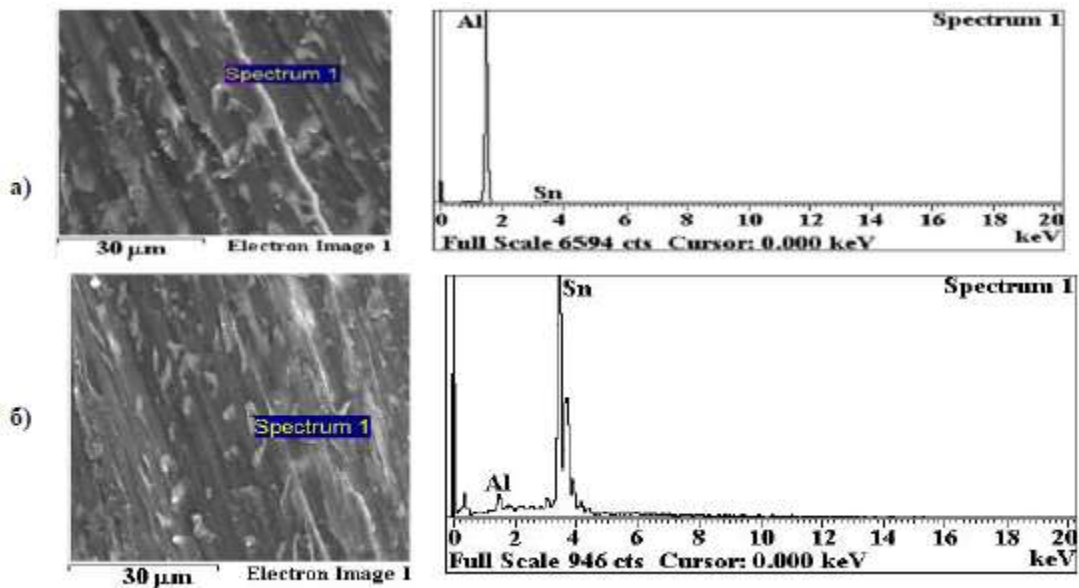


Рисунок 3.7 Мікрофотографії поверхні обробного електрода і EDX-спектри матриці (а) і диспергированного олова (б). Білі включення являють собою вкраплення Sn в алюмінієвій матриці

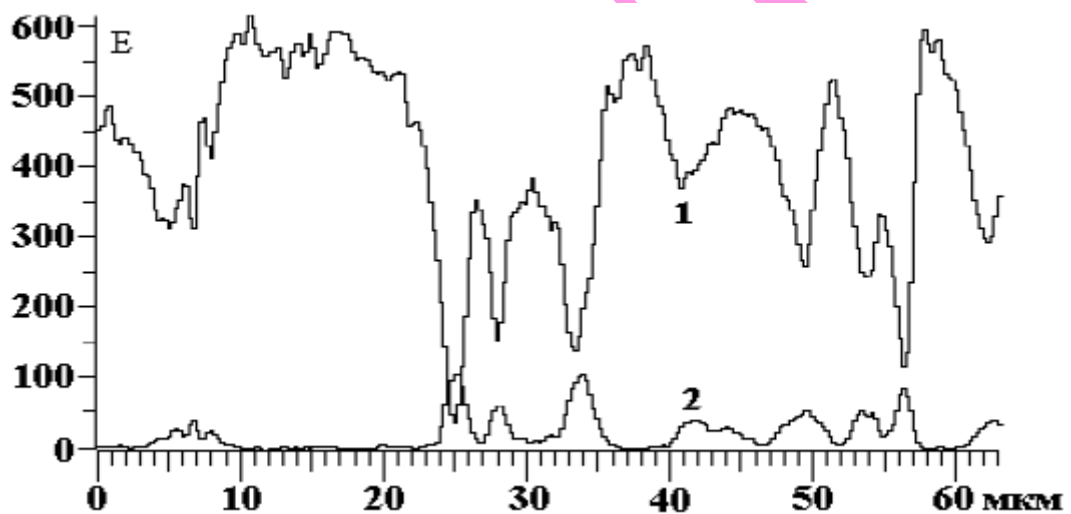


Рисунок 3.8 Розподіл алюмінію (1) і олова (2) по поверхні обробного електрода. Рівні EDX-спектра наведені в відносних одиницях E

З рисунку 3.6 видно, що оброблюючий електрод дійсно є алюмінієвою матрицю з диспергованими в ній частинками олова розміром $(3 - 5) \cdot 10^{-6}$ м., що мають форму тонкої сітки або рівномірно розподілених в матриці дисперсних частинок. Така структура утворюється в результаті

того, що на початку кристалізації сплаву випадають більш тугоплавкі кристали алюмінію і відтісняють рідке олово на межі зерен, де воно згодом і кристалізується у вигляді прошарків. Це підтверджується експериментом: при нагріванні електрода в електричній печі до температури 350°C на його поверхні виступають дрібнодисперсні крапельки олова.

В умовах електроіскрового легування, тобто при локальному підвищенні температури в місці контакту електрода з зразком, система являє собою розплавлені частинки диспергированного олова, що знаходяться в твердій матриці алюмінію.

Таким чином, при електроіскровому легированні електродами з алюмінієво-олов'яного сплаву, перенесення частинок олова в міжелектродний проміжок здійснюється внаслідок дії електромагнітних сил, які деформують поверхню розплавленої краплі в тому випадку, якщо для розплавлених частинок сила поверхневого натягу системи розплав-повітря досить мала. Для системи розплав олово-повітря якраз і спостерігаються мінімальні значення сил поверхневого натягу [58]. Очевидно, що внаслідок малості сил поверхневого натягу розплавлених частинок олова (або олова, частково збагаченого алюмінієм), електромагнітні сили, що виникають внаслідок наявності електромагнітного поля в міжелектродному проміжку, настільки їх перевищують, що в результаті дроблення дисперсних частинок утворюються волокна діаметром менше $1 \cdot 10^{-6}$ м.

Факти подібного роду повинні спостерігатися не тільки для системи Al-Sn, але і для будь-яких інших систем, які утворюють механічні суміші (тобто елементи не розчиняються одна в одній і не утворюють хімічних сполук) і при певних температурах будуть являти собою систему розплавлених частинок, знаходяться у твердій матриці. Такими системами можуть бути Al-Pb, Fe-Pb, Cu-Pb і інші, які широко застосовуються в промисловості в якості антифрикційних сплавів.

В результаті дослідження встановлено, що в умовах електроіскрового легування обробними електродами з матеріалів, що представляють механічну суміш щодо легкоплавкого компонента, диспергированного у відносно тугоплавкої (наприклад, система Al-Sn), можливе утворення в міжелектродному проміжку ниток з матеріалу, збагаченого легкоплавким компонентом. Нитки, що утворюються переносяться на поверхню зразка, що різко збільшує концентрацію легкоплавкого компонента в поверхневому шарі при електроіскровому легуванні. Отримані в покритті мікро-і нанонитки олова або його оксиду (в залежності від атмосфери в міжелектродному проміжку) можуть грати роль «арматури», що зв'язує шари і забезпечують приріст зразка, що робить можливим використання таких покриттів для відновлення поверхонь з алюмінієвих сплавів.

Можна констатувати, що подібний метод отримання мікро-і нанониток в умовах електроіскрового легування є аналогом електроспіннінгу - методу отримання нанониток з розплавів або полімерів в електричному полі [60].

Висновки

В результаті проведення експериментів з нанесення покриттів за допомогою електроіскрового легування на сплав Д1 обробними електродами з Al-Sn встановлено: при низькій енергії імпульсів $J < 0,8$ Дж покриття на алюмінієвому сплаві Д1 з приростом шару не утворюються через сильного виносу матеріалу з зразка (катода), поверхню зразка тільки модифікується. Приріст шару відбувається при підвищенні енергії імпульсів до $J > 0,8$ Дж; при нанесенні покриттів виявлено поява мікро - та нанониток, що містять переважно оксиди олова, що утворюються в результаті дії електромагнітних сил.

Для з'ясування причин появи мікро - та нанониток двоокису олова (SnO_2) в алюмінієвій матриці, проведений аналіз діаграми стану подвійної системи Al-Sn. Показано, що при кімнатній температурі матеріал, який використовується в якості обробного електрода (АО20-1), повинен являти собою алюмінієву матрицю з диспергованим в ній металевим оловом.

Показано, що мікро - та нанонитки переносяться на поверхню зразка, утворюючи покриття зі зміненими властивостями. Отримані мікро - та нанонитки грають роль «арматури», що зв'язує покриття в шар і сприяє його збільшенню, що дає можливість використання таких покриттів для відновлення зношених деталей.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Оптимальне керування підприємством передбачає досягнення заданої мети його розвитку з найбільшою при заданих умовах ефективністю [61].

При розгляді питання про економічну ефективність виробництва необхідно мати на увазі, що ефект і ефективність - поняття не збігаються [61].

Ефект - це наслідок, результат тих чи інших заходів. Як би не важливий був ефект виробництва, його результат, сам по собі він недостатньо характеризує виробничу діяльність, тому що не показує, ціною яких ресурсів (витрат) отримано [61].

Економічну ефективність виробництва характеризує відношення економічного ефекту до витрат, які зумовив цей ефект. Іншими словами, рівень економічної ефективності дає уявлення про те, ціною яких витрат досягнутий економічний ефект [62].

Економічна ефективність діяльності підприємства - це віддача в формі доходів різних ресурсів підприємства, яка визначається відношенням доходів до витрат ресурсів. Розрізняють два види економічної ефективності підприємств: спосіб розподілу наявних ресурсів і спосіб використання ресурсів в кожній конкретній економічній діяльності [62].

Економічна ефективність виробництва може бути визначена на різних рівнях: національному, галузевому, на підприємстві і внутрішньохозяйственому підрозділі, на рівні виду діяльності всередині підприємства і окремих заходів. Таким чином, ми бачимо, що існує багаторівневий підхід до критеріїв ефективності або подвійність критеріїв ефективності [62].

Економічна ефективність виробництва в підприємствах формується під впливом багатьох різнобічних факторів, які діють не ізольовано, в

чистому вигляді, а найтіснішим чином по відношенню один одного. В добре налагодженій ринковій економіці випуск продукції здійснюється з найменшими можливими витратами, а її розподіл відбувається відповідно до вимог ринку - цьому сприяє конкуренція. Витрати виробника на ринку трансформуються в ціну його продукту, і він прагне продати свій продукт за максимальною ціною. З іншого боку, і споживач прагне купити стільки продуктів, скільки йому потрібно для задоволення своїх потреб, і не більше, витративши на це якомога менше коштів [62].

Це обумовлено тим, що на ринку всі його суб'єкти діють розумно, і це визначає суть ринкової економіки. Щоб виробництво товарів було ефективним, необхідно забезпечити не тільки мінімум витрат, а й випуск товарів в таких наборах, які відповідають бажанням людей заплатити за них [62].

Об'єктивна оцінка ефективності діяльності підприємства має винятково велике значення, оскільки характеризує успішність менеджменту підприємства, формує його імідж, сприяє доступу на ринки капіталу і обґрунтовує доцільність інвестицій. У цих умовах уміння менеджменту оцінити потенціал підприємства та визначити шляхи його реалізації з максимальною ефективністю є головним завданням [61].

Але, попри все це, найважливішими показниками економічно ефективної діяльності підприємств, відносять собівартість, рентабельність та продуктивність [61].

Собівартість продукції – це показані в грошовій формі витрати підприємства, необхідні для виробництва та реалізації продукції. Собівартість являє собою найважливіший якісний та об'єктивний показник, що характеризує роботу підприємства [61].

Об'єктивність показника собівартості обумовлюється тим, що він відображає в собі всі результати виробничо-господарської діяльності підприємства об'єктивно. Саме в собівартості відбивається вся виробничо-господарська діяльність підприємства [61]:

- стан техніки та технології;
- ступінь використання основного та оборотного капіталу;
- рівень продуктивності праці та заробітної плати;
- дотримання режимів економії, методи управління і т. п.

Рентабельність – це відносний показник ефективності виробництва, що характеризує рівень віддачі витрат та ступінь використання ресурсів [62].

Дані рентабельності застосовуються для оцінки ефективності підприємств, які виробляють різну продукцію. Ці показники вказують прибуток у порівнянні з витраченими коштами. Поширено застосовуються дані рентабельності продукції та виробництва [62].

Рентабельність продукції – це відношення загальної суми прибутку до витрат виробництва та реалізації продукції (відносна величина прибутку, що припадає на одиницю поточних витрат) та визначається за формулою 4.1 [62].

$$P_{\text{п}} = \frac{Ц - С}{С} \times 100 \quad (4.1)$$

де Ц – ціна одиниці продукції;

С – собівартість одиниці продукції.

Рентабельність виробництва (загальна) показує відношення загальної суми прибутку до середньорічної вартості основних і нормованих оборотних коштів (величину прибутку в розрахунку на одиницю виробничих фондів) і розраховується за формулою 4.2 [62].

$$P_o = \frac{\Pi}{ОС_{\text{ср}} + ОбС_{\text{ср}}} \times 100 \quad (4.2)$$

де Π – сума прибутку, грн.;

$ОС_{\text{ср}}$ – середньорічна вартість основних виробничих фондів, грн.;

$ОбС_{\text{ср}}$ – середні за рік залишки оборотних коштів, грн.

Продуктивність праці – це плідність, продуктивність виробничої діяльності людей, яка вимірюється кількістю часу, що витрачається на одиницю продукції, або кількістю продукції, виробленої в одиницю робочого часу [61].

При розгляді проблем продуктивності праці є необхідність враховувати фактори збільшення продуктивності праці, які є рушійними силами або причинами зміни динаміки продуктивності праці. Нижче наведено кілька факторів [61]:

- збільшення технічної ступеня виробництва (впровадження передових технологій, автоматизація робочих місць, удосконалення обладнання, конструкцій, технічних параметрів виробів та ін.);
- підвищення якості організації праці та виробництва (поліпшення управління виробничим процесом, збільшення стандартних норм і сфери обслуговування, зниження працевтрати з вини простою зміни та ін.);
- зміна структури і обсягу виробництва продукції, що випускається та інші фактори [61].

Оцінку ефективності та економічно раціональної роботи організацій та підприємств можна описати за допомогою даних рентабельності [62].

Прибуток є кінцевим фінансовим результатом підприємницької діяльності підприємств і в загальному вигляді являє собою різницю між ціною продукції і її собівартістю, а в цілому по підприємству – різницю між виручкою від реалізації продукції і собівартістю реалізованої продукції [62].

Для визначення собівартості процесу електроіскрового легування треба провести розрахунки витрат.

Вартість матеріалу зразка розраховуємо за наступною формулою 4.3:

$$C_m = (Q \cdot C_m) \cdot a, \quad (4.3)$$

де Q – норма витрати матеріалу (у нашому випадку маса зразка 0,2 кг);

C_M – ціна матеріалу (140 грн./кг);

a – коефіцієнт витрат на термообробку (приймаємо 1,5).

$$C_M = (0,2 \cdot 140) \cdot 1,5 = 42 \text{ грн}$$

Основну та додаткову заробітну плату працівника з відрахуванням на соціальне страхування, до інших фондів розраховуємо за наступною формулою 4.4:

$$Z_p = C_q \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \frac{t_{шт}}{60} \cdot K_{мн} \cdot n, \quad (4.4)$$

де C_q – погодинна тарифна ставка працівника з відповідним розрядом (обираємо IV розряд - 30 грн./год.);

K_1 – коефіцієнт на додаткову заробітну плату (1,8);

K_2 – коефіцієнт на багатостаночне обслуговування (1,5);

$t_{шт}$ – час на операцію для обробки 1 шт. заготовки, хв.;

$K_{мн}$ – коефіцієнт на обслуговування декількох одиниць обладнання (1);

n – кількість одиниць обладнання для проведення дослідної роботи, шт.

Електроіскрове легування зразків алюмінію Д1 склала 30 хвилин.

$$Z_p = 30 \cdot 1,8 \cdot 1,5 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 1 = 40,5 \text{ грн}$$

Розрахувати амортизаційні витрати на обладнання, можна наступним чином [61]:

$$A_0 = \frac{S_0 \cdot K \cdot a \cdot n}{N_{год} \cdot 100} \quad (4.5)$$

де S_0 – вартість одиниці обладнання (10000 грн.);

K – коефіцієнт, що враховує витрати на транспортування і монтаж устаткування; приймаємо $K = 1,20$;

a – норма амортизаційних відрахувань (10% від вартості обладнання);

n – кількість одиниць обладнання на даній операції, шт.;

$N_{\text{год.}}$ – річна програма експериментальних зразків (1000 шт.);

$$A_0 = \frac{10000 \cdot 1.20 \cdot 3000 \cdot 1}{1000 \cdot 100} = 360 \text{ (грн)}$$

Витрати на ремонт обладнання розраховуємо за наступною формулою [62]:

$$P = A_0 \cdot K \quad (4.6)$$

де K – коефіцієнт, що встановлює залежність величини витрати на ремонт від величини амортизаційних відрахувань (20%);

$$P = 360 \cdot 2 = 720 \text{ (грн.)}$$

За наступною формулою розраховуємо витрати на утримання виробничої площі [62]:

$$P_{\text{утр.}} = \frac{S_{\text{пл.}} \cdot K \cdot n \cdot P}{N_{\text{річ.}}} \quad (4.7)$$

де $S_{\text{пл.}}$ – площа, яку займає одиниця обладнання, м²;

K – коефіцієнт, що враховує додаткову площу під проходи і проїзди;

n – кількість одиниць обладнання, шт.;

P – річна норма витрат за утримання одного метра квадратного виробничої площі, грн. (200 грн.);

$N_{\text{річ.}}$ – річна програма зразків, шт.

$$P_{\text{утр.}} = \frac{0,5 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 200}{1000} = 0,3 \text{ (грн)}$$

Технологічна вартість процесу нанесення покриттів, грн

Найменування витрат	AlSn
Заробітна плата виробничого працівника	40,5
Амортизаційні витрати на обладнання	360
Витрати на ремонт обладнання	720
Витрати на утримання виробничої площі	0.3
Загальна сума витрат	1120,80

Отже, розрахунки показали, що процес електроіскрового легування алюмінієвого сплаву електродами зі сплаву Al-Sn є економічно вигідним, за рахунок витрат на заробітну плату для працівника, витрати на обладнання та матеріали.

Висновки

Економічну ефективність виробництва характеризує відношення економічного ефекту до витрат, які зумовив цей ефект. Іншими словами, рівень економічної ефективності дає уявлення про те, ціною яких витрат досягнутий економічний ефект.

Економічна ефективність виробництва може бути визначена на різних рівнях: національному, галузевому, на підприємстві і внутрішньому підрозділі, на рівні виду діяльності всередині підприємства і окремих заходів. Таким чином, ми бачимо, що існує багаторівневий підхід до критеріїв ефективності або подвійність критеріїв ефективності.

Але, попри все це, найважливішими показниками економічно ефективної діяльності підприємств, відносять собівартість, рентабельність та продуктивність.

Розрахунки показали, що процес електроіскрового легування алюмінієвого сплаву Д1 електродами зі сплаву Al-Sn є економічно вигідним, за рахунок витрат на заробітну плату для працівника, витрати на обладнання та матеріали.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ, НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ТА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

5.1. Охорона праці як складова безпеки життєдіяльності

Праця – це розроблена діяльність людини, що втілює в життя свої фізичні та розумові здібності для отримання певних матеріальних або духовних благ. Праця є основою і неодмінною умовою життєдіяльності людей. Процес праці відбувається у виробничому середовищі (підприємства, установи, організації, навчальні заклади тощо), яке є однією зі складових штучного середовища в загальній системі життєдіяльності, де людина реалізує свою трудову діяльність [63]. Процесом забезпечення безпеки життєдіяльності людини під час праці у виробничому середовищі, якщо вона здійснюється в рамках трудового законодавства, займається охорона праці [63].

Охорона праці – система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини в процесі трудової діяльності [63].

До найважливіших функцій охорони праці належать створення умов, головною метою яких є робота, спрямована на запобігання травматизму та професійним захворюванням, відновлення здоров'я (у разі пошкоджень, каліцтв на виробництві), забезпечення соціальних прав і гарантій потерпілим. Таким чином, охорона праці водночас вирішує два основних завдання.

По – перше, це інженерно-технічне – передбачає запобігання небезпечним подіям під час трудового процесу через заміну небезпечних матеріалів менш небезпечними; перехід на впровадження нових технологій, які зменшують ризик травмувань та захворювань;

проектування та конструювання обладнання з урахуванням вимог безпеки праці; розробку засобів індивідуального і колективного захисту [63].

По – друге, соціальне, пов'язане з відшкодуванням матеріальної, моральної чи соціальної шкоди, завданої внаслідок нещасного випадку або професійного захворювання, тобто це захист працівника та його прав [63].

5.2. Техніка безпеки при проведенні зварювальних робіт

Застосування електричного обладнання для зварювання стало причиною виникнення на робочих місцях електромагнітного випромінювання в широкому діапазоні частот, зокрема більшість способів контактного зварювання характеризуються підвищеними рівнями магнітних полів [64].

Усі різновиди зварювання металів відкритою дугою, за винятком зварювання під флюсом, є джерелом видимого випромінювання, ультрафіолетових (УФ) променів, іскор та бризок розплавленого металу і шлаку. Майже всі ці процеси супроводжуються інфрачервоним (ІЧ) випромінюванням зварювальної дуги і нагрітого основного металу.

Горіння зварювальної дуги супроводжується випромінюванням яскравих світлових, невидимих ультрафіолетових та теплових інфрачервоних променів. З підсиленням сили струму спектральний склад променів не змінюється, проте інтенсивність випромінювання зростає [64].

При різних способах зварювання на долю випромінювання в УФ діапазоні спектра припадає 1...40 % інтегральної інтенсивності променистого потоку. При збільшенні сили зварювального струму та напруги дуги інтенсивність УФ складової випромінювання оптичного діапазону підвищується. Спектр випромінювання зміщується в бік коротких хвиль. Склад покриття електродів і матеріал присадок також впливають на інтенсивність та спектр УФ випромінювання. Найбільш сильний вплив на величину УФ радіації виявляє склад захисного газу [64]. При збільшенні вмісту аргону в захисній газовій суміші інтенсивність УФ

випромінювання підвищується. Введення в захисне середовище вуглецевого газу і гелію викликають зміщення спектра випромінювання в бік коротких хвиль. Зі збільшенням відстані від дуги інтенсивність УФ радіації знижується. Опромінення тіла зварника залежить спецодежгу, тобто від його відбиваючих та пропускаючих властивостей.

До виконання дугового зварювання допускаються особи, не молодші 18 років, які пройшли попередній медичний огляд (з урахуванням медичних протипоказань), навчання, інструктаж та перевірку знань вимог безпеки згідно з Типовим положенням про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці (НПАОП 0.00-4.12-05), мають кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижчу II і посвідчення [64].

До виконання електрошлакового зварювання допускаються зварники і помічники зварників, які пройшли додаткове навчання технології електрошлакового зварювання і перевірку знань вимог безпеки. Помічник зварника до самостійного виконання електрошлакового зварювання не допускається [65].

Повторний інструктаж проводиться не рідше ніж один раз у три місяці з відміткою в журналі [65].

Обираючи технологію процесу зварювання, слід надавати перевагу процесу, при якому буде забезпечуватися більша безпека праці. Необхідно використовувати ті види та марки зварювальних матеріалів (електроди, дріт, флюси, захисні гази тощо), які в процесі зварювання забезпечують мінімальне виділення в повітря шкідливих речовини. Не допускається використання зварювальних матеріалів, що не пройшли гігієнічну оцінку в установленому порядку [65].

Зварювання виробів середніх і малих розмірів в стаціонарних умовах слід виконувати в спеціально обладнаних кабінах [65]. Кабіна для зварювання повинна мати відкритий верх та виготовлятися з негорючих матеріалів. Між стіною та підлогою кабіни необхідно залишати зазор, висота якого визначається видом зварювання. Площа кабіни повинна бути

достатньою для розміщення зварювального устаткування, стола, пристрою місцевої витяжної вентиляції, зварювального виробу та інструменту [65].

Дугове зварювання під флюсом на стаціонарних установках має здійснюватися при наявності пристрою для механізованого подавання флюсу у зварювальну ванну, флюсовідсмоктувача з бункером-накопичувачем та фільтра. При дуговому зварюванні під флюсом напівавтоматами та автоматами повинні застосовуватись пересувні або переносні флюсовідсмоктувальні апарати [65]. У випадках, коли застосування флюсовідвідників неможливе, допускається ручне видалення флюсу. У системі збору та подачі флюсу повітря, що відводиться у приміщення або зовні, потрібно очистити від пилу. Під час засипання флюсу у бункери потрібно застосувати заходи для запобігання запилення повітря робочої зони. Для безпечного переміщення автоматів рельсовим шляхом необхідно перевіряти його надійність і правильність закріплення на виробі або стенді, а також надійність кріплення зворотних і бокових роликів ходового механізму. Під час видалення шлаку працівник повинен бути забезпечений необхідними засобами індивідуального захисту.

Під час електрошлакового зварювання не дозволяється керування одним і тим же параметром режиму з різних пультів одночасно. Для безпечного проведення електрошлакового зварювання необхідно забезпечити щільне прилягання поверхні водоохолоджувальних повзунів, платин, прокладок та інших пристроїв до зварювального виробу, щоб запобігти витіканню розплавленого металу та шлаку. При порушенні герметичності шлакової ванни і витіканні розплавленого шлаку, протікань необхідно позбуватися з допомогою огнетривкої глини, роботи потрібно виконувати в асбестових рукавицях. В апаратах електрошлакового зварювання необхідно забезпечити герметичність системи водяного охолодження повзунів і водяних шлангів, що прилягають до них, а також передбачити контроль наявності в них потоку охолоджувальної води за допомогою реле тиску.

Під час електронно-променевого зварювання, зварювальні установки слід розташовувати в окремих приміщеннях або спеціально відведених місцях у цехах, що не мають джерел пилу [65]. Матеріал підлоги приміщення повинен відповідати вимогам електричної безпеки. Механічні вакуумні насоси необхідно встановлювати в окремих звукоізованих приміщеннях. У приміщеннях, де розміщені установки електронно-променевого зварювання, має бути встановлена механічна припливно-втяжна вентиляція з кратністю повітрообміну не нижче 5. Конструкція установок повинна забезпечувати необхідний захист від впливу рентгенівського випромінювання. Під час роботи установок електронно-променевого зварювання для запобігання вибухів не можна допускати потрапляння повітря і води у місце пароутворення в результаті нагрівання паромасляних pomp, а також до вакуумної камери або відкачувальної системи під час зупинки форвакуумного насосу [66].

Корпус будь-якої електрозварювальної установки необхідно заземлювати. Захисне заземлення і занулення виконується згідно з ГОСТ 12.1.030-81. Послідовне включення в заземлюючий провідник декількох апаратів забороняється [66].

Окремі елементи зварювального кола, а також відрізки зварювальних кабелів при нарощуванні довжини повинні бути з'єднані роз'ємними з'єднувальними муфтами. Забороняється з'єднувати зварювальні кола скрутками з оголеним кабелем. Струмopідвідні кабелі зварювального кола повинні бути по всій довжині ізовані та захищені від механічних ушкоджень [67].

Електрозварювальний інструмент (електродотримачі, електропаяльники, електрорізаки) не повинні мати відкритих струмоведучих частин, а рукоятки необхідно виготовляти із струмоізовлюючих матеріалів [68].

Електрозварювальний інструмент, що знаходиться під напругою, забороняється залишати на робочому місці. Пересувні електрозварювальні

установки під час їх пересування необхідно відключати від мережі. Приєднання і від'єднання від мережі електрозварювальних установок, переключення зварювального струму рукоятками, розташованими в середині установки за дверцятами, що не мають пристрою блокування, а також спостереження за справним станом установок у процесі експлуатації повинно виконуватися електротехнічним персоналом. Весь персонал, що обслуговує електрозварювальні установки, повинен періодично проходити інструктаж про небезпеку електричного струму і способи надання першої допомоги [68].

5.3. Охорона навколишнього середовища

Із розвитком сучасного виробництва і розширенням сфери діяльності людини становляться необхідними комплексні заходи, які спрямовані на охорону навколишнього середовища від промислового впливу викидів у атмосферу, стічних вод та твердих відходів виробництва. До числа підприємств, які забруднюють природне середовище, відносять підприємства по виробництву ЗБК. На їх частину приходяться біля 8% промислових викидів у атмосферу [69].

Головним напрямком екологічного та соціального розвитку є підвищення ефективності заходів з охорони природи, розвиток комбінованих виробництв, які виключають повне і комплексне використання природних ресурсів, сировини та матеріалів, які викликають або значно знижують шкідливий вплив на навколишнє середовище. З цією метою передбачені досконалі технологічні процеси, обладнання та транспортні засоби, використовується якісна сировина і паливо, високоефективне обладнання для очищення промислових та інших відходів. Вода, яка використовується для промивання технічного обладнання і яка містить у собі різні залишки, піддається очищенню на локальних очисних спорудах до концентрації, при якій вона знову може поступати на технологічні потреби [70].

Забороняється спуск шкідливих речовин в каналізацію, у тому числі і при аваріях. Ці продукти повинні спрямовуватися у спеціальні технологічні ємності для подальшої утилізації або знешкодження. Стічні води, які утримують шкідливі речовини, до надходження у зовнішню каналізаційну мережу очищується [70].

Відходи виробництва на заводі зберігаються у сміттєзбірниках, які по мірі заповнення видаляються з виробничих приміщень у спеціально відведені місця. Виводять промислові відходи, як правило самі підприємства, на спеціально відведені місця [71].

У приміщеннях з підвищеним пиловиділенням нормується припустима концентрація пилу. На складах цементу та в БЗВ для пилоосаду використовують центробіжні пилоосадники, які уловлюють від 70% до 90% пилу. Остаточо повітря від пилу очищують за допомогою матерчатих фільтрів, які забезпечують очищення повітря до 97-99%. [71]

СІМІ

Висновки

Отже, у п'ятому розділі розглянута охорона праці як складова безпеки життєдіяльності на підприємстві.

Охорона праці – система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини в процесі трудової діяльності.

Головним законом України в сфері охорони праці є Закон України «Про охорону праці».

При проведенні зварювальних робіт, необхідно дотримуватися всіх заходів безпеки

До виконання зварювання допускаються особи, не молодші 18 років, які пройшли попередній медичний огляд (з урахуванням медичних протипоказань), навчання, інструктаж та перевірку знань вимог безпеки згідно з Типовим положенням про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці (НПАОП 0.00-4.12-05), мають кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижчу II і посвідчення. До виконання зварювання допускаються зварники і помічники зварників, які пройшли додаткове навчання технології зварювання і перевірку знань вимог безпеки. Помічник зварника до самостійного виконання зварювання не допускається.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуто способи і технології нанесення покриттів на алюмінієві сплави такі як, іонно-плазмове напилення, мікродугове оксидування, азотування, оксидування.

В даний час з усіх розглянутих методів поверхневого зміцнення за рядом параметрів найефективнішим є електроіскрове легування, що дозволяє отримувати на поверхні алюмінієвих деталей покриття з різних матеріалів досить простим способом, як в технологічному відношенні, так і в апаратному оформленні, що є його великою перевагою.

Процес електроіскрового легування заснований на переважному руйнуванні (ерозії) матеріалу анода при іскровому розряді. Основні закономірності та явища, що визначають процеси ЕІЛ, залежать від матеріалу легувального електрода й режимів обробки. Іншими істотними перевагами електроіскрового легування є: висока адгезія покриття з основою, можливість локальної обробки поверхні, відсутність необхідності в попередній підготовці поверхні і екологічність процесу.

2. Для дослідження обрані електродні матеріали – катод - алюмінієвий сплав Д1; анод - електроди зі сплаву Al – Sn. ЕІЛ проводили на установці ALIER-31, якість покриття оцінювали за допомогою сучасних методів дослідження – макро- та мікроаналізи, електронна мікроскопія. Рентгеноструктурний аналіз.

3. Показано, що приріст зразків забезпечується тільки на 6 і 7 режимах роботи установки (енергія імпульсу 1,58 і 3,15 Дж, відповідно). З 1 по 5 режим (енергія імпульсу від 0,39 до 0,79 Дж, відповідно) відбувається зміна топографії поверхні – з'являються лунки, змінюється колір зі світлого на сірий, збільшується шорсткість, відбувається модифікування поверхні. Відбувається зменшення маси як електрода так і зразка.

4. Проведені електронномікроскопічні та рентгенографічні дослідження показали, що в процесі ЕІЛ виявляються нанонитки оксидів

олова. Очевидно, отримання в покритті мікро-і нанониток олова або його оксиду (залежно від атмосфери в міжелектродному проміжку) може відігравати роль «арматури», що зв'язує шари і забезпечує приріст маси зразка, і робить можливим використання таких наноструктурованих покриттів для відновлення і підвищення зносостійкості поверхонь з алюмінієвих сплавів.

5. Проведені розрахунки економічної ефективності та вартості нанесення покриттів методом електроіскрового легування. Показано, що електроіскрове легування алюмінієвого сплаву Д1 електродами зі сплаву Al-Sn є економічно вигідним, за рахунок витрат на заробітню плату для працівника, витрати на обладнання та матеріали.

6. Розглянули охорону праці, техніку безпеки при проведенні зварювальних робіт та охорону навколишнього середовища. Показано, що порівняно зі зварюванням метод електроіскрового легування є екологічно безпечним методом обробки металів та сплавів.

СЛІД

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение). Киев: «Коминтех», 2005. 156 с.
2. Позднякова, А.В. Особенности структурных изменений при сверхпластической деформации сплава АМг4 / А.В. Позднякова, В.К. Портной. *Цвет. металлургия: науч.- техн. и произв. журн.*; No1, 2004. 53 с.
3. Патент №2384637 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/06. Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия / Филатов Ю.А.; заявитель и патентообладатель ОА О «ВИЛС»; заявл. 21.07.2008; опубл. 20.03.2010
4. Белов, В.Д. Влияние магния и температуры заливки на структуру, механические и литейные свойства сплава системы Al - Mg / В.Д. Белов, В.А. Семенов. *Цвет. металлургия: науч.- техн. и произв. журн.* 2004. №2. 41 с.
5. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа / Банных О. А., Будберг П.Б., Алисова С. П. и др. М.: Металлургия, 1986. 450 с.
6. Золотаревский В.С. Исследование влияния добавок Mn, Cu, Sr на структуру слитков сплавов Al-Mg-Si при термической обработке / В.С. Золотаревский, П.Ю. Брянцев, В.К. Портной, В.С. Левченко, М.В. Жирнова. *Металловедение и терм. обр-ка.: науч.-техн. и произв. журн.*; 2005.
7. Бер, Л.Б. Фазовый состав и механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов системы Al – Cu – Mg – Ag – Xi / Л.Б. Бер, В.В. Телешов, О.Г. Уколова. *Металловедение и терм. Обр -ка:* науч.-техн. и произв. журн.; No5, 2008.
8. ГОСТ 4784-97 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки.

9. Трухов А.П, Маляров А.И. Литейные сплавы и плавка. Москва: Изд. Академия ISBL, 2004. 336 с.
10. Бойцов А.Г. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А.Г.Бойцов, В.Н.Машков, В.А.Смоленцев, Л.А.Хворостухин. – М.: Металлургия, 1998. 98 с.
11. А.В.Белый, Е.М.Макушок, И.Л.Поболь. Поверхностная и упрочняющая обработка с применением концентрированных потоков энергии – Минск: Наука и техника, 1990. 79 с.
12. Комаров Ф.Ф. Физические процессы при ионной имплантации в твёрдые тела. – Минск: УП Технопринт, 2001. 392 с.
13. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Бурумкулов Ф.Х., Лезин П.П., Сенин П.В. и др., Саранск: типография Красный Октябрь, 2003. 504 с.
14. Нанесение защитных покрытий на детали ионно – плазменным методом - С.А.Мубоджян, Е.Н.Кабалов, С.А.Буденовский, А.Я. Помелов - *Авиационная промышленность*, 1999, №3, 65-70 с.
15. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б. и др. – Москва: Экомет, 2005, 298 с.
16. Шандров Б.В. Основы технологии микродугового оксидирования / Б.В.Шандров, Е.М. Морозов, А.В. Жуковский. – Москва: Альянс, 2008. 80 с.
17. Кривоносова Е.А., Горчаков А.И., Щербаков Ю.В. Структура и свойства покрытий при микродуговом оксидировании / *Сварочное производство*. 2013. № 10. 27–31 с.
18. Пономарев И.С., Кривоносова Е.А., Горчаков А.И. Влияние режимов оксидирования на микротвёрдость оксидированных покрытий / *Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Машиностроение, материаловедение*. 2013. Т. 15, № 3. 56–61с.

19. Veprek, S. The search for novel, superhard materials. S. Veprek / J. Vac. Sci. Technol. A, v. 17, pp. 2401–2420 (1999)
20. Углов, В.В. Структурно-фазовые превращения в алюминии, железе и его сплавах при комбинированных ионных и плазменных воздействиях / В.В. Углов. – дис. докт. физ.-мат. наук. Минск, 2006.
21. Азотирование поверхности технически чистого алюминия в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом / О.В. Крысина [и др.] / Материалы 12-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом», Минск, Беларусь, 2017. – С. 250–250.
22. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Под ред. Н.Н. Коваля, Ю.Ф. Иванова, Томск. Издательство НТЛ, 2016.
23. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / под общ. ред. Н.Н. Коваля и Ю.Ф. Иванова. – Томск, Изд-во НТЛ, 2016
24. Генерация однородной низкотемпературной газовой плазмы в импульсном несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом большой площади / Ю.Х. Ахмадеев [и др.] / Физика плазмы, Т. 43, 2017. – с. 63–70.
25. О.В. Крысина и др. Азотирование поверхности технически чистого алюминия в плазме несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом / Материалы 12-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом», Минск, Беларусь, 2017. – С. 250–250.
26. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А.П. Ласковнев [и др.]. – Минск: Беларус. Навука, 2013.
27. Худяков В.Л. Опыт применения анодных окисных пленок при хромировании алюминия // В кн.: Анодная защита металлов: Докл. 1-й

межвуз. кон. / Под ред. А.Ф. Богоявленского. М.: Машиностроение, 1964. С. 292–309. – переизд: 2006

28. Лайнер В.И. Гальванические покрытия легких сплавов. М.: Metallurgizdat, 1959. 138 с. – переизд: 2001

29. Анодное оксидирование алюминия и его сплавов для качественных гальванических покрытий / Т.И. Девяткина и др. – Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2013, № 4 (1), с. – 109 -114

30. Н. М. Яковлева и др. Наноструктурирование поверхности металлов и сплавов / – Конденсированные среды и межфазные границы, Том 17, №2, 137 – 152 с.

31. Yakovleva N. M., Anicai A., Yakovlev A. N., Dima L., Khanina E. Ya., Buda M., Chupakhina E. A. // *Thin Solid Films*, 2002, vol. 416. № 1–2, pp. 16–23.

32. Yakovleva N. M., Yakovlev A. N., Chupakhina E. A., Khanina E. Ya. *Naukoemkie tekhnologii*, 2004, vol. 5, pp. 3–11., - 33Thompson G. E., Xu Y., Skeldon P., Shimizu K., Han S. H., Wood G. C. *Phil. Mag. B.*, 2000, vol. 55, no. 6, pp. 651–667

33. McQuaig Jr M. K., Toro A., Van Geertruyden W., Misiolek W. Z. *J Mater Sci.*, 2011, vol. 46, pp. 243–253. DOI: 10.1007/s10853–010–4966–6

34. Yakovleva N. M., Yakovlev A. N., Chupakhina E. A. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy*, 2006, vol. 8, pp. 69–77.

35. Poznyak A. A. *Modifitsirovanniy anodnyi oksid alyuminiya i kompozitnye materialy na ego osnove: monografiya*. Minsk: Tsentr BGU Publ., 2007, 251 p.

36. Nasirpouri F., Abdollahzadeh M., Almasi M. J., Parvini-Ahmadi N. *Curr. Appl. Phys.*, 2009, vol. 9, pp. S91–S94. DOI: 10.1016/j.cap.2008.08.025

37. Ghorbani M., Nasirpouri F., Irajizad A., Saedi A. *Mater. Des.*, 2006, vol. 27, pp. 983—988. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.02.018
38. Lu B., Bharathulwar S., Laughlin D. E., Lambeth D. N. *J. Appl. Phys.*, 2000, vol. 87, no. 9, pp. 4721—4723. DOI: 10.1063/1.373138
39. Нанотехнологии в электронике. Под ред. Чаплыгина Ю.А. М.: Техносфера, 2005. 448 с
40. Францевич И.Н. Анодные оксидные покрытия на металлах и анодная защита. Киев: Наукова думка, 1985. 280 с. – переизд.: - 2006
41. Chakarvarty S.K., Vetter J. A review / *Radiation Measurements* 1998 V.29. № 2. P.149
42. Masuda H., Kanezawa K., Nishio K. / *Chem. Lett.*, 2002. P. 1218.
43. А.Н. Белов, С.А. Гаврилов, В.И. Шевяков. Особенности получения наноструктурированного анодного оксида алюминия. – *Российские нанотехнологии*, 2006. Том 1, № 1-2. 223 – 227 с.
44. А. С. Письменская, А. А. Черник, В. В. Жилинский, Н. В. Богомазова, В. С. Безбородов. Формирование наноструктурированных алюминиевых плёнок, *Труды БГТУ*, 2016, № 3. 111 – 114 с.
45. Бурумкулов Ф.Х., Лезин П.П., Сенин П.В. и др. *Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика)* Саранск: типография Красный Октябрь, 2003. 504 с.
46. Антонюк В.С., Дигам М.С. Новое в формировании упрочняющих покрытий фрикционных поверхностей / *Сучасне машинобудування.*, 1999. № 1. 105–110 с.
47. Левашов Е.А., Кудряшов А.Е., Малочкин О.В. О влиянии нанокристаллических порошков на процесс формирования, структуру и свойства электроискровых покрытий на основе титанохромового карбида. In: *Известия ВУЗов. Цветная металлургия*, 2001. №3. 44-51с.
48. Николенко С.В. Наноструктурирование поверхности стали 35 электроискровой обработкой новыми электродными материалами на

основе карбида вольфрама с добавкой Al_2O_3 - *Вестник машиностроения*. – №6., 2011., С.47-51.

49. В. Ф. Лабунець, О. А. Городиський. Аналіз особливостей змін у структурі сплаву АЛ25 після електроіскрового легування перехідними металами. Національний авіаційний університет, 2009. 12-15 с.

50. Н. Е. Фомин , И. Х. Хасан , В. М. Кяшкин. Влияние электроискрового легирования на механические свойства Al-Si-Cu сплавов. Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 2. 138–142 с.

51. Установка для электроискрового нанесения металлических покрытий ALIER-31 паспорт. Кишинев: SCINTI.

52. Юрченко Е. В. Технология упрочняющих наноструктурированных электроискровых покрытий на алюминиевых сплавах и их использование при восстановлении и ремонте деталей машин : дис. Институт прикладной физики. Кишинев, 2016. 183 с.

53. Петрова, Л.Г. Методы исследования структуры металлических материалов: учеб. пособие / Л.Г. Петрова., М.: МАДИ, 2002. 125 с.

54. Петрова, Л.Г. Методы исследования микро- и наноструктуры материалов: учеб. пособие / Л.Г. Петрова, Л.П. Шестопалова, В.А. Александров., М.: МАДИ, 2012. 189 с.

55. Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др. Материаловедение и технология металлов - М.: Высш. шк., 2001. – 640 с

56. Приклади застосування фізичних методів дослідження структури поверхні. / Г.М. Дубровська, Н.І. Божко, М.О. Бондаренко, Г.В. Канашевич та ін., Сільхет: Шобуж Біпоні, Удоун Офсет Принтерс, 2007. 248 с.

57. Иголинская, Н. М. Рентгеноструктурный анализ полимеров / Н.М. Иголинская. Кемерово, 2008. 227 с

58. ДСТУ ISO 6506-1:2007 «Визначення твердості за Брінеллем. Частина 1. Метод випробування»

59. Ниженко В.И., Флока А.И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов. Справочник. Москва, 1981.
60. Nandana Bhardwaj, Subhas C.Kundu, Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. In : Biotechnology Advances, 2010, v28, pp.325-347.
61. Кондратьева М.Н. Экономика предприятия : учебное пособие / М. Н. Кондратьева, Е.В. Баландина, Ульяновск : УлГТУ, 2011. 174 с.
62. Экономика предприятия: Учебник / Под ред. В.Я. Горфинкеля. - М.: Юнити, 2016. 663 с.
63. Основи охорони праці: Підручник / Ткачук К. Н., Халімовський М. О., Зацарний В. В. та ін. – К.: Основа, 2011. 474 с.
64. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник. – К.: Основа, 2010. – 240 с.
65. Левченко О. Г. Полукаров О. І. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник. К.: Основа, 2014. 352 с.
66. Левченко О. Г., Метлицкий В. А. Современные средства защиты сварщиков, Киев: Экотехнология, 2001. 84 с.
67. Сибикин, Ю.Д. Охрана труда и электробезопасность / Ю.Д. Сибикин. - М.: Радио и связь. 2012. 408 с.
68. Сварные строительные конструкции: Справ. изд. В 3-х т. / Под ред. Л. М. Лобанова. – Т.3. – К.: ИЭС им. Е. О. Патона. – 2003. – 378 с. – Глава 6: Охрана труда при сварке / О. Г. Левченко, В. А. Метлицкий. 293-319 с.
69. М. Н. Саксонов, А. Д. Абалаков, Л. В. Данько и др. Экологический мониторинг нефтегазовой отрасли. Физикохимические и биологические методы: учеб. Пособие, Иркутск: Иркут. ун-т, 2005. 114 с.
70. Сухарев С. М. Техноекологія та охорона навколишнього середовища : навчальний посібник для студентів вищих навчальних

закладів /С. М. Сухарев, С. Ю. Чундак, О. Ю. Сухарева [2-ге видання] – Львів : «Новий світ2000», 2005. 256 с.

71. СанПіН 2.1.6.1032-01. «Гігієнічні вимоги до якості атмосферного повітря».

СУМД