

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра прикладного матеріалознавства і ТКМ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Оксана ГАПОНОВА

«__» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності _____ 132 Матеріалознавство _____

освітньо-професійної програми _____ «Прикладне матеріалознавство» _____

на тему: «Дослідження особливостей модифікації поверхні алюмінієвих сплавів
методом електроіскрового легування» _____

Здобувача групи _____ МТ.м-31 _____ Лободюк Михайло Борисович

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Михайло ЛОБОДЮК _____

Керівник _____
завідувачка кафедри ПМ і ТКМ,
д.т.н., проф. Оксана ГАПОНОВА _____

Нормоконтроль _____
доцент кафедри ПМ і ТКМ
к.т.н., доц. Андрій ДЕГУЛА _____

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

«___» _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Лободюк Михайло Борисович

1. Тема проекту (роботи) «Дослідження особливостей модифікації поверхні алюмінієвих сплавів методом електроіскрового легування» затверджена наказом по університету №1085-VI від 22.10.2024 року.

2. Термін здачі студентом закінченого проекту(роботи)_____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) зразки, матеріали для проведення дослідження структурного стану модифікованих шарів.

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

1. Аналіз літературних джерел та вибір основних напрямів дослідження.

2. Загальна методика та основні методи дослідження.

3. Експериментальні дослідження та загальні результати.

4. Економічна частина.

5. Охорона праці, довкілля та техніка безпеки.

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

10 слайдів презентації, що відображають зміст роботи.

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

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці, довкілля і техніка безпеки	Говорун Т. П.	06.11.2024	11.12.2024
Економічна частина	Берладір Х. В.	06.11.2024	10.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пор.	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Огляд літератури за темою роботи і вибір напрямів досліджень	Листопад 2024	виконано
2	Загальна методика та основні методи дослідження	Листопад 2024	виконано
3	Експериментальні дослідження та обговорення результатів	Листопад - грудень 2024	виконано
4	Економічна частина	Грудень 2024	виконано
5	Охорона праці, довкілля і техніка безпеки	Грудень 2024	виконано

7. Дата видачі завдання _____

Студент _____

(підпис)

Керівник проекту _____

(підпис)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра складається з 80 сторінок, які містять 6 таблиць, 9 рисунків, список із 47 використаних джерел на 6 сторінках.

Алюмінієві сплави широко застосовують у машинобудуванні завдяки своїм властивостям: малій густині, високій питомій міцності, високій корозійній стійкості та технологічності при виготовленні деталей. Алюмінієві сплави добре штампуються і легко обробляються різанням. Алюміній – найпоширеніший метал у природі, тому сировинні ресурси для його виробництва практично не обмежені та його застосування надалі лише розширюватиметься. Однак подальшому розширенню його застосування перешкоджають низькі твердість і зносостійкість поверхні деталей з алюмінієвих сплавів. Усунення цих недоліків пов'язане з поліпшенням кількості поверхневих шарів алюмінієвих деталей шляхом нанесення покриттів, які відповідають вимогам високої зносостійкості та не потребують складного і дорогого обладнання, приладів і витратних матеріалів. З відомих нині способів отримання товстошарових покриттів на алюмінієвих сплавах (аргонно-дугове наплавлення, мікродугове оксидування, іонна імплантація тощо) електроіскрове легування має незаперечні переваги перед описаними вище способами: простота як самого технологічного процесу, так і апаратного оформлення, висока адгезія, локальність обробки, екологічність процесу.

Мета роботи – встановлення закономірностей формування зносостійких покриттів на алюмінієвій підкладці методом електроіскрового легування, що забезпечують підвищення твердості та зносостійкості.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Провести аналіз відомих методів поверхневого зміцнення алюмінієвих сплавів, що забезпечують модифікацію їх структури, підвищення механічних та триботехнічних властивостей, та визначити напрямок досліджень у роботі.
2. Дослідити мікроструктуру і хімічний склад покриття та електродів залежно від параметрів електроіскрового легування.

3. На основі експериментальних досліджень розробити практичні рекомендації щодо призначення оптимальних технологічних режимів електроіскрового легування, що забезпечують зносостійкість пар тертя.

Методи дослідження: експериментальні дослідження мікроструктури методами оптичної й електронної мікроскопії, визначення мікротвердості та отримання її розподілу в модифікованих поверхнях.

Об'єкт дослідження – процеси одержання на алюмінієвих поверхнях покриттів для підвищення зносостійкості.

Предмет дослідження – закономірності формування структури та складу зносостійких покриттів, отриманих методом ЕІЛ.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дослідження можуть бути покладені в основу отримання зносостійких покриттів поверхонь з алюмінієвих сплавів, шляхом електроіскрового легування.

Ключові слова: покриття, мікроструктура, наноструктура, алюміній, зносостійкість.

ABSTRACT

Lobodyuk Mykhailo. Investigation of electrospark alloying surface modification processes in aluminium alloys. – The manuscript.

Qualifying paper for obtaining the qualification of master's degree in the specialty 132 – Materials Science. – Sumy State University, Sumy, 2024.

Aluminium alloys are widely used in mechanical engineering because of their properties: low density, high specific strength, high corrosion resistance and manufacturability. Aluminium alloys can be easily stamped and machined. Aluminium is the most abundant metal in nature, so the raw materials for its production are virtually unlimited and its use will continue to expand. However, further expansion of its use is hampered by the low hardness and wear resistance of the surface of aluminium alloy parts. Overcoming these shortcomings involves increasing the number of surface layers on aluminium parts by applying coatings that meet high wear resistance requirements and do not require complex and expensive equipment, devices and consumables. Among the currently known methods for the production of thick coatings on aluminium alloys (argon arc deposition, micro-arc oxidation, ion implantation, etc.), electrospark alloying has undeniable advantages over the above-mentioned methods: simplicity of the technological process and hardware design, high adhesion, localised processing and environmental friendliness of the process.

The aim of the study is to establish the regularities of the formation of wear-resistant coatings on an aluminium substrate by the method of electrospark alloying, which provide an increase in hardness and wear resistance.

The aim of the work is to establish the regularities of formation of wear-resistant coatings on an aluminium substrate by the method of electrospark alloying, which provide an increase in hardness and wear resistance.

In order to achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks:

1. To analyse the known methods of surface hardening of aluminium alloys, which provide modification of their structure, improvement of mechanical and tribotechnical properties, and to determine the direction of research work.

2. To study the microstructure and chemical composition of the coating and electrodes as a function of the parameters of the electrospark alloying.

3. On the basis of experimental studies, to develop practical recommendations for the determination of optimal technological modes of electrospark alloying, ensuring the wear resistance of friction pairs.

Research methods: experimental studies of microstructure by optical and electron microscopy, determination of microhardness and obtaining its distribution in modified surfaces.

Subject of study: Processes for obtaining coatings on aluminium surfaces to increase wear resistance.

Practical significance of results. The results of the study can be used as a basis for obtaining wear-resistant coatings on aluminium alloy surfaces by electrospark alloying.

Keywords: coating, microstructure, nanostructure, aluminium, wear resistance.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	11
1.1 Критерії вибору технології модифікування алюмінієвих поверхонь	11
1.2 Мікродугове оксидування алюмінієвих сплавів	15
1.3 Плазмове нанесення покриттів на алюмінієві сплави	21
1.4 Зміцнення електроіскровим легуванням.....	28
1.5 Висновок	33
1.6 Мета та завдання дослідження.....	34
РОЗДІЛ 2 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	35
2.1 Вибір матеріалу дослідження.....	35
2.2 Технологія електроіскрового легування алюмінієвих сплавів.....	36
2.3 Устаткування та методика електроіскрової обробки	38
2.4 Металографічний аналіз	40
2.4 Електронно-мікроскопічні дослідження.....	41
2.5 Дослідження мікротвердості.....	43
2.6 Висновок	44
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	45
3.1 Склад і структура використаного електрод-інструменту	45
3.2 Особливості зміни мікроструктури і складу покриття при ЕІЛ.....	49
3.3 Висновок	52
РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	55
Висновок	58
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ.....	59
5.1 Правила по охороні праці при обробці металів. Загальні положення	59
5.2 Вимоги охорони праці у процесі гартування	61
5.3 Вимоги охорони праці у процесі поверхневої обробки	63

5.4 Вимоги охорони праці в процесі термообробки магнієвих та алюмінієвих сплавів, титану та його сплавів.....	66
5.5 Охорона довкілля	69
5.6 Висновок	72
ВИСНОВКИ.....	73
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	75

ВСТУП

Актуальність роботи. Алюмінієві сплави широко застосовують у машинобудуванні завдяки своїм властивостям: малій густині, високій питомій міцності, високій корозійній стійкості та технологічності при виготовленні деталей. Алюмінієві сплави добре штамнуються і легко обробляються різанням. Алюміній – найпоширеніший метал у природі, тому сировинні ресурси для його виробництва практично не обмежені та його застосування надалі лише розширюватиметься. Однак подальшому розширенню його застосування перешкоджають низькі твердість і зносостійкість поверхні деталей з алюмінієвих сплавів. Усунення цих недоліків пов'язане з поліпшенням кількості поверхневих шарів алюмінієвих деталей шляхом нанесення покриттів, які відповідають вимогам високої зносостійкості та не потребують складного і дорогого обладнання, приладів і витратних матеріалів. З відомих нині способів отримання товстошарових покриттів на алюмінієвих сплавах (аргонно-дугове наплавлення, мікродугове оксидування, іонна імплантація тощо) електроіскрове легування має незаперечні переваги перед описаними вище способами: простота як самого технологічного процесу, так і апаратного оформлення, висока адгезія, локальність обробки, екологічність процесу.

Мета роботи – встановлення закономірностей формування зносостійких покриттів на алюмінієвій підкладці методом електроіскрового легування, що забезпечують підвищення твердості та зносостійкості.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Провести аналіз відомих методів поверхневого зміцнення алюмінієвих сплавів, що забезпечують модифікацію їх структури, підвищення механічних та триботехнічних властивостей, та визначити напрямок досліджень у роботі.
2. Дослідити мікроструктуру і хімічний склад покриття та електродів залежно від параметрів електроіскрового легування.

3. На основі експериментальних досліджень розробити практичні рекомендації щодо призначення оптимальних технологічних режимів електроіскрового легування, що забезпечують зносостійкість пар тертя.

Методи дослідження: експериментальні дослідження мікроструктури методами оптичної й електронної мікроскопії, визначення мікротвердості та отримання її розподілу в модифікованих поверхнях.

Об'єкт дослідження – процеси одержання на алюмінієвих поверхнях покриттів для підвищення зносостійкості.

Предмет дослідження – закономірності формування структури та складу зносостійких покриттів, отриманих методом ЕІЛ.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дослідження можуть бути покладені в основу отримання зносостійких покриттів поверхонь з алюмінієвих сплавів, шляхом електроіскрового легування.

Ключові слова: покриття, мікроструктура, наноструктура, алюміній, зносостійкість.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Критерії вибору технології модифікування алюмінієвих поверхонь

Основні тенденції сучасного машинобудування спрямовані на підвищення продуктивності машин і механізмів за зменшення їхніх розмірів і маси. Одним із найприйнятніших способів є використання нових легких металів, таких як алюміній і його різні сплави. Завдяки малій питомій вазі і відносно високій міцності та невеликій вартості алюмінію, його застосування в машинобудуванні, останнім часом, стало досить поширеним. Володіючи низкою позитивних якостей, алюміній має і низку недоліків. Одним із найбільш значущих недоліків є його низька зносостійкість, що обмежує використання алюмінію у високошвидкісних механізмах і парах тертя [1]. На сьогоднішній день існує велике розмаїття методів поверхневої обробки і зміцнення алюмінієвих сплавів.

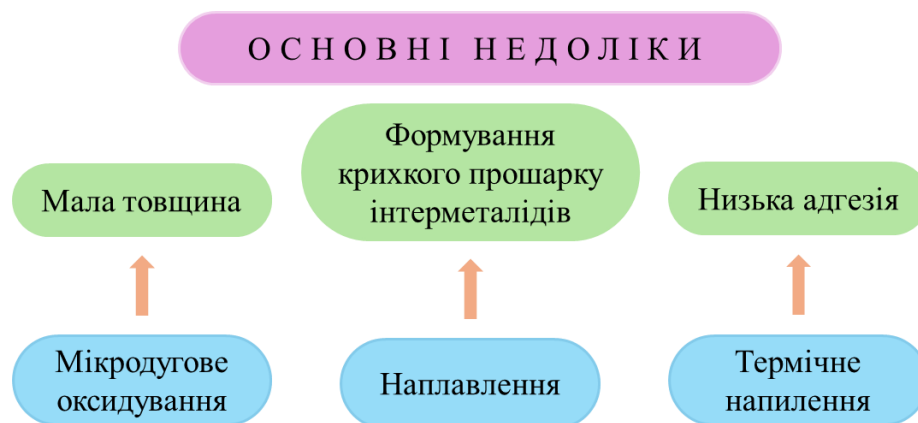


Рисунок 1.1 – Способи створення поверхневого шару на алюмінієвій основі

Основними способами захисту поверхонь із алюмінієвих сплавів є мікродугове оксидування, наплавлення і термічне напилення. Способи поверхневого зміцнення дають змогу розв'язувати проблему недостатньої

зносоустійкості алюмінієвих сплавів, проте кожна група має свої переваги та недоліки (рис. 1.1).

З наявних видів зносу виберемо знос при ковзанні та ударно-абразивний. У багатьох вузлах машин вони є основними. Нижче розглянуто їхні особливості та заходи протидії в рамках схеми рис. 1.1. У конкретному випадку сильного впливу інших видів зносу (кавітація, фретинг, втомний тощо) необхідно розробляти додаткові заходи підвищення стійкості.

Для підвищення стійкості до зносу при ковзанні й абразивного потрібно вирішувати проблеми:

- знос при ковзанні: поліпшення поверхневих властивостей, зниження схоплювання, підвищення адгезії поверхневого шару;
- ударно-абразивний: поліпшення поверхневих властивостей, підвищення втомної міцності, підвищення адгезії поверхневого шару.

З групи методів поверхневого зміцнення виберемо термічне напилення. У інших методів під час впливу на поверхню механічних навантажень є обмеження, які зумовлені їхніми фізичними особливостями:

- мікродугове оксидування дає змогу отримувати покриття товщиною 10-100 мкм, які можуть проминатися на відносно м'якій алюмінієвій основі;
- під час наплавлення відбувається утворення крихких інтерметалідних прошарків, за якими буде йти руйнування поверхневого шару;
- зняття/послаблення цих обмежень перебуває за рамками цієї роботи.

Для умов чистого тертя ефективно застосовувати надзвукове газоповітряне напилення (HVOF), яке дає змогу отримувати покриття твердістю до 71-73 HRC із продуктивністю розпилення до 30 кг/год [2].

Для ударно-абразивного зношування характеристики покриття мають задовольняти кільком умовам:

- шар повинен мати достатню товщину, щоб не пром'ятися під час впливу зовнішніх навантажень;
- шар повинен мати високу механічну міцність і зносоустійкість;
- висока адгезійна міцність;

- для найміцніших алюмінієвих сплавів - термічно зміцнених деформівних, типу Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu, Al-Mg-Si, - важливо не перегріти їх під час технологічної обробки вище за температуру знеміцнення, близько 180°C.

Умови щодо товщини, механічних характеристик шару, обмеження нагріву відносно просто задовольняються підбором розпилюваного матеріалу, режимів напилення.

Найскладніше забезпечити адгезійну міцність внаслідок особливостей оксидної плівки Al_2O_3 на алюмінії. Цей метал має велику спорідненість до кисню, що зумовлює швидке зростання товщини оксидної плівки. На алюмінії протягом перших секунд її товщина досягає певної величини, потім її зростання сповільнюється і припиняється після 70-80 діб (рис. 1.2).

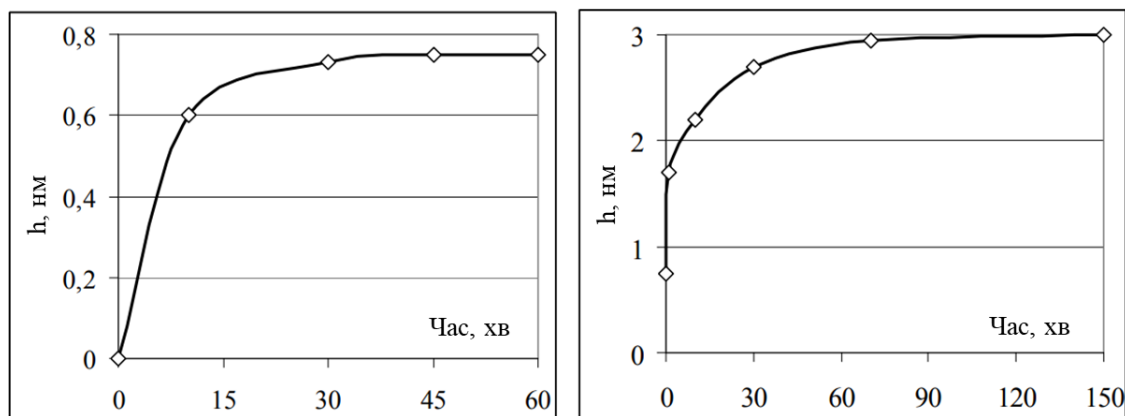


Рисунок 1.2 – Кінетика зростання природної оксидної плівки на Al за нормальних умов (h – товщина плівки, нм) [3]

Низка властивостей оксидної плівки [4, 5] ускладнюють і отримання високої адгезійної міцності між покриттям і Al основою:

- Температура плавлення більш ніж у 3 рази вища, ніж у алюмінію (рис. 1.3, а), що ускладнює її видалення.

- Під час нагрівання плівка схильна до утворення тріщин через велику різницю в коефіцієнтах термічного розширення (рис. 1.3, б). Це призводить до

прискорення зростання її товщини, особливо помітного за температур вище 500°C.

- Внаслідок малої різниці величини параметра кристалічної решітки, менше ніж 2 %, між оксидною плівкою та алюмінієм висока міцність зчеплення.

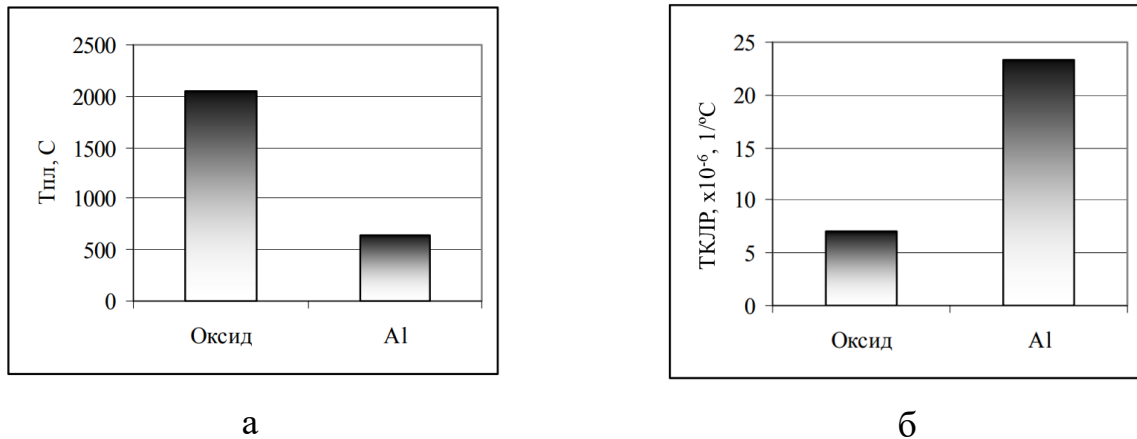


Рисунок 1.3 – Порівняння фізичних властивостей алюмінію та його оксиду (Al_2O_3): а – температур плавлення; б – температурного коефіцієнту лінійного розширення (ТКЛР)

Для зменшення впливу цих факторів було розроблено спеціальну технологію нанесення покриття на алюміній, що включає попереднє нанесення модифікованого ніхромового прошарку з модифікованим ніхромовим прошарком [6, 7]. Запропонована схема була реалізована способом активованої дугової металізації (АДМ), розробленим на основі моделювання процесу дугової металізації (ДМ). До відмінних особливостей АДМ належить спільне використання продуктів згоряння відновлювальних сумішей як транспортувального газу, певного взаємного розташування сопел і електродів, цілеспрямованого впливу на зону горіння дуги. АДМ-апарати вирізняються поліпшеними вихідними характеристиками порівняно з ДМ-апаратами. При цьому продуктивність, до 18 кг/год по сталі, і тепла ефективність процесу залишилися на рівні ДМ. Результати промислових випробувань показали, що для великої групи покриттів якість металевих зносостійких АДМ-покриттів одного рівня з плазмовими. АДМ обладнання і технології знайшли широке

застосування в різних галузях промисловості. Проведені дослідження показали, що на межах переходів у системі «сталеве покриття-підшар-основа» несущільності практично відсутні. Аналіз величини і складу перехідної зони на мікроаналізаторі Superprob-JXA-733 показав, що між алюмінієвою основою і ніхромовим прошарком присутня дифузійна зона, в якій поступово змінюється вміст елементів. Її величина перебуває в інтервалі 2-11 мкм. Це зумовило якісне підвищення, у 3-3,5 раз, адгезійної міцності покриття.

1.2 Мікродугове оксидування алюмінієвих сплавів

Одним із способів поверхневого зміцнення алюмінієвих сплавів є метод мікродугового оксидування (МДО), який дозволяє отримувати на деталях з вентильних металів (Al, Ti, Zr, Mg та ін.) та їх сплавів, керамічні покриття, що відрізняються високими ізоляційними, механічними, електро- та теплофізичними характеристиками та експлуатаційними властивостями, що зумовило широке використання цих покриттів у машинобудуванні, нафтогазовидобувній промисловості, на транспорті, приладобудуванні, радіоелектроніці, авіаційній та космічній та інших галузях.

Сутність МДО полягає в тому, що під дією високої напруги, що прикладається між деталлю, що знаходяться в електроліті, і електродом, на поверхні деталі виникають мігруючі точкові мікродугові розряди, під термічним, плазмохімічним і гідродинамічним впливом яких поверхневий шар деталі переробляється в керамічне покриття.

Процес МДО складається з декількох стадій, що послідовно протікають (див. рис. 1.4). Спочатку відбувається формування діелектричної плівки в безіскровому режимі, при цьому механізм процесу аналогічний традиційному анодуванню металів у водних електролітах, область 1 відповідає електрохімічним законам М. Фарадея, тому її частіше називають «фарадеевською областю». У іскровому режимі (область 2) на поверхні відбувається рівномірне світіння дрібних іскор, що переміщуються, в мікродуговому - переміщення більших жовточервоних розрядів, а при дуговому

режимі відбувається часткове руйнування покриттів. Причини переходу від однієї стадії процесу оксидування до іншої пояснюються змінами області об'ємного заряду в структурі покриття і змінами електричних і теплових параметрів здійснення мікроплазмових розрядів [8].

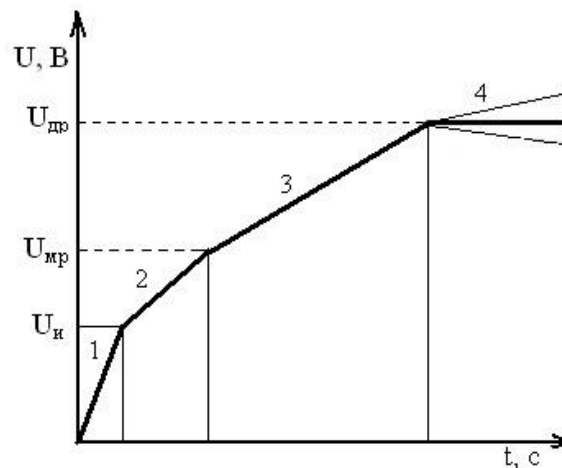


Рисунок 1.4 - Повна формувальна крива процесу МДО: 1 -анодування, 2 - іскріння, 3 - мікродуговий розряд, 4 - дуговий розряд [9]

До аналітичного опису зростання оксидних покриттів при МДО алюмінієвих сплавів застосовують різні підходи: засновані на класичних електрохімічних уявленнях або побудовані в рамках феноменологічної моделі, проте, через значну складність фізико-хімічних процесів, що протікають, досі відсутня загальноприйнята модель формування МДО-покриттів.

Думки про механізм та локальні місця мікроплазмових пробіїв у системі «метал – оксидна плівка – парогазова фаза – електроліт» суперечливі. Багато пропонованих теорій пробією і виникнення іскріння можна розділити на дві групи [10]: іонний пробій, причиною якого вважають впровадження в оксид іонів електроліту і відповідно локальне зростання його іонної провідності, і електронний пробій, причиною якого вважають «інжектування» електронів у зону провідності оксиду та електронну лавину, що виникає внаслідок ударної іонізації. Другої теорії дотримуються більшість дослідників.

На думку ряду дослідників, зростання покриття відбувається внаслідок протікання наступних процесів: взаємодія розплавленої речовини плівки в

каналах розряду з компонентами електроліту, подальше наплавлення та вбудовування дегідратованих аніонів [11]; плазмохімічний синтез, термічні або термоелектрохімічні перетворення компонентів плазми у каналах розряду [12]; електрохімічний механізм (анодування та електрофорез) [13].

Зазначимо, модельні ставлення до механізмі протікання процесу МДО, розроблені авторами робіт [14]. В основі механізму лежать такі положення:

- пробою парогазової фази, сформованої в наскрізних порах покриття;
- винесення плазми на поверхню каналів мікророзрядів;
- паралельно протікають процеси: екзотермічну взаємодію окислювачів з ювенільною поверхнею дна каналів мікророзрядів з наступним окисленням атомів металевих компонентів сплаву, що випаровуються; осадження на поверхні покриття або втягування в канали мікророзрядів оксидів після плазмо- та термохімічних перетворень складових електроліту.

Коректні модельні уявлення про механізм протікання МДО алюмінієвих сплавів можуть стати тим інструментом, який дозволить керувати цим процесом і отримувати покриття з необхідними властивостями.

У разі переходу на технологію МДО доцільним стає порівняння з існуючим еталоном виробництва, від якого бере свій початок МДО. Основною відмінністю процесу МДО від традиційного анодування, що дав йому початок, є використання енергії електричних розрядів, що мігрують по оброблюваній поверхні, зануреної в електроліт, які надають специфічний, плазмохімічний і гідродинамічний вплив на метал основи, саме покриття і електроліт, в результаті чого формуються керамікоподібні покриття з регульованими у широкому діапазоні елементним та фазовим складом, структурою та властивостями. У табл. 1.1 наведено порівняння традиційного анодування та МДО [15].

Таблиця 1.1

Порівняння технології МДО і традиційного анодування

Характеристики	Класичні анодні процеси у розчинах електролітів	МДО
Тип електроліту	кислотний	слаболужний
Екологічність	використання агресивних електролітів, потрібні складні очисні споруди	екологічність і неагресивність електролітів, не потрібні очисні споруди
Підготовки поверхневої деталі перед нанесенням покриття	численні етапи підготовки (травлення, знежирення), після кожного етапу трьохпромивання деталі	немає необхідності спеціальної попередньої підготовки поверхні (Електричний розряд сам проводить очищення поверхні, що обробляється)
Системи охолодження	використання складної дорогої системи охолодження в разі отримання зносостійких покриттів	можливість напівчення товстих (до 400 мкм) покриттів без застосування складного та екологічно шкідливого холодильного обладнання
Напруга,	10-30	100-300 і більше (до 1000 В)
Щільність струму, А/дм ²	до 10 (постійний струм)	20-100 (змінний та імпульсний)
Товщина, мкм	до 60	до 400
Твердість, ДПа	до 5-6	до 20-25

Поєднуючи в собі сутність процесу класичного анодування з позитивними технологічними особливостями, МДО дозволяє підняти якість захисних покриттів, що формуються, на більш високий рівень. В результаті аналізу технології отримання МДО було виділено переваги, пов'язані з особливостями:

- електроліту: мала концентрація, екологічність і неагресивність електролітів і самого процесу, оскільки у водний розчин вводяться відносно невеликі концентрації нетоксичних хімічних компонентів, можливість обробки складнопрофільних деталей завдяки високій здатності електроліту;
- здійснення технологічного процесу: відсутність необхідності ретельної попередньої підготовки поверхні деталі (травлення, знежирення, освітлення, промивок гарячою та холодною водою тощо) на початку технологічного ланцюжка, що сприяє мінімізації виробничих площ та скорочення часу технологічного процесу, стійкий, легко відтворюваний процес;
- обладнання: можливість отримання покриттів великої товщини без застосування складного холодильного обладнання, просте та легко кероване обладнання, можливість автоматизації технологічного процесу;
- властивостей одержуваних покриттів: можливість отримання багатофункціональних керамікоподібних покриттів, що характеризуються високими експлуатаційними характеристиками та володіють високою адгезією, обробка не змінює початкових розмірів деталі, оскільки покриття формується за рахунок перетворення поверхневого шару, стабільність характеристик покриттів.

При переході до цієї технології спостерігатиметься підвищення продуктивності праці та, відповідно, розшириться асортимент пропонованої високоякісної продукції за поступового зниження собівартості обробки порівняно з анодуванням. Однак, широкому застосуванню технології МДО у промисловості перешкоджають такі недоліки:

1. Підвищення продуктивності МДО обмежена високою енергоємністю процесу, оскільки при отриманні товстих покриттів задають або

більшу щільність змінного струму, або збільшують тривалість часу процесу МДО. Зменшити енерговитрати при отриманні мікродугових покриттів можливо, наприклад, за рахунок використання нових джерел живлення, технологічних прийомів, які б дозволили мінімізувати негативні наслідки напружених і супернапружених режимів, або розробки енергозберігаючих комбінованих режимів проведення МДО, що робить метод економічно ефективним.

2. Складність отримання рівномірних з необхідними товщиною і функціональними властивостями покриттів на всю або задану поверхню виробів складної геометричної форми, яку можна усунути шляхом застосування додаткових протиелектродів та діелектричних екранів або технології нанесення покриттів у проточному електроліті.

Поєднання високого рівня низки характеристик МДО-покриттів, багатофункціональності цих покриттів та переваг технології їх нанесення визначає можливість застосування модифікованих методом МДО деталей у різних галузях промисловості у різних вузлах обладнання. Виділимо основні напрямки, де МДО знаходить широке застосування:

1. Заміна важких металевих сплавів чи дорогих композитних матеріалів легкі метали (Al, Ti, Mg та його сплави та інших.) з МДО покриттями.

2. Нанесення керамічних покриттів методом МДО у кілька разів дозволяє підвищити термін служби деталей, зменшити виробничий шлюб та час на заміну зношених частин, а також розширити асортимент пропонованої високоякісної продукції. Ефективність технології МДО дозволяє розраховувати масштабне заміщення традиційних технологій обробки поверхні (гальваніка, анодування та інших.) на МДО, що забезпечує вищі фізико-механічні характеристики.

3. Технологія МДО дозволяє відновити зміни зношених деталей і значно підвищити довговічність відновлених деталей машин в сучасних умовах машинобудівного та ремонтного виробництва.

4. Зважаючи на широко регульовану пористість (розміри пір 0,01–10 мкм) шляхом управління режимами МДО та складами електролітів покриття може служити матрицею, на яку наносяться полімерні матеріали (фторопласти, поліаміди, лаки тощо), що в результаті дозволяє збільшити зносостійкість і корозійний захист основного матеріалу в десятки разів, а також може служити як підшар під подальше фарбування, при цьому покриття МДО забезпечує високоміцне зчеплення барвників з поверхнею деталі і підвищує її корозійну стійкість.

У машинобудуванні найчастіше МДО-покриття наносяться на пари тертя, підшипники ковзання, зубчасті передачі, поршні, циліндри, торцеві ущільнення для двигунів внутрішнього згоряння, верстатів та машин різного призначення в суднобудуванні, авіаційній промисловості, деталі для сільськогосподарської техніки та ін. Зміцнення деталей циліндропоршневої групи дає підвищення зносостійкості в 10-15 разів, зниження механічних витрат на 40-50%, маси, матеріаломісткості та теплонавантаженості, підвищення ККД на 2-15%. Крім кратного збільшення зносостійкості та напрацювання на відмову, використання алюмінієвих сплавів з МДО покриття істотно покращує динамічні характеристики рухомих деталей вузлів (алюміній легше сталі майже в 3 рази).

Області застосування МДО-покриттів та технології МДО не обмежуються наведеними прикладами, оскільки можливості методу досліджені ще не повністю, і номенклатура деталей із МДО покриттями постійно коригуватиметься і безсумнівно розширюватиметься.

1.3 Плазмове нанесення покриттів на алюмінієві сплави

Плазмове напилення як метод нанесення покриттів у машинобудуванні використовується з початку 1960-х років. Техніка та технології нанесення покриттів методом плазмового напилення, а також обладнання, що застосовується для цього, досить докладно описані в літературі [16]. Цей метод використовується як для нанесення власне покриттів різного призначення, так і для відновлення зношених поверхонь деталей машинобудівних виробів.

Використання плазмовонапиленних покриттів збільшує термін служби деталей (виробів) і надає їм нових якостей (підвищеної зносостійкості, жаростійкості, термобар'єрних властивостей, електроізоляційних властивостей та ін.). Метод дає змогу наносити на поверхні різних виробів (деталей) тугоплавкі метали та хімічні сполуки. При цьому покриття може мати таку товщину, за якої воно виступає вже не в ролі поверхневого шару, а виконує функцію самостійного виробу або деталі, отримання яких іншими способами неможливе або вкрай скрутне (вольфрамові сопла, тиглі, вироби з чистого оксиду алюмінію).

Процес формування покриттів і виготовлення виробів методом плазмового напилення полягає в пропущенні рухомих з високою швидкістю частинок корунду (альфа-модифікація оксиду алюмінію) через потік плазми та подальшому їхньому нанесенні на поверхню оброблюваної деталі (у разі нанесення покриття) або на поверхню формотворчої оправки, що обертається (у разі виготовлення виробу). Для реалізації методу плазмового напилення зазвичай використовують схему, наведену на рис. 1.5.

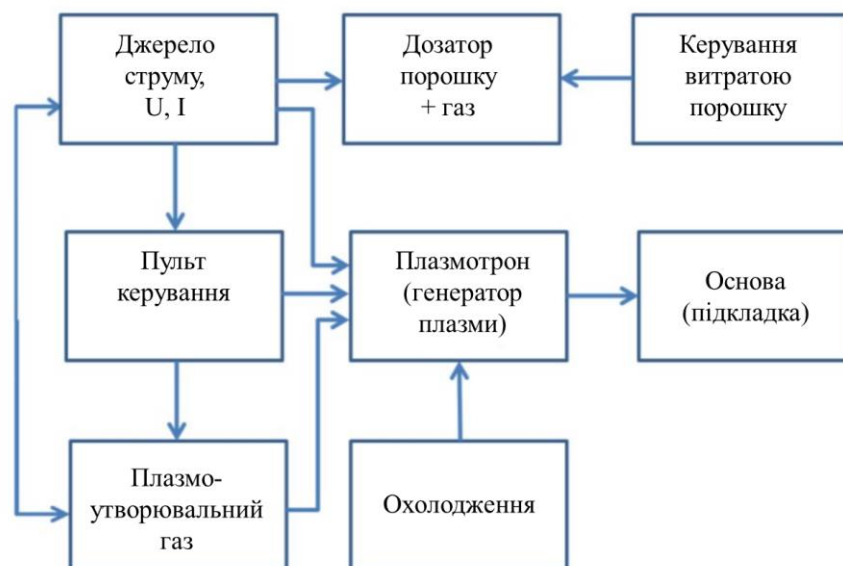


Рисунок 1.5 – Блок-схема процесу плазмового напилення [2]

Основа процесу плазмового нанесення - пластифікація порошку у високотемпературному джерелі тепла (ацетилено-кисневому полум'ї) і нанесення його газовими потоками на попередньо підготовлену зношену

поверхню. Технологія нанесення плазмового покриття полягає в тому, що в струмінь плазми подають деяку дозовану кількість металу, який розплавляється і, захоплений струменем, осідає на поверхні деталі. Як плазмоутворювальний газ під час напилення, в основному, застосовується аргон.

За цим способом напилені матеріали нагріваються енергією плазми, а нагрітий матеріал транспортується на напилювану поверхню продуктами розпаду плазми. Як відомо, плазма – це повністю або частково іонізований газ; температуру плазми визначає рівень іонізації. Для напилення використовують низькотемпературну плазму з електронною температурою $5-55 \cdot 10^3$ К. Характеристика плазмового потоку, якість покриттів значною мірою залежать від плазмотвірного газу. Різні гази та їх суміші, які використовують для напилення, вибирають виходячи з їх фізико-хімічних характеристик, інертності до матеріалів конструкції плазмотронів і напилюваних матеріалів, низької собівартості та дефіцитності. Для плазмового напилення використовують аргон, гелій, азот, водень, пропан-бутан, повітря та їх суміші. Вибирають гази за такими основними властивостями: густиною, в'язкістю, теплоємністю, коефіцієнтом теплопровідності та потенціалом іонізації, тому що ці властивості суттєво впливають на характеристику плазмового потоку. Так ККД нагрівання газу максимальний за високої теплопровідності плазмотвірного газу. Використання водню зумовлює найвищий ККД (80 %). Але водень в чистому вигляді не застосовують, оскільки воднева плазма агресивно діє на електроди плазмотрона, що різко знижує тривалість їх роботи. Із цієї ж причини не використовується в чистому вигляді і гелій.

Для збільшення ресурсу роботи плазмотронів використовують водневоазотну або воднево-аргонову суміш газів, які дозволяють отримати ККД 60 %. Об'ємна кількість водню в цих сумішах дорівнює 10 %. Щоб зменшити витрати у процесі напилення застосовують дешевші гази для плазмотворення. Це повітря з пропан-бутаном (10 %) та вуглекислотою. Але використання таких газів можливе лише у плазмотронах, деталі яких виготовлено з матеріалів з високою стійкістю до ерозії та окиснення.

Загальні вимоги до конструкції плазмотронів можна сформулювати як:

1. Тривала надійна генерація плазми з високим ККД перетворення первинної енергії на енергію плазми.
2. Висока надійність проти дії електроерозії та температури.
3. Досить довга зону взаємодії плазмового потоку з дисперсними частинками напилюваного матеріалу.
4. Можливість інтенсивної та ефективної передачі енергії напилюваному матеріалу.
5. Багаторазове надійне запалювання і стабільне функціонування дугового розряду в заданому діапазоні робочих струменів і напруг.

Найуразливішими деталями плазмотрона, які лімітують його роботу, є катод та анод. Тому їх виготовляють із високоерозійних, термостійких матеріалів, і вони обов'язково мають водяне охолодження.

Поліморфні перетворення оксиду алюмінію.

Відомо, що оксид алюмінію має цілу низку поліморфних модифікацій [17, 18]. Найпоширенішою модифікацією оксиду алюмінію є γ -оксид алюмінію - глинозем. Це найбільш хімічно активна модифікація оксиду алюмінію. Вона здатна спікатися і взаємодіяти з іншими речовинами з утворенням самостійних проміжних хімічних сполук. Будова γ - оксиду алюмінію близька до структури шпінелі та може містити у своєму складі водень і кисень. Доступність водню і кисню на поверхні оксиду й обумовлює високу хімічну активність γ - Al_2O_3 . Зазвичай глинозем отримують з його гідратів. Тригідрат глинозему (γ - $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), який має назву гідраргіліт (або гіббсит), є стійкою сполукою за температур, нижчих за $200\text{ }^\circ\text{C}$, але під час нагрівання втрачає частину хімічно зв'язаної води та перетворюється на моногідрат глинозему беміт (γ - $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). При подальшому нагріванні до температур вище $450\text{ }^\circ\text{C}$ відбувається дегідратація беміту з утворенням не водовмісного (безводного) глинозему (γ - Al_2O_3) і низки проміжних (перехідних) форм оксиду алюмінію, які в підсумку переходять у його єдину стійку форму - корунд (α - Al_2O_3). Послідовність поліморфних перетворень водовмісних модифікацій глинозему під час їхньої

дегідратації з утворенням проміжних форм оксиду алюмінію під час підвищення температури у вигляді схеми наведено на рис. 1.6.

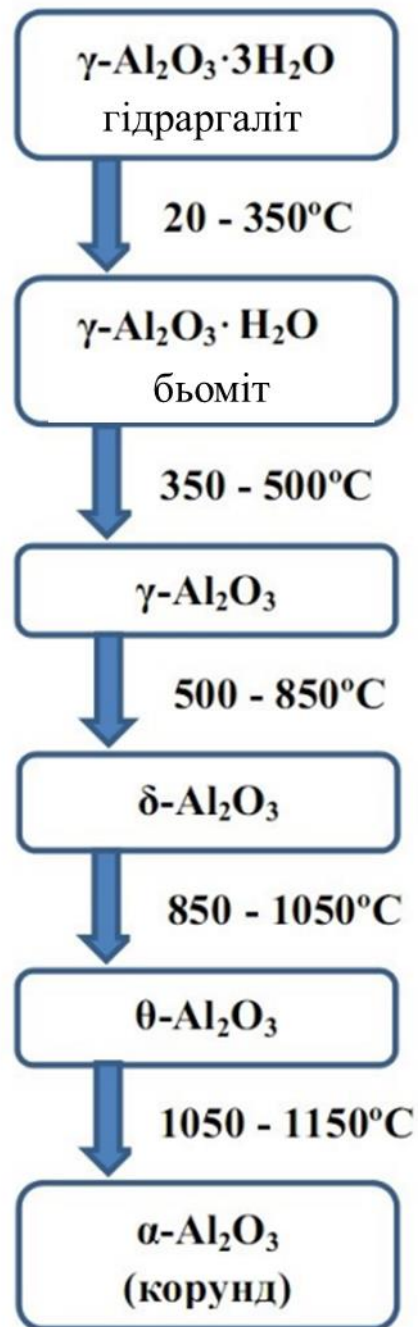


Рисунок 1.6 – Послідовність поліморфних перетворень водовмісних модифікацій глинозему під час нагрівання [19].

Після розплавлення в плазмі та подальшого затвердіння фазовий склад α - Al_2O_3 (корунду) змінюється. Залежно від типу охолоджувального середовища або теплопровідності матеріалу підкладки цей матеріал являє собою той чи

інший набір структурних модифікацій оксиду алюмінію. У всіх випадках, крім α -модифікації оксиду алюмінію (корунду), матеріал зразків містить й інші модифікації оксиду алюмінію, зокрема його γ - і δ -модифікації. Швидкість охолодження впливає на фазовий склад отриманого матеріалу, але вплив - це не великий. Зниження швидкості охолодження розплаву оксиду алюмінію призводить до незначного збільшення γ - і δ -модифікацій оксиду алюмінію в матеріалі зразків. Кількість α - Al_2O_3 при цьому трохи знижується.

Значні зміни фазового складу розплавленого α - Al_2O_3 (корунду) під час його затвердіння у воді пов'язані, імовірно, не зі швидкістю охолодження, а зі стабілізуючою дією води на γ -модифікацію оксиду алюмінію, як зазначалося в роботі [19].

Відомо, що α -модифікація оксиду алюмінію (корунд) є хімічно інертною фазою і не має високої адгезійної міцності зчеплення з напилюваною підкладкою. Напилений шар покриття утримується на підкладці виключно за рахунок сил механічної взаємодії з попередньо підготовленою поверхнею підкладки. Підготовка ця полягає в абразивній обробці поверхні підкладки або в обробці цієї поверхні іншими методами наведення достатньої шорсткості, наприклад лазерним скрабуванням. Одним із методів збільшення міцності зчеплення покриття з підкладкою є нанесення на поверхню підкладки спеціального прошарку з термореагуючих матеріалів на нікелевій або кобальтовій основі. Це дає змогу істотно підвищити адгезійну міцність, але значною мірою ускладнює і здорожує процес отримання зносостійких покриттів з оксиду алюмінію [20].

Для підвищення міцності зчеплення оксиду алюмінію з підкладкою необхідно підвищити його хімічну активність щодо матеріалу підкладки. Бажано, щоб матеріали підкладки і покриття під час зіткнення були здатні взаємно проникати один в одного і утворювати або тверді розчини, або хімічні сполуки.

Найбільш хімічно активною модифікацією оксиду алюмінію є γ - Al_2O_3 . Ця структурна модифікація містить у своєму складі воду. Під час нагрівання вода

дисоціює з утворенням атомів кисню і водню, які й зумовлюють високу хімічну активність цієї фази. Якщо матеріалом підкладки є сталь або інші сплави на основі заліза, то в присутність вологи на її поверхні утворюється тонкий шар оксидів заліза. При зіткненні з $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ оксиди можуть утворювати нові хімічні сполуки, когерентно пов'язані з матеріалом підкладки. У результаті адгезійна міцність зчеплення Al_2O_3 -покриття з підкладкою повинна істотно зрости. Цьому має сприяти вода, яку подають на напилювану поверхню підкладки для її охолодження. За даними [21] вода стабілізує γ модифікацію Al_2O_3 , сприяє її утворенню під час плазмового напилення. У присутності великої кількості води утворення хімічної сполуки між $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ та оксидом заліза полегшується і відбувається більш інтенсивно.

Функціональні покриття та вогнетривкі керамічні вироби різного призначення з чистого оксиду алюмінію можуть бути отримані методом плазмового напилення. Вихідний матеріал для здійснення плазмового напилення чистого оксиду алюмінію - альфа-модифікація оксиду алюмінію (корунд). Під час проходження через плазму і під час укладання на напилюваній поверхні фазовий склад частинок оксиду алюмінію змінюється. Відразу після завершення операції плазмового напилення фазовий склад матеріалу плазмово напиленого покриття або виробу являє собою набір модифікацій оксиду алюмінію. Здебільшого це α , γ і δ -модифікації оксиду алюмінію, що перебувають у різних співвідношеннях одна з одною. На співвідношення цих модифікацій впливають режими напилення, температура напилюваної поверхні, наявність води в зоні напилення, товщина покриття. Збільшення у складі матеріалу покриття хімічно активної γ модифікації оксиду алюмінію призводить до значного збільшення адгезійної міцності зчеплення матеріалу покриття з матеріалом напилюваної сталевий поверхні. Ефект досягається завдяки утворенню шпінелеподібних хімічних сполук на межі покриття-підкладка внаслідок хімічної взаємодії γ -модифікації оксиду алюмінію з оксидами заліза, що утворюються внаслідок активної подачі води в зону напилення.

1.4 Зміцнення електроіскровим легуванням

Електроіскрове легування металевих поверхонь ґрунтується на явищі електричної ерозії та перенесення матеріалу анода (інструменту) на катод (деталь) під час протікання імпульсних розрядів у газовому середовищі [22, 23]. Під час електроіскрового легування еродований матеріал електрода-анода переноситься на електрод-катод, а матеріал катода - на анод, причому, як встановлено численними експериментами, переважному руйнуванню і перенесенню піддається матеріал анода. Важливим елементом електроіскрової обробки матеріалів у газовому середовищі є вміння керувати процесом обробки та прогнозувати властивості покриття: товщину, мікро- і макроструктуру, фізико-механічні властивості (зносостійкість, корозійну стійкість, опір втомлюваності тощо).

На даному етапі накопичено великий експериментальний досвід з отримання за допомогою електроіскрового легування покриттів різного типу. Однак досі узагальнюючої теорії електроіскрового легування, що дає змогу прогнозувати властивості покриттів, не створено. Це пов'язано з тим, що математичний опис процесу є винятково складним через наявність великої кількості параметрів, що діють різноспрямовано. До таких параметрів належать матеріали катода й анода, склад газового середовища, частота, шпаруватість та амплітуда струмів іскрового розряду, амплітуда та частота вібрації електрода, поява вторинних фаз на катоді й аноді, величина міжелектродного проміжку тощо.

Автори методу електроіскрової обробки подружжя Б. Р. Лазаренко і М. І. Лазаренко визначили електричну ерозію як фізичне явище, що полягає в спрямованому викиді матеріалу електродів під впливом електричного розряду, що протікає між ними. Найповніше фізична модель процесу електроіскрового легування була викладена в роботі основоположників методу Б.Р. Лазаренка, Н.І. Лазаренка [24]. Сутність моделі полягає в тому, що при зближенні електродів напруженість електричного поля між ними збільшується. При досягненні певної величини напруженості поля відбувається пробій проміжку

між електродами, в результаті чого з'являється канал наскрізної провідності. Через канал, що виникає, потік електронів спрямовується до анода, а потік іонів рухається до катода. Потік електронів фокусовано вдаряється об тверду металеву поверхню анода, внаслідок чого відбувається їх гальмування з виділенням великої кількості тепла. Від анода, внаслідок миттєвого розігріву, відділяється крапля розплавленого металу і рухається до катода, випереджаючи анод. Оскільки енергія від джерела живлення підводиться до розрядного проміжку у вигляді імпульсу, щільність струму значно перевершує критичні значення. Крапля, що летить від анода, нагрівається до високої температури, закипає і вибухає. У результаті цього частинки летять до катода широким фронтом.

Досягнувши катода, розплавлені частинки анода зварюються з ним і частково впроваджуються в його поверхню. Частинки під час польоту до катода перебувають у зіткненні з навколишнім каналом газом і, взаємодіючи з ним, можуть утворювати оксиди, нітриди тощо. Тому їхній хімічний склад може істотно відрізнятися від складу анода. По утвореному скупченню частинок на катоді вдаряє рухомий слідом за електронами анод, проковуючи отримане покриття. У результаті удару збільшується щільність і однорідність покриття. Під час контакту електродів проходить наступний імпульс струму, викликаючи прогрівання поверхневого шару катода і зварювання частинок між собою. При цьому прогріванні поверхневого шару відбувається дифузія частинок анода в глибину поверхневого шару катода. Як наслідок, між частинками анода і матеріалом катода можливі хімічні реакції, що також змінюють склад покриття. У наступній фазі анод піднімається вгору і цикл повторюється. На поверхні катода залишається покриття, міцно з'єднане з ним за рахунок дифузії. Під час руху анода на катоді утворюється сукупність гребенів і западин, яка визначає шорсткість і суцільність обробленої методом електроіскрового легування поверхні. Особливістю даної, суто якісної моделі є твердження про те, що частинки переносяться тільки в рідинно-крапельній

фазі, що розходиться з думкою інших дослідників процесу електроіскрового легування [25].

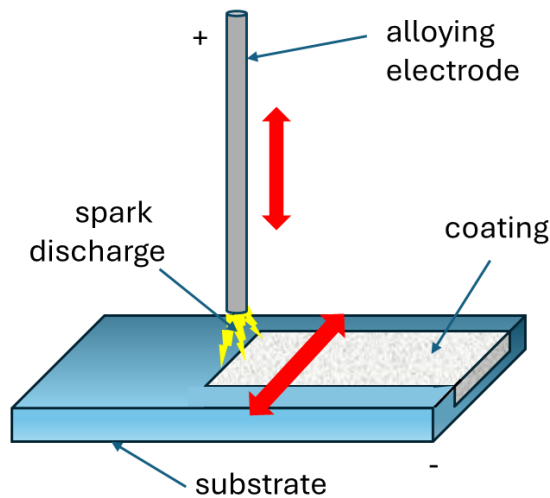


Рисунок 1.7 – Схема електроіскрового легування

Модель А.Д. Верхотурова відрізняється від моделі Лазаренка Б.Р. і Лазаренка Н.І. урахуванням явищ, що відбуваються в поверхневих шарах анода і катода:

- перенесення матеріалу катода на анод відбувається не тільки в рідкій, а й у паровій і твердій фазах;
- наявність у місцях сфокусованої дії електроіскрових імпульсів трьох зон: зона випаровування, зона плавлення і зона напруженого стану;
- «схоплювання» матеріалів катода і анода під час їхнього контакту;
- утворення на катоді мікротрощин, в якій відбувається фізико-хімічна взаємодія частинок анода і катода, що призводить до зміни їхнього хімічного складу;
- обмеження товщини легovanого шару.

До останнього часу не існувало єдиної думки щодо агрегатного стану продуктів ерозії матеріалу анода, що переносяться на катод. Припускали перенесення в рідкій фазі, у рідкій і газовій фазі одночасно [26]. Але крім того, дослідження показують, що перенесення може відбуватися у твердій фазі в результаті крихкого руйнування матеріалів електродів [23]. У деяких випадках

експериментально спостерігалася залежність ерозійної стійкості від фізико-хімічних властивостей матеріалу (температури плавлення, кипіння, теплоти сублімації), а також сил міжатомного зв'язку (модуль пружності). Робилися неодноразові спроби встановити зв'язок ерозії з однією із зазначених властивостей, або з їхнім комплексом [27]. Такий зв'язок передбачає визначення критеріїв ерозійної стійкості і відповідні цим критеріям ряди металів. Розташування металів за цим принципом ігнорує вплив структурних чинників на ерозію і дає змогу безпосередньо пов'язати ерозійну стійкість матеріалів з особливостями їхньої електронної будови, що є коректним лише в разі еродування речовини в газовій і рідкій фазах.

У процесі електроіскрового легування поверхня електрода піддається локальній дії високих тисків і температур: тиск ударної хвилі становить $2-7 \cdot 10^6$ Па, температура нагріву поверхневих мікрооб'ємів досягає $5-7 \cdot 10^3$ К, тобто значно перевершує температуру кипіння електродних матеріалів. При цьому висока швидкість тепловідведення призводить до того, що в межах невеликої товщини шару (порядку декількох або десятків мікрометрів) температура швидко падає до температур плавлення і відповідних фазових перетворень матеріалів. Унаслідок цього в легованому шарі інтенсифікуються мікрометалургійні процеси (дифузія, хімічна взаємодія), виникають також і фазові перетворення, що призводить до утворення вкрай нерівноважних структур з дуже дрібним зерном, високою гетерогенністю за складом, структурою і властивостями.

1. Багаторазова дія іскрових розрядів призводить до припинення зростання товщини легованого шару. Основними причинами, що спричиняють зупинку зростання товщини є [28]:

- накопичення внутрішніх напружень, зокрема завдяки утворенню в покритті нових фаз із різним коефіцієнтом термічного розширення;
- збільшення термовтоми покриття як результат багаторазових циклів нагрівання та охолодження його мікрооб'ємів;
- утворення ультрадисперсної структури.

Під час електроіскрового легування під впливом імпульсних розрядів на оброблюваній поверхні утворюється змінений поверхневий шар. Якісні та кількісні характеристики отриманого шару залежать від багатьох чинників: природи і матеріалу електрода, характеристик імпульсного розряду, тривалості обробки, газового середовища міжелектродного проміжку тощо.

Механізм утворення поверхневого шару відбувається таким чином. Під час одиничного розряду на поверхні катода утворюється лунка, з піднятими над поверхнею краями в результаті викиду електронів під час впливу на катод імпульсів електричного струму [26].

Розміри лунок залежать від ерозійної стійкості матеріалів електродів і енергії електричного імпульсу. У разі багаторазової дії імпульсів в одну точку на катоді утворюється замість шару матеріалу, що переноситься, сильно збільшена в розмірах лунка, що призводить до необхідності постійного переміщення електрода, що легує (анода), уздовж оброблюваної поверхні. Якщо швидкість переміщення електрода така, що до моменту наступного імпульсу електрод встигне зміститися на діаметр лунки, то поверхня катода після одноразового проходу електрода матиме зубчастий профіль, у якому зубці утворені краями сусідніх лунок. У разі зміщення точки докладання подальшого імпульсу на величину меншу, ніж діаметр лунки, розряд протікатиме через найбільш виступаючу частину поверхні, тобто край лунки, утвореної попереднім розрядом. При цьому частина металу з краю лунки переміститься до її центру. Таким чином, на катоді одночасно з утворенням легуваного шару відбуватиметься переміщення розплавлених і розм'якшених зон матеріалу електродів. Встановлено [26], що якщо контактувальна площа анода більша за площу утвореної лунки, то найякісніший шар отримують у разі зміщення електрода на $1/4$ діаметра лунки.

Вивчення поодиноких слідів розрядів у середовищі повітря, що залишаються окремими каналами іскри на поверхні монокристалів, показує, що за одну напівхвилю струму розряд залишає багато поодиноких слідів на поверхні металу. При цьому спостерігається один і той самий характер зміни

поверхні анода - оплавлення і пластична деформація оплавленої і прилеглої до неї зони. Оплавлена одинична лунка на аноді має форму правильного кола і практично не залежить від кристалографічного орієнтування зерен металу. Зона пластичної деформації поширюється за межі ділянки, ураженої розрядом, і має такий вигляд, як якби деформація проводилася зосередженим механічним навантаженням.

1.5 Висновок

1. Розглянуті особливості використання алюмінієвих сплавів для виготовлення деталей машин. Завдяки малій питомій вазі і відносно високій міцності та невеликій вартості алюмінію, його застосування в машинобудуванні, останнім часом, стало досить поширеним. Володіючи низкою позитивних якостей, алюміній має і низку недоліків. Одним із найбільш значущих недоліків є його низька зносостійкість, що обмежує використання алюмінію у високошвидкісних механізмах і парах тертя.

2. Основними способами захисту поверхонь із алюмінієвих сплавів є мікродугове оксидування, наплавлення і термічне напилення. Способи поверхневого зміцнення дають змогу розв'язувати проблему недостатньої зносостійкості алюмінієвих сплавів.

3. Розглянутий спосіб поверхневого зміцнення алюмінієвих сплавів - мікродугове оксидування (МДО), який дозволяє отримувати на деталях з вентильних металів (Al, Ti, Zr, Mg та ін.) та їх сплавів, керамічні покриття, що відрізняються високими ізоляційними, механічними, електро- та теплофізичними характеристиками та експлуатаційними властивостями.

4. Розглянутий спосіб формування покриттів і виготовлення виробів методом плазмового напилення алюмінієвих сплавів. Він полягає в пропущенні рухомих з високою швидкістю частинок корунду (альфа-модифікація оксиду алюмінію) через потік плазми та подальшому їхньому нанесенні на поверхню оброблюваної деталі (у разі нанесення покриття) або на поверхню формотворчої оправки, що обертається (у разі виготовлення виробу).

5. Запропонований метод поверхневої модифікації алюмінієвих сплавів - електроіскрове легування, який ґрунтується на явищі електричної ерозії та перенесення матеріалу анода (інструменту) на катод (деталь) під час протікання імпульсних розрядів у газовому середовищі. Важливим елементом електроіскрової обробки матеріалів у газовому середовищі є вміння керувати процесом обробки та прогнозувати властивості покриття: товщину, мікро- і макроструктуру, фізико-механічні властивості (зносостійкість, корозійну стійкість, опір втомлюваності тощо).

6. На основі літературного огляду запропоновані мета та задачі дослідження.

1.6 Мета та завдання дослідження

Результати попередніх досліджень і проведений аналіз стану проблеми підвищення надійності та довговічності деталей з алюмінієвих сплавів дозволяє сформулювати мету та завдання дослідження.

Мета роботи – встановлення закономірностей формування зносостійких покриттів на алюмінієвій підкладці методом електроіскрового легування, що забезпечують підвищення твердості та зносостійкості.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Провести аналіз відомих методів поверхневого зміцнення алюмінієвих сплавів, що забезпечують модифікацію їх структури, підвищення механічних та триботехнічних властивостей, та визначити напрямок досліджень у роботі.

2. Дослідити мікроструктуру і хімічний склад покриття та електродів залежно від параметрів електроіскрового легування.

3. На основі експериментальних досліджень розробити практичні рекомендації щодо призначення оптимальних технологічних режимів електроіскрового легування, що забезпечують зносостійкість пар тертя.

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір матеріалу дослідження

У сучасних машинах різних видів машинобудування дедалі ширше застосовують деталі з алюмінієвих сплавів [29]. Тільки за останні 10 років застосування алюмінієвих сплавів у машинобудуванні збільшилося більш ніж у 3 рази [30]. В автомобільному транспорті застосовуються десятки найменувань деталей з алюмінієвих сплавів: головки і блоки циліндрів двигунів, картери рульових механізмів, корпуси водяних насосів і компресорів, картери зчеплення, поршні двигунів, кришки генераторів, кронштейни, радіатори двигунів і кондиціонерів тощо. Більшу частину алюмінієвих деталей виготовляють методом лиття зі сплавів типу алюміній – кремній (тобто із силумінів) марок АЛ2, АЛ9, ВАЛ5 тощо. Меншою мірою використовуються сплави типу алюміній-мідь (АЛ19), алюміній – кремній – мідь (АК5М2) і алюміній-магній (АЛ8). Алюмінієві сплави, особливо силуміни, вирізняються хорошими ливарними властивостями, корозійною стійкістю, хорошою оброблюваністю різанням і тому застосовуються для виготовлення складних деталей середньої навантаженості. Алюмінієво-магнієві сплави мають високу міцність - до 500 МПа, але схильні до корозії, тому їх додатково потрібно покривати захисними покриттями.

Крім ливарних, у машинобудуванні знайшли застосування і алюмінієві сплави, що деформуються: АК4, АК6, АК8 (поршні двигунів), АМц і АМг (трубки для радіаторів), Д1-Д16 (дуралюміні – поковки для деталей), які зазнають високих навантажень, це несучі кронштейни, корпуси та ін.

Розширення застосування алюмінієвих сплавів зумовлене їхніми перевагами [31]: малою питомою вагою, високою питомою міцністю, гарною корозійною стійкістю, високою тепло- і електропровідністю тощо. Велике значення має здатність алюмінієвих сплавів до формозміни: вони добре відливаються, прокатуються, штамнуються, добре обробляються різанням. При

цьому сировинні ресурси для виробництва алюмінію практично необмежені, оскільки він є найпоширенішим металом у природі. Тому можна припустити, що в майбутньому його застосування буде тільки розширюватися.

Розширенню сфери використання алюмінієвих сплавів для виготовлення пар тертя перешкоджають невисокі експлуатаційні властивості - низька твердість і зносостійкість поверхні [32]. Усунення цих недоліків пов'язане з поліпшенням складу і якості поверхневих шарів виробів шляхом застосування сучасних методів зміцнення за рахунок поверхневої обробки алюмінієвих сплавів.

Надійність роботи більшості машин, зокрема й сільськогосподарського призначення, безпосередньо пов'язана з якістю поверхневого шару деталей, яка характеризується геометричними та фізико-механічними параметрами. Від якості поверхневого шару залежать експлуатаційні властивості - зносостійкість, корозійна стійкість, опір втоми тощо. Зв'язок характеристик якості поверхневого шару з експлуатаційними властивостями деталей свідчить про те, що оптимальна за якістю поверхня має бути досить твердою, мати дрібнодисперсну структуру, згладжену форму мікронерівностей з великою площею опорної поверхні. Для отримання поверхні такого роду на деталях різного призначення, що зазнають стираючих і ударних навантажень, розробляють різні процеси зміцнювальної технології, набувають дедалі більшого розвитку методи поверхневого легування та модифікування.

2.2 Технологія електроіскрового легування алюмінієвих сплавів

Нині з великої кількості методів поверхневого зміцнення за низкою параметрів найефективнішим є електроіскрове легування, яке дає змогу одержувати на поверхні алюмінієвих деталей покриття з різних матеріалів у доволі простий спосіб, як у технологічному відношенні, так і в апаратному оформленні, що є його великою перевагою. Іншими суттєвими перевагами електроіскрового легування є: висока адгезія покриття з основою, можливість локального оброблення поверхні, відсутність потреби в попередній підготовці

поверхні та екологічність процесу. Висока адгезія покриття, отриманого методом електроіскрового легування, до підкладки пояснюється тим, що електроіскрове легування - процес дифузійний, тобто атоми покриття дифундують у підкладку і відрив покриття від підкладки практично неможливий.

Однак спосіб електроіскрового легування, як і інші способи зміцнення, має недоліки, які обмежують сферу його застосування:

- висока шорсткість поверхні ($Ra \approx 20\text{мкм}$);
- мала товщина одержуваного покриття ($t \leq 0,2\text{ мм}$) [33].

Шорсткість покриття можна знизити механічною обробкою: шліфуванням, поліруванням, розкаткою, алмазним вигладжуванням тощо.

Останнім часом збільшується кількість досліджень, присвячених отриманню на сталевих поверхнях за допомогою електроіскрового легування нанопокриттів [23] або наноструктуруванню їхніх поверхонь [34], що дає змогу значно поліпшити фізико-механічні властивості поверхні сталевих деталей. Поява наноструктур і нанокристалів у поверхневому шарі покриття на сталі дає змогу 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 їхньої зносостійкості.

Значно меншою мірою досліджено процес отримання нанопокриттів і наноструктурування поверхні алюмінієвих сплавів, зокрема, алюмінієво-мідних сплавів типу дуралюмінів, що широко застосовуються в промисловості [35]. Здебільшого ведуться дослідження властивостей поверхневих шарів алюмінієвих сплавів при введенні в них нанопорошків способом електроіскрового легування [36]. При електроіскровому легуванні поверхні литих деталей з алюмінієво-кремнієвих сплавів (АК12, АК9) із застосуванням в електродах ультрадисперсних порошоків отримано позитивні результати: твердість поверхні збільшилась удвічі, а її зносостійкість - утричі [37]. Однак при цьому слід враховувати значне подорожчання технології, оскільки 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 винятково важливим, оскільки дає змогу відкрити нові можливості для застосування цих сплавів у вузлах тертя з використанням покриття, отриманого методом електроіскрового легування, і розширити сферу їх застосування в машинобудуванні.

2.3 Устаткування та методика електроіскрової обробки

Електроіскрова обробка виконувалося на установці моделі ALIER-31. Для ЕІЛ також можна використовувати установку Елітрон-52А (рис. 2.1). До таблиці 2.1 занесені режими роботи цієї установки.

Як оброблювальні електроди використовували стрижні діаметром 8 мм, відлиті з антифрикційного сплаву Al-Sn (АО20-1). Згідно [38] з сплав містить 17÷23% Sn; 0,7÷1,2% Cu; 0,02÷0,2% Ti; решта – алюміній.



Рисунок 2.1 – «Елітрон-52А» для ЕІЛ

Таблиця 2.1

Режими роботи установки моделі «Елітрон-52А»

Тип генератору	Номер режиму	Ємність, С, мкФ	Напруження, U, В	Енергія розряду, W _p , Дж
Транзисторно-теристорний (ТТ)	1	120	35	0,05
	2		75	0,20
	3		100	0,36
	4	300	35	0,11
	5		75	0,60
	6		100	0,90
	7	1560	35	0,60
	8		75	2,6
	9		100	4,60
RC	10	480	80	0,90
	11		95	1,30
	12		110	1,70
Суміщення ТТ+RC	13	120+480	80+100	1,3
	14	300+480	95+100	2,2
	15	1560+480	110+100	6,8

В якості підкладки використовувалися зразки, виготовлені з листа сплаву Д1 (ГОСТ4784).

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

- для забезпечення однакових умов проведення процесу електроіскрового легування технологічні зразки застосовували тільки одного розміру і не проходили жодної спеціальної підготовки поверхні (миття, знежирення тощо);
- швидкість переміщення обробного електрода обиралася такою, щоб загальний час обробки становив ~ 4 хв/зразок;
- електрод тримався перпендикулярно щодо оброблюваної поверхні. Допускався нахил не більше $10 \div 15^\circ$;
- при зношуванні кінця електрода форма періодично відновлювалася шляхом його правки;
- швидкість переміщення електрода підтримувалася рівномірною. Покриття наносилося смугами. Обробний 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 під час відриву обробного електрода від зразка виникає сильне іскріння, яке призводить до місцевої ерозії оброблюваної поверхні (у вигляді лунки), і до зміни параметрів привісу (або виносу) як технологічного зразка, так і обробного електрода.

2.4 Металографічний аналіз

Аналіз мікроструктури металів і сплавів є невід'ємною частиною металургійної експертизи. Він дає змогу дати відповіді на безліч запитань, що стосуються виявлення в металі внутрішніх дефектів, неприпустимих структурних складових, слідів термообробки та пластичної деформації, а також наявності або відсутності поверхневих шарів. Інформація за всіма перерахованими факторами формує загальну картину про якість досліджуваного матеріалу [39].

Найпоширенішим і найдоступнішим методом дослідження мікроструктури є оптична мікроскопія, що дає змогу використовувати збільшення до 1000 крат. Цей метод дослідження потребує спеціальної підготовки зразка - виготовлення мікрошліфа, який полягає в [40]:

- отриманні дзеркальної поверхні шляхом послідовних етапів шліфування та полірування від паперу з грубим зерном до велюрової тканини з частинками полірувальної суспензії розміром 0,5 мкм;

- виявленні мікроструктури шляхом хімічного або електролітичного травлення.

Нині процес приготування мікрошліфів у більшості лабораторій автоматизований. Це досягається, по-перше, наданням зразкам уніфікованої форми за допомогою заливки епоксидною або фенольною смолою, по-друге, пневматичними притискними тримачами шліфувально-полірувальних машин. Електронне управління цих машин дає змогу встановлювати необхідні

притискну силу, швидкість і час обертання, рівень подачі води або полірувальної суспензії.

Дзеркальна відполірована поверхня шліфа дасть змогу оцінити лише присутність у зразку неметалевих включень, пір або мікротріщин і, в рідкісних випадках, шар іншого металу на поверхні.

Оцінка мікроструктури неможлива без її попереднього виявлення. Для цього використовують спеціально підібрані реактиви, склад яких залежить від:

- складу металу;
- типу виявленої структури;
- завдань подальшого металографічного аналізу (розмір зерна, об'ємна частка фаз).

Основні методи виявлення мікроструктури:

- хімічне травлення;
- електрохімічне травлення;
- теплове травлення;
- травлення в солях за підвищених температур.

Під час хімічного травлення поверхня мікрошліфа піддається впливу реактивів за заданої температури. При цьому виявлення виконують різними способами: зануренням зразка в реактив, змочуванням поверхні мікрошліфа і втиранням реактиву в поверхню шліфа.

Під дією хімічних реагентів у чистих металах і однофазних сплавах насамперед виявляються межі зерен. Для виявлення ліній зсуву, двійників тощо необхідне більш тривале та інтенсивне травлення. Розчинення відбувається і на поверхні зерен, але його швидкість значно нижча, ніж на межах.

Після травлення через втрату відбитого світла в заглибленнях між зернами межі зерен видно тонкими темними лініями.

2.4 Електронно-мікроскопічні дослідження

Основною характеристикою мікроскопа є роздільна здатність. Під фізичною роздільною здатністю мікроскопа мається на увазі мінімальна

відстань між двома об'єктами, за якої вони помітні на зображенні. Якщо відстань між об'єктами менша, ніж роздільна здатність мікроскопа, то об'єкти зливаються в один.

Сканувальний електронний мікроскоп – це прилад, призначений для отримання збільшеного зображення об'єкта шляхом сканування об'єктом сфокусованим пучком електронів і реєстрації детектором сигналу, що виникає в результаті взаємодії електронів з речовиною.

Принципова схема скануючого електронного (рис. 2.2) мікроскопа включає джерело електронів, оптичну систему для фокусування електронів і сканування (електронну колону), камеру зі зразком і детектори для реєстрації сигналу, а також систему відкачування, необхідну для створення вакууму в мікроскопі. Необхідно пам'ятати, що у повітрі електрон зможе долетіти від джерела до зразка, так як зіткнеться з молекулами повітря на своєму шляху, тому вакуум у гарматі, колоні та камері мікроскопа є необхідною умовою для роботи мікроскопа.

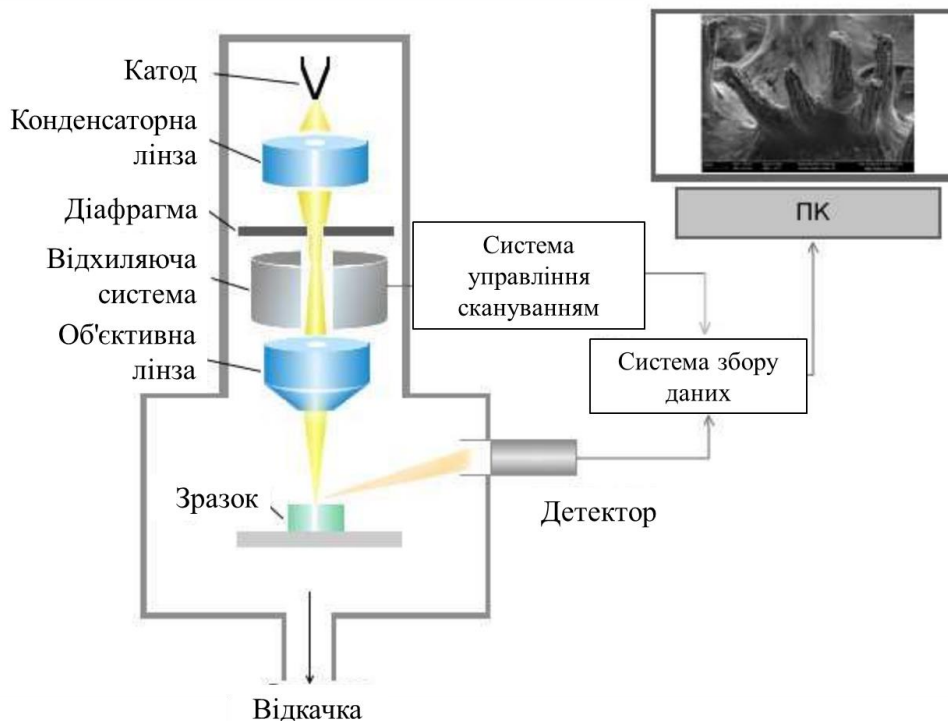


Рисунок 2.2 – Принципова схема СЕМ [40]

Електронно-мікроскопічні дослідження зразків були проведені за допомогою скандувального електронного мікроскопа SEO-SEM Inspect S50-B, оснащеного енергодисперсійним спектрометром AZtecOne з детектором X-MaxN20 (виробник Oxford Instruments plc).



Рисунок 2.4 – Фото скандувального електронного мікроскопа SEO-SEM Inspect S50-B

2.5 Дослідження мікротвердості

Для вимірювання мікротвердості використовуючи твердомір ПМТ-3 [41].

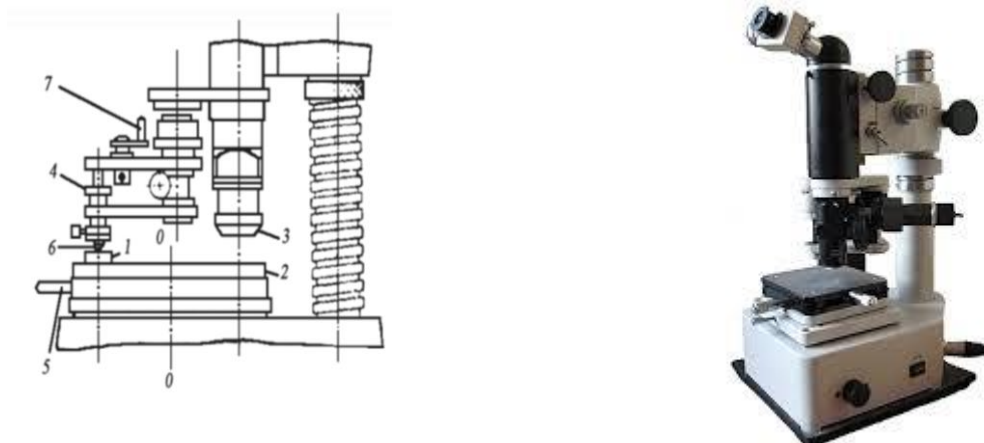


Рисунок 2.4 – Твердомір ПМТ-3: а – схема: 1 – зразок (шліф); 2 – предметний столик; 3 – об'єктив; 4 – вага; 5 – рукоятка предметного столика; 6 – алмазна піраміда; 7 – рукоятка аретира; б – фото

2.6 Висновок

У розділі була розглянута методика та матеріали для дослідження.

Нині з великої кількості методів поверхневого зміцнення за низкою параметрів найефективнішим є електроіскрове легування, яке дає змогу одержувати на поверхні алюмінієвих деталей покриття з різних матеріалів у доволі простий спосіб, як у технологічному відношенні, так і в апаратному оформленні, що є його великою перевагою. Залишаються не визначеними параметри ЕІЛ для отримання нанопокриттів і наноструктурування поверхні алюмінієвих сплавів, зокрема, алюмінієво-мідних сплавів типу дуралюмінів, що широко застосовуються в промисловості.

В розділі запропоновано у якості підкладки використовувати дюралюмін марки Д1, електроіскрову установку, режими обробки, технологію проведення ЕІЛ у ручному режимі. У якості методів дослідження представлений опис методик металографічного аналізу, електронно-мікроскопічних досліджень, визначення мікротвердості.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Склад і структура використаного електрод-інструменту

На рис. 3.1 наведено діаграму стану подвійної системи Al-Sn [42]. Видно, що при кімнатній температурі (до температури плавлення олова - 228°C) матеріал, що використовується як електродний матеріал (AlSn20), повинен являти собою алюмінієву матрицю з диспергованим у ній металевим оловом. Це підтверджується результатами металографічного аналізу (рис. 3.2), скануючої електронної мікроскопії та EDX-елементного аналізу (рис. 3.3), а також сканування поверхнею зразка з одночасним визначенням алюмінію та олова (рис. 3.4).

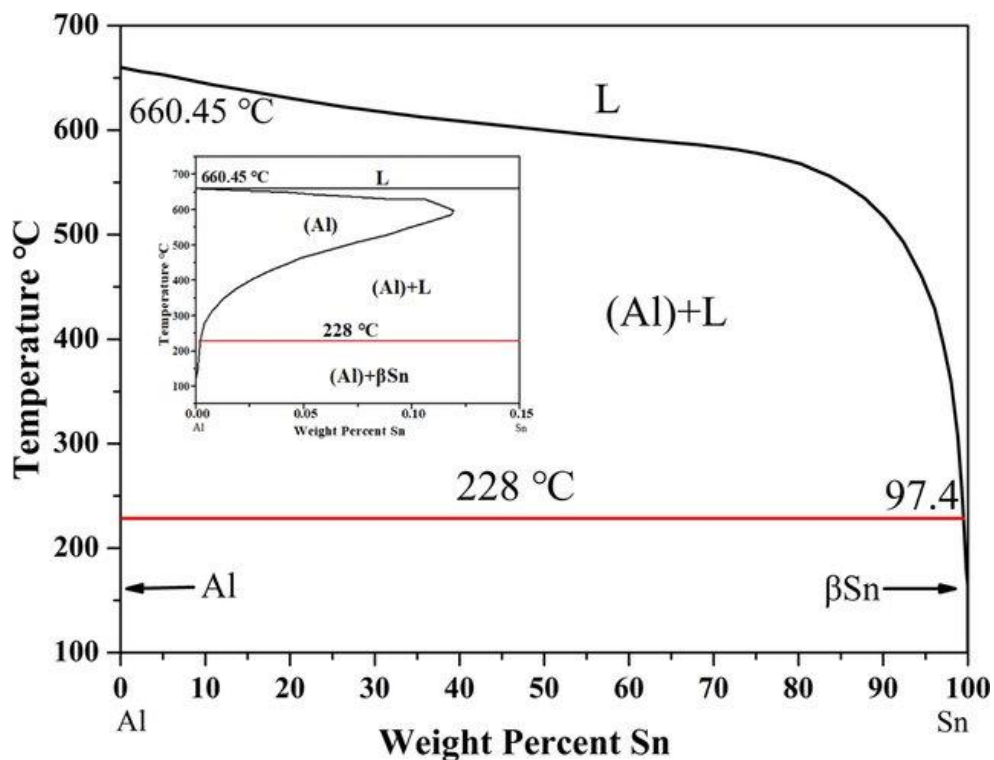


Рисунок 3.1 – Діаграма стану системи алюміній – олово [42]

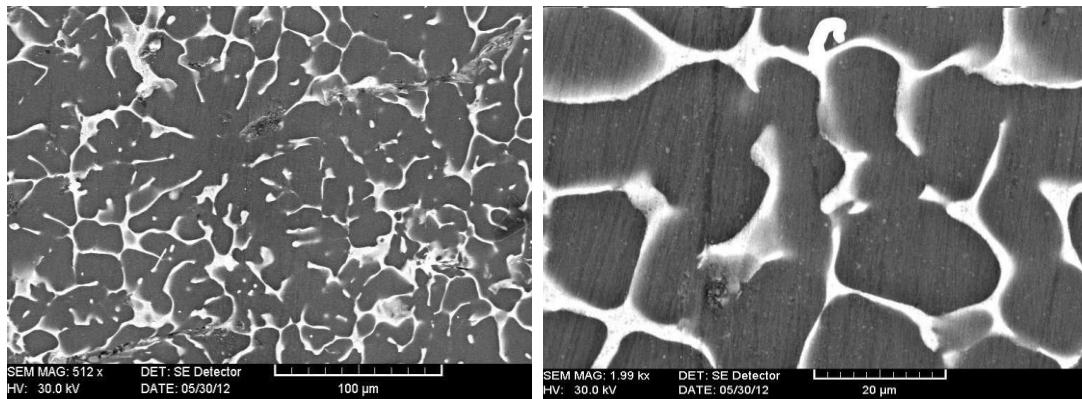


Рисунок 3.2 – Мікроструктури електрода зі сплаву Al-Sn за різного збільшення (світла сітка-олово, темні зерна - алюміній) [43]

Це підтверджується результатами скануючої електронної мікроскопії та EDX-елементного аналізу (рис. 3.3), а також сканування поверхнею зразка з одночасним визначенням алюмінію та олова (рис. 3.4).

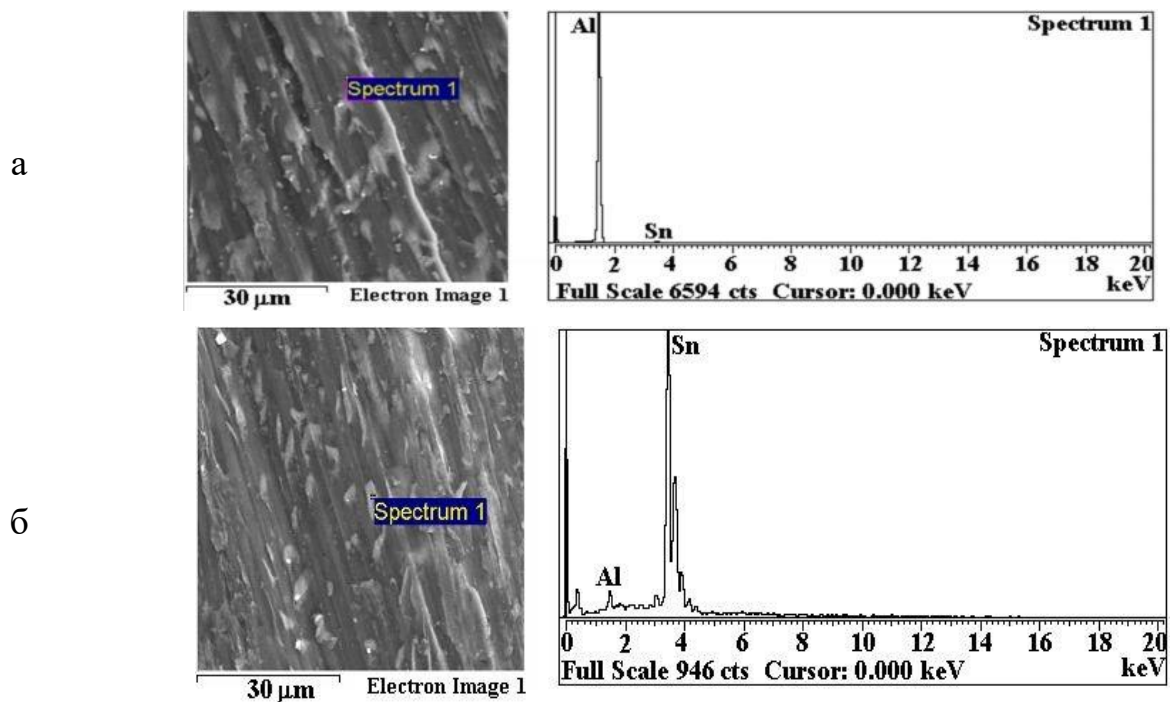


Рисунок 3.3 – Мікрофотографії поверхні обробного електрода та EDX-спектри матриці (а) і диспергованого олова (б) [43]

Білі включення являють собою вкраплення Sn в алюмінієвій матриці.

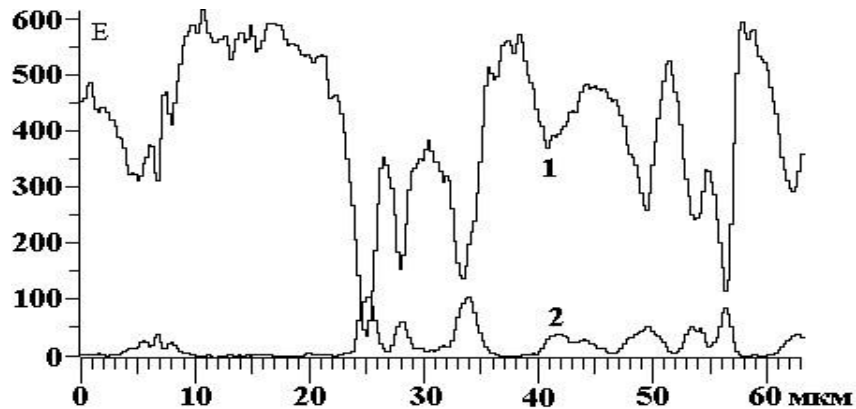


Рисунок 3.4 – Розподіл алюмінію (1) і олова (2) по поверхні обробного електрода. Рівні EDX-спектра наведено у відносних одиницях E [43]

Видно (рис. 3.3), що обробний електрод справді являє собою алюмінієву матрицю з диспергованими в ній частинками олова розміром $(3\div 5)\cdot 10^{-6}$ м, які мають форму тонкої сітки або рівномірно розподілених у матриці дисперсних частинок. Така структура утворюється внаслідок 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: під час нагрівання електрода в електричній печі до температури 350°C на його поверхні виступають дрібнодисперсні крапельки олова, які видно неозброєним оком.

В умовах електроіскрового легування, тобто за локального підвищення температури в місці контакту електрода зі зразком, система являє собою розплавлені частинки диспергованого олова, які перебувають у твердій матриці алюмінію.

Таким чином, під час електроіскрового легування електродами з алюмінієвоолов'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. Очевидно, що внаслідок малості сил поверхневого натягу розплавлених частинок олова (або олова, частково збагаченого алюмінієм) електромагнітні сили, що виникають унаслідок наявності електромагнітного поля в міжелектродному проміжку, настільки їх перевищують, що внаслідок дроблення дисперсних частинок утворюються волокна діаметром менш як 10^{-6} м.

Факти подібного роду повинні спостерігатися не тільки для системи Al-Sn, а й для будь-яких інших систем, які утворюють механічні суміші (тобто елементи не розчиняються один в одному і не утворюють хімічних сполук) і за певних температур являтимуть собою систему розплавлених частинок, що знаходяться у твердій матриці. Такими системами можуть бути Al-Pb, Fe-Pb, Cu-Pb та інші, які широко застосовуються в промисловості як антифрикційні сплави.

У результаті дослідження встановлено, що в умовах електроіскрового легування обробними електродами з матеріалів, що представляють механічну суміш відносно легкоплавкого компонента, диспергованого у відносно тугоплавкому (наприклад, система Al-Sn), можливе утворення в міжелектродному проміжку ниток з матеріалу, збагаченого легкоплавким компонентом. Утворені нитки переносяться на поверхню зразка, що різко збільшує концентрацію легкоплавкого компонента в поверхневому шарі при електроіскровому легуванні. Отримані в покритті мікро- та нанонитки олова або його оксиду (залежно від атмосфери в міжелектродному проміжку) можуть відігравати роль «арматури», що зв'язує шари та забезпечує привіс 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 [44].

3.2 Особливості зміни мікроструктури і складу покриття при ЕІЛ

На рис. 3.5 показано зміни у вазі в процесі експериментів як для зразка, так і для електроду-інструменту. Видно, що за відносно малих енергій імпульсу (енергій розряду) має місце втрата у вазі зразка, що збільшується зі збільшенням енергії імпульсу. Це область I на рис. 3.5. У зазначеній області спостерігається також втрата у вазі електроду, але відносно меншому ступені. Очевидно, що ділянка I – ділянка, характерна для електроерозійного оброблення в повітряному середовищі, для якої притаманні видалення речовини з поверхні деталі (збільшується зі зростанням енергії в імпульсі) і мале зношування інструменту.

При збільшенні енергії в імпульсі картина істотно змінюється, і за доволі високих енергій спостерігалася полярне перенесення на поверхню зразка, що супроводжувалося прирощенням його у вазі. Коефіцієнт перенесення (відношення маси приросту до маси речовини, видаленої з електроду) дорівнював $\sim 0,3$. Ця область (II на рис. 3.5) являє собою класичний варіант ЕІЛ стосовно використаного матеріалу електроду-інструменту.

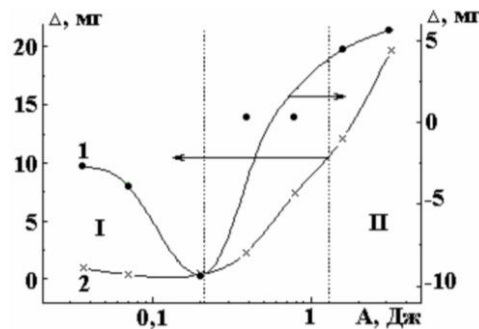


Рисунок 3.5 – Вплив енергії розряду на зміну маси зразка (1) і електроду-інструменту (2) [45]

На рис. 3.6 наведено морфологію поверхні зразка й обробного електрода після обробки. З результатів елементного аналізу (табл. 3.1) видно, що вони являють собою суміш оксидів і нітридів алюмінію (зразок), а також оксидів алюмінію, олова і міді.

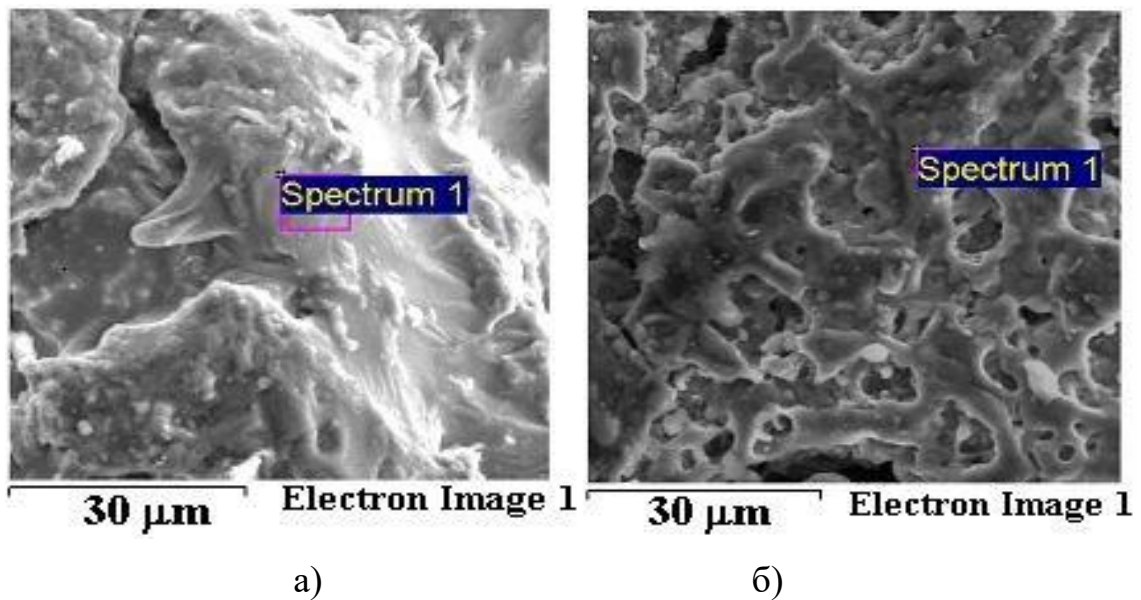


Рисунок 3.6 – Морфологія поверхні обробного електрода (а) і зразка (б) після обробки методом електроіскрового легування [46]

Таблиця 3.1

Склад (вагові %) поверхні зразка після обробки (енергія розряду 0,036 Дж) [46]

Елемент	C	N	O	Al	Cu	Sn
Зразок після оброблення	4,1	13,1	29,4	53,3	-	-
Оброблювальний електрод	10,4	-	3,3	82,7	1,8	1,3

Наведені фотографії поверхні та результати аналізу типові для обробки в режимах, що відповідають енергіям розряду 0,036-0,79 Дж. При цьому склад поверхонь міг незначно змінюватися. Зокрема, на поверхнях зразків у режимах 0,07-0,79 Дж було 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 у зазначених умовах, є характерною для оплавлених поверхонь.

На поверхнях зразків і обробного електрода, що обробляються за режимів 0,39-0,79 Дж, зафіксовано специфічні структури у вигляді ниток, діаметр яких

менший за 1 мкм (рис. 3.7). На рис. 3.8 мікро- і нанонитки представлені за більшого збільшення.

У табл. 3.2 представлено склад поверхні зразків після обробки.

Таблиця 3.2

Склад поверхонь зразків після обробки в режимах 1,58-3,15 Дж (середні значення) [46]

Елемент	Al	Sn	O	N	C
Ваг, %	50,0 ± 4,8	34,8 ± 2,6	7,7 ± 1,5	2,2 ± 0,6	5,3 ± 2,6

Видно, що порівняно з іншими режимами різко зростає концентрація олова на поверхні зразка (табл. 3.2). Аналіз складу ниток показує, що в основному це діоксид олова (табл. 3.3).

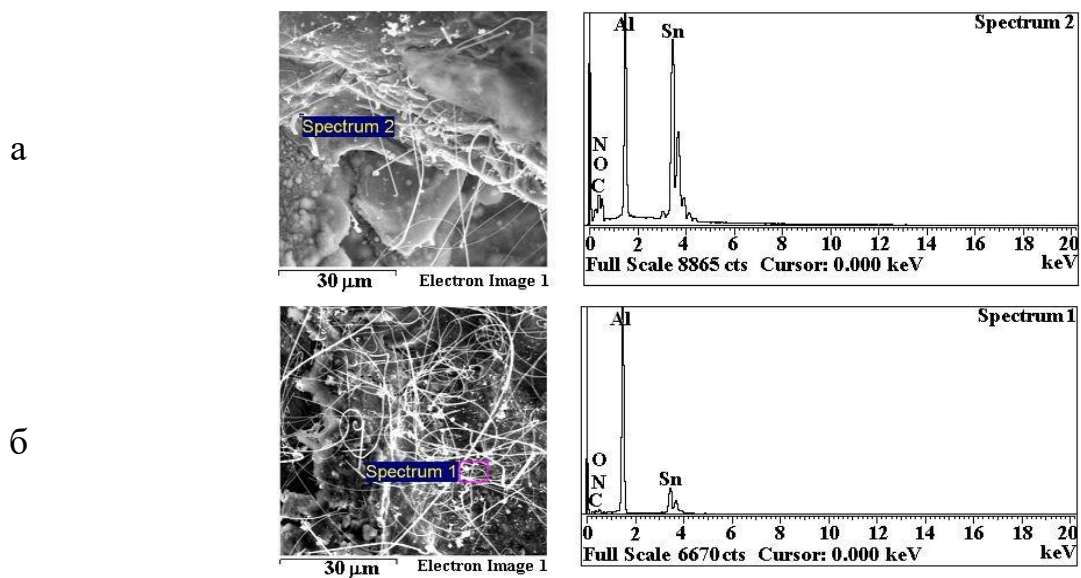


Рисунок 3.7 – Морфологія поверхні та EDX-спектри оброблювального електрода (а) і зразка (б) після обробки в режимах 1,58-3,15 Дж [46]

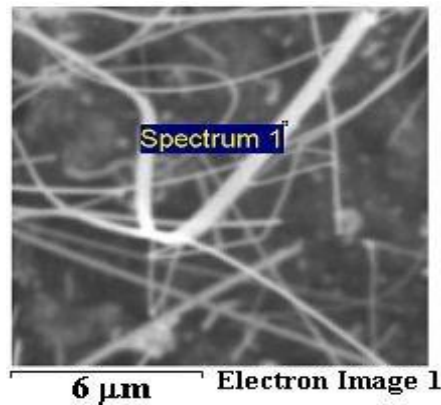


Рисунок 3.8 – Поверхня зразка після обробки в режимі 3,15 Дж (фрагмент рис. 3.7, б) [46]

Таблиця 3.3

Елементний склад нитки на зразку після обробки в 1,58 Дж [46]

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

У табл. 3.3 наведено результати елементного аналізу великого фрагмента нитки на зразку, з якого випливає, що концентрація олова в нитці понад 60% (ваг.), а кисню - понад 11%. Однак, однозначно відповісти на питання, чи є вони виключно такими, що складаються з олова (його оксидів), чи містять також алюміній та його оксиди, але в меншій, ніж олово, кількості, не можна. Причиною такого становища є обмеженість методу аналізу EDX, тому що цей метод фіксує наявність компонентів не тільки в об'ємі нитки, а й частково охоплює об'єми поверхневих шарів, на яких ці нитки знаходяться.

3.3 Висновок

На основі аналізу діаграми стану Al-Sn спрогнозована мікроструктура легуючого електрода. Вона повинна являти собою алюмінієву матрицю з диспергованим у ній металевим оловом. Дані металографічного і EDX-елементного аналізу підтверджують припущення. Мікроструктура електроду

представлена алюмінієвою матрицею з диспергованими в ній частинками олова розміром $(3\div 5)\cdot 10^{-6}$ м, які мають форму тонкої сітки або рівномірно розподілені у матриці дисперсні частинки. В умовах електроіскрового легування, тобто за локального підвищення температури в місці контакту електрода зі зразком, система являє собою розплавлені частинки диспергованого олова, які перебувають у твердій матриці алюмінію.

При ЕІЛ обробними електродами з матеріалів, що представляють механічну суміш відносно легкоплавкого компонента, диспергованого у відносно тугоплавкому (наприклад, система Al-Sn), можливе утворення в міжелектродному проміжку ниток з матеріалу, збагаченого легкоплавким компонентом. Утворені нитки переносяться на поверхню зразка, що різко збільшує концентрацію легкоплавкого компонента в поверхневому шарі при електроіскровому легуванні. Отримані в покритті мікро- та нанонитки олова або його оксиду (залежно від атмосфери в міжелектродному проміжку) можуть відігравати роль «арматури», що зв'язує шари та забезпечує привіс зразка, що робить можливим використання таких покриттів для відновлення поверхонь з алюмінієвих сплавів.

Проведений аналіз мікроструктури, фазового і хімічного складу покриття. З результатів елементного аналізу можна визначити, що вони являють собою суміш оксидів і нітридів алюмінію (зразок), а також оксидів алюмінію, олова і міді. Хімічний аналіз дозволив виявити, що на поверхнях зразків у режимах 0,07-0,79 Дж було 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 у зазначених умовах, є характерною для оплавлених поверхонь.

На поверхнях зразків і обробного електрода, що обробляються за режимів 0,39-0,79 Дж, зафіксовано специфічні структури у вигляді ниток, діаметр яких менший за 1 мкм. Отже, в умовах ЕІЛ матеріалами, що являють собою механічну суміш легкоплавкого компонента, диспергованого у високоплавкому

(наприклад, система Al-Sn), можливе утворення в міжелектродному проміжку нанониток з матеріалу, збагаченого легкоплавким компонентом. Утворені нанонитки переносяться з поверхні електрод-інструменту на поверхню зразка, що різко збільшує концентрацію легкоплавкого компонента в поверхневому шарі при ЕІЛ. Отримані результати свідчать про істотну роль пондермоторних сил у перенесенні розплавлених частинок в умовах ЕІЛ.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Витрати виробництва – це витрати підприємства, безпосередньо пов'язані з виробництвом своєї продукції. Врахування витрат на виробництво продукції - облік прямих витрат, які підприємство несе при випуску продукції. Його ведення дуже важливе для визначення собівартості продукції, формування статистичних даних про динаміку та структуру виробничих витрат.

Облік витрат виробництва складається з калькуляції витрат на [47]:

- оплату праці;
- відрахування оплати соціальних потреб;
- матеріальні витрати (купівля сировини, обслуговування устаткування);
- амортизацію.

В обліку витрат підприємства виділяють непрямі та прямі витрати. Прямі витрати пов'язані з придбанням сировини, напівфабрикатів, придбання устаткування, оплату праці персоналу, зайнятого з виробництва, і навіть вартість допоміжних послуг, якщо такими користуються для підприємства. Облік прямих витрат за виробництво, здійснюваний з допомогою програмних ресурсів дозволяє безпомилково визначати поточний стан справ, прогнозувати майбутні витрати, збільшувати чи скорочувати виробничі потужності. Це основний інструмент стратегічного планування діяльності компанії.

Непрямі чи накладні – витрати коштів, на дії пов'язані безпосередньо з циклами виробничих процесів. Ці категорії витрат поєднуються в поняття комплексні витрати, куди входить ще заробітна плата персоналу, витрата на утримання автопарку, обслуговування території та багато іншого.

Відомості про те, куди, як і на що підприємство витрачає свої фінанси в процесі виробництва, дуже важливо тому, що ця інформація відіграє найважливішу роль в економіці компанії, у формуванні її прибутку. Саме прибуток підприємства робить його конкурентоспроможним, дозволяє

розвиватися, впроваджувати нові технології, що здешевлюють випускати продукцію при збереженні її якості.

Для полегшення процесів обліку витрат використовуються програмні послуги, здатні вести аналітичну та облікову роботу на підприємствах будь-яких масштабів. Однією з головних переваг таких сервісів є можливість ведення точної системної облікової діяльності. Саме системність — запорука об'єктивної оцінки фінансових витрат та основа їхнього достовірного планування.

Проблема багатьох підприємств у тому, що облік часто виробляється не своєчасно, залежить від людського чинника, який завжди достовірний. Він не дозволяє під час встановлення повністю відстежувати причини збільшення витрат, не дає можливості сформуванню у керівництва чітке уявлення про те, як насправді формуються фінансові витрати, знайти способи їх скорочення.

Часта помилка багатьох підприємств у тому, що на підставі безсистемного контролю неможливо встановити об'єктивну собівартість продукції, що випускається. Виходить, що собівартість продукції складається із співвідношення планових та фактичних даних про витрати. Нерідко на підставі зіставлення цих відомостей собівартість виходить штучно завищеною, приймаються рішення про оптимізацію видатків за рахунок необґрунтованого скорочення персоналу, недооцінка стану справ підприємства. У результаті це може поставити компанію на межу банкрутства.

Впровадження автоматизованих методів обліку вносить суттєві корективи, дозволяючи використовувати документи та дані, що вносяться до інформаційної бази в міру їх створення.

Автоматичний облік витрат може поступово впроваджуватися. Для полегшення процесу впровадження можна розділити завдання, що підлягають автоматизації, на першочергові та завдання другої черги. Модульність багатьох програм дозволяє легко реалізовувати такий підхід практично.

Автоматизований облік виробничих витрат дозволить розвивати такі напрямки, як [48]:

Прогнозування. Аналізуючи дані про минулі та поточні витрати можна планувати майбутні витрати, передбачати їх можливі зміни, складати бюджет виробництва.

Визначення собівартості продукції.

Аналіз витратної частини виробництва, а також пошук можливих способів скорочення витрат, можливостей та резервів для зведення витратної частини до гранично допустимого мінімуму.

Ухвалення управлінських рішень, що відштовхуються від контролю діяльності підприємства, його витрат та доходів.

Оцінка економічного ефекту від конструкторських і технологічних змін



Рисунок 5.1 – Схема впливу змін технологічного процесу продукції на економічний ефект

Облік виробничих витрат включає також аналіз та калькуляцію постійних та тимчасових витрат. Змінні, тобто які мають виражений систематичний характер може бути пов'язані з форс-мажорними обставинами. Постійні чи умовно-постійні – поточний ремонт устаткування, закупівля сировинної бази, брак продукції. Змінні витрати пов'язані із зміною обсягу виробництва. Спланувати їх можна, використовуючи облік процесу виробництва.

Висновок

Собівартість продукції — це загальна сума витрат на виробництво одиниці товару або надання послуги, тобто сума грошей, яку підприємець витрачає на виробництво та продаж товару. В нашому випадку вона складається з вартості зразка (заготовки), основної та додаткової заробітної плати робітників, амортизаційних відрахувань, вартість електроенергії, обладнання та витрати на його ремонт.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

5.1 Правила по охороні праці при обробці металів. Загальні положення [49, 50]

1. Правила з охорони праці при обробці металів (далі – Правила) встановлюють державні нормативні вимоги охорони праці, що пред'являються до організації та здійснення основних виробничих процесів та робіт, пов'язаних із термічною та холодною обробкою металів.

2. Вимоги Правил обов'язкові для виконання роботодавцями – юридичними особами незалежно від їх організаційно-правових форм та фізичними особами (за винятком роботодавців – фізичних осіб, які не є індивідуальними підприємцями), при організації та здійсненні ними виробничих процесів та робіт, пов'язаних із термічною та холодною обробкою металів .

3. Відповідальність за виконання Правил покладається на роботодавця.

На основі Правил та вимог технічної (експлуатаційної) документації організації-виробника технологічного обладнання, що застосовується при обробці металів (далі – організація-виробник), роботодавцем розробляються інструкції з охорони праці для професій та (або) видів виконуваних робіт, що затверджуються локальним нормативним актом роботодавця з урахуванням думки відповідного профспілкового органу чи іншого уповноваженого працівниками, здійснюють роботи, пов'язані з обробкою металів, (далі – працівники) представницького органу (за наявності).

4. У разі застосування матеріалів, технологічного оснащення та технологічного обладнання, виконання робіт, вимоги до безпечного застосування та виконання яких не регламентовані Правилами, слід керуватись вимогами відповідних нормативних правових актів, що містять державні

нормативні вимоги охорони праці.¹, та вимогами технічної (експлуатаційної) документації організації-виробника.

5. Роботодавець зобов'язаний забезпечити:

1) безпеку виконання робіт, утримання технологічного обладнання у справному стані та його експлуатацію відповідно до вимог Правил та технічної (експлуатаційної) документації організації-виробника;

2) навчання працівників з охорони праці та перевірку знань вимог охорони праці;

3) контроль над дотриманням працівниками вимог інструкцій з охорони праці.

6. При виконанні робіт на працівників можливий вплив шкідливих та (або) небезпечних виробничих факторів, у тому числі:

1) рухомих машин і механізмів, рухомих частин технологічного обладнання, виробів, що переміщуються, заготівлі, матеріалів;

2) підвищену загазованість повітря робочої зони;

3) підвищеної чи зниженої вологості повітря;

4) підвищеної чи зниженої температури повітря робочої зони;

5) підвищеної температури поверхонь обладнання, матеріалів;

6) підвищений рівень шуму робочому місці;

7) підвищений рівень вібрації;

8) підвищений рівень ультразвуку;

9) підвищеного рівня іонізуючих випромінювань у робочій зоні;

10) підвищеного рівня електромагнітних випромінювань (ультрафіолетового, інфрачервоного, лазерного, мікрохвильового, радіочастотного);

11) підвищеного значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може статися через тіло людини;

12) підвищеної напруженості магнітного поля;

13) недостатньої освітленості робочої зони;

- 14) гострих кромок, задирок та шорсткості на поверхні заготовок, інструменту та технологічного обладнання;
- 15) падаючих предметів (елементів технологічного устаткування);
- 16) хімічних та токсичних небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що впливають на шкірні покриви та слизові оболонки;
- 17) фізичних навантажень;
- 18) нервово-психічних перевантажень.

7. При організації виконання робіт, пов'язаних із впливом на працівників шкідливих та (або) небезпечних виробничих факторів, роботодавець зобов'язаний вжити заходів щодо їх виключення або зниження до рівнів допустимого впливу, встановлених вимогами відповідних нормативних правових актів.

При неможливості виключення чи зниження рівнів шкідливих та (або) небезпечних виробничих факторів до рівнів допустимого впливу у зв'язку з характером та умовами виробничого процесу проведення робіт без забезпечення працівників відповідними засобами індивідуального захисту забороняється.

8. Роботодавець має право встановлювати додаткові вимоги безпеки під час виконання робіт, що покращують умови праці працівників.

5.2 Вимоги охорони праці у процесі гартування

1. Операції завантаження, вивантаження і транспортування деталей, що гартуються, повинні бути механізовані.

2. Гартувальні олії в баках і ваннах періодично (при заливанні свіжої порції олії або після тривалої зупинки обладнання) повинні піддаватися контролю на вміст у них води, яка викликає піноутворення, чим сприяє загорянню олії. Виявлена вода має бути видалена через спускні крани, встановлені у нижній частині баків. Максимальний вміст води в загартованому маслі не повинен перевищувати 0,1%.

3. Об'єм масла в баку, в який занурюються при загартуванні та відпуску нагріті деталі, повинен у 4-6 разів перевищувати обсяг деталей, що завантажуються.

4. У процесі роботи необхідно візуально контролювати рівень масла в баку, щоб уникнути його викиду та займання (що можливо за відсутності пристрою автоматичного контролю рівня), а також стежити за справністю сигналізаторів перегріву масла та пристрою для аварійного зливу.

5. Для гарту має застосовуватися олія з температурою спалаху не нижче 170°C. Максимальна робоча температура нагрівання олії при загартуванні має перевищувати 180 °С.

6. В окремих випадках і при ступінчастому загартуванні повинні застосовуватися спеціальні олії з підвищеною температурою спалаху (вище 300 °С), що допускають термічну обробку деталей в олії при температурі до 180 °С. Температура нагрівання масла повинна контролюватись періодично (візуально за термометром) або постійно (за допомогою автоматичних приладів).

7. Вантажопідйомні механізми, призначені для завантаження великих деталей в масляні ванни для гарту, повинні забезпечувати швидкість занурення не менше 15 м/хв.

8. При загартуванні в маслі занурення деталей слід проводити на глибину не менше 200 мм від поверхні, щоб уникнути перегріву та займання олії.

9. При загартуванні в гасі температура гасу у ванні має перевищувати 38 град. С. Гас повинен мати температуру спалаху пари не менше 45 °С.

10. У разі використання розплавлених солей для охолодження з метою гарту повинні дотримуватися вимог безпеки при термообробці в соляних ваннах.

11. При використанні як гартових середовищ водних розчинів полімерів слід дотримуватись вимог безпеки, викладених у нормативних актах на ці матеріали.

5.3 Вимоги охорони праці у процесі поверхневої обробки

Вимоги охорони праці у процесі дифузійної металізації [51]

1. При роботі з порошкоподібними металами необхідно стежити за концентрацією металевого пилу в робочій зоні, який не повинен перевищувати значень гранично допустимих концентрацій.

2. Відкриття металевих тари з порошками (алюмінієм, цинком) слід здійснювати за допомогою спеціального інструменту та пристроїв, що не викликають іскроутворення. Роботу рекомендується виконувати у спеціальному приміщенні.

Вимоги охорони праці у процесі очищення деталей [51]

1. Очищення металевих деталей від окалини та іржі проводиться механічним або хімічним способом.

2. Механічна очистка проводиться у мийних машинах, у яких застосовується розчин лугу з вмістом до 10% кальцинованої соди за температури до 90 °С, або в установках для гідроочищення та гідропіскоочищення, у дробометних та дробометно- дробоструминних установках, а також на агрегатах ультразвукового чищення або вручну за допомогою абразивного інструменту. Застосування пікоструминних апаратів для сухого піскоочищення деталей забороняється.

3. Камери (установки) для гідроочищення та гідропіскоочищення не повинні виділяти пари та пил у приміщення цеху. При застосуванні гідропікоструминного очищення деталей не слід допускати вміст піску у воді понад 50 % за вагою. Дисперсність піску, що подається в гідропікоструминні установки, не повинна містити фракції менше 100 мікрон.

4. Дробометні та дробометно-дробеструйні установки повинні розміщуватися в приміщенні, обладнаному припливно-витяжною вентиляцією. Конструкція цих установок повинна передбачати повне укриття робочої зони (кількість повітря, що відсмоктується, має бути встановлено нормативно-технічною документацією на кожен модель обладнання виходячи з числа установок та їх продуктивності).

5. При роботі всередині гідроочисних та гідропіскоочисних камер (під час їх огляду чи ремонту) використання для освітлення напруги понад 12 В забороняється.

6. Очищення резервуарів та відстійників від опадів шламу має бути механізовано.

7. Стационарні верстати для обробки абразивним інструментом мають бути обладнані індивідуальними аспіраційними установками або підключені до місцевої витяжної вентиляції.

8. Ділянки обдирання (зачищення) деталей ручними машинками з абразивним інструментом повинні бути обладнані місцевою витяжною вентиляцією з видаленням пилу через бічні пилеприймачі, ґрати в підлозі або верстаті.

9. Ручний електрифікований інструмент, що застосовується на очисних ділянках, повинен мати напругу не більше 42 В.

10. Ручне очищення деталей повинно проводитися за температури деталей не вище 40 °С.

Вимоги охорони праці в процесі термообробки імпульсним індукційним нагріванням [51]

1. Установки імпульсного індукційного нагріву мають бути обладнані місцевою витяжною вентиляцією. За її відсутності робота повинна проводитися у витяжній шафі, оскільки обробка металів супроводжується вибуховим викидом дисперсійних частинок з утворенням пари та газів.

2. Установки імпульсного індукційного нагрівання обладнуються блокованими огорожами, сигналізацією.

3. Огляд внутрішніх частин установок, що знаходяться під напругою, слід проводити лише після зняття напруги.

4. Конденсаторні батареї можуть розташовуватися в одному приміщенні з пультом керування при загальній енергії повного припустимого заряду, що не перевищує 15000 Дж. Батареї більшої ємності повинні

розташовуватися поза приміщенням у спеціальній сталевій шафі або в окремому приміщенні з дверима, обладнаними блокувальними пристроями.

5. На ділянці імпульсного індукційного нагріву рекомендується вивішувати плакати, що містять вказівки та застереження щодо специфіки імпульсної термообробки.

Вимоги охорони праці у процесі лазерної термообробки [51]

1. Ділянка лазерної обробки металів має розташовуватися в ізольованому приміщенні. Стіни приміщення, де розміщені лазерні установки, мають бути з матеріалу, непроникного лазерного випромінювання. Внутрішні поверхні приміщення повинні фарбуватися в матовий колір, що має мінімальний коефіцієнт відбиття, що забезпечує максимальне розсіювання світла по довжині хвилі лазерного випромінювання.

2. На ділянці лазерної обробки металів мають бути:

- 1) інструмент із ізольованими рукоятками;
- 2) діелектричні рукавички та килимки;
- 3) розрядні штанги;
- 4) екрани непрозорі, що не дають відображення лазерного випромінювання;
- 5) засоби захисту очей;
- 6) засоби захисту органу слуху;
- 7) інструкція з охорони праці;
- 8) інструкція з експлуатації;
- 9) план розміщення установок із зазначенням лазерної небезпечної зони.

3. У зонах із підвищеною інтенсивністю лазерного випромінювання мають бути вивішені попереджувальні знаки з написом «Обережно! Лазерне випромінювання».

4. Процеси лазерної обробки металів, які вимагають присутності обслуговуючого персоналу біля устаткування, повинні проводитися у спеціальному ізольованому приміщенні. Управління процесом у разі

проводиться з окремо розташованого пульта. Видалення шкідливих та небезпечних речовин із повітряного середовища (або зниження їх до рівня ГДК) повинно здійснюватися загальнообмінною вентиляцією. Для видалення великої кількості небезпечних та шкідливих речовин, крім загальнообмінної вентиляції, повинні застосовуватись місцеві відсмоктувачі.

5. При проведенні процесів, що вимагають присутності персоналу біля лазерної установки або поблизу зони впливу лазерного випромінювання на деталі, видалення шкідливих та небезпечних речовин із зони їх утворення повинно проводитись за допомогою місцевих відсмоктувачів.

6. При суміщенні системи спостереження з оптичною системою лазерної установки необхідно застосовувати автоматичні затвори або світлофільтри, що захищають очі оператора в момент створення випромінювання. Забороняється під час генерації випромінювання здійснювати візуальний контроль проникнення в деталь без застосування відповідних засобів захисту, а також направляти промінь лазера в очі людини та на інші частини тіла.

7. При використанні лазерних установок відкритого типу для запобігання опроміненню працівників повинні використовуватися огороження, маркування лазерної небезпечної зони, екранування відкритого променя лазера, винесення пульта управління з небезпечної зони.

5.4 Вимоги охорони праці в процесі термообробки магнієвих та алюмінієвих сплавів, титану та його сплавів

1. Цехи та ділянки термічної обробки деталей з магнієвих та алюмінієвих сплавів повинні по можливості розміщуватись в окремих приміщеннях.

Не слід встановлювати печі для термічної обробки деталей із магнієвих та алюмінієвих сплавів у потокових лініях цехів механічної обробки деталей.

2. Приміщення зберігання та термічної обробки деталей із сплавів мають бути обладнані загальнообмінною вентиляцією.

15. Електроустаткування та електроприлади, що встановлюються у цих приміщеннях, повинні бути у вибухобезпечному виконанні.

16. Для термічної обробки деталей з магнієвих та алюмінієвих сплавів можуть застосовуватись електропечі різних конструкцій та систем завантаження деталей, а також рециркулярні печі з нагріванням за рахунок механічної енергії потоку повітря.

17. Для низькотемпературної термообробки (не вище 300 град. С) допускається використовувати печі з газовим обігрівом за наявності окремої камери для згоряння газів.

18. Завантаження печі слід проводити акуратно, щоб деталі не звалилися з етажерки та не торкалися відкритих спіралей опору.

19. Перед завантаженням у піч деталей з магнієвих сплавів їх слід очистити від магнієвого пилу, задирок, стружки, жиру (олії). Очищення жиру слід здійснювати в 1-процентному водному розчині соди при 100 град. С або розчиннику.

20. Розподіл температур у печах має бути рівномірним. Для запобігання перепаду температур печі слід постачати вентиляторами.

21. Печі повинні бути обладнані терморегуляторами для автоматичної підтримки необхідної температури та вимкнення печі у разі підвищення температури вище заданої.

У печах значної довжини нагрівальні елементи повинні бути розташовані окремими секціями, кожна з яких повинна мати регулятор.

22. У разі несправності автоматики піч повинна бути вимкнена вручну, для чого печі повинен бути передбачений ручний рубильник або вимикач, встановлений у доступному для користування місці.

В аварійній ситуації вся група печей має бути вимкнена за допомогою загального аварійного рубильника, встановленого всередині приміщення у зручному місці.

23. Справність терморегулюючих приладів має систематично перевірятися з оформленням відповідних записів у спеціальному журналі. Робота із несправною апаратурою забороняється.

24. При високотемпературній термообробці магнієвих сплавів (наприклад, нагріванні під загартування) в піч з повітряною атмосферою слід додавати 0,7-1 % сірчистого газу, що подається трубами або одержується безпосередньо в печі шляхом розкладання сірчаного колчедану. Металеві банки або деко з сірчаним колчеданом встановлюються на етажерки або подину термічної печі. Кількість колчедану – 0,5-1 кг/куб. м робочого простору печі.

25. Для запобігання самозаймання деталей з магнієвих і алюмінієвих сплавів при термічній обробці термісту необхідно стежити, щоб не було різкого підвищення температури в печі. Ознакою самозаймання є утворення білого диму, що пробивається в щілини дверцят печі або в отвори для термопар.

26. Печі мають бути максимально герметизовані. Підсмоктування повітря, особливо у вакуумних печах, не допускається. Спостереження за нагріванням деталей усередині печі слід вести через оглядові вікна (очі).

27. Алюмінієвий і магнієвий пил можуть утворювати вибухонебезпечну суміш, а алюмінієвий пил і оксиди заліза (залізна окалина) утворюють вибухову суміш (термітний порошок), тому вести нагрівання деталей з алюмінієвих сплавів у печах, в яких вироблялося нагрівання деталей із чорних металів або магні тільки після попереднього повного видалення з печі оксидів заліза та магнієвого пилу.

28. У разі загоряння деталей пекти слід негайно відключити, а етажерки з деталями вийняти (викотити) з печі. Вогонь гасити необхідно сухим піском або меленим плавильним флюсом.

29. Протипожежні запаси піску (флюсу) мають бути передбачені у цеху у достатній кількості. Ящики з піском (флюсом) повинні бути рівномірно розподілені у приміщенні цеху і, по можливості, ближче до печей.

30. Персонал, який працює на ділянці, повинен знати, що з метою безпеки забороняється:

- 1) завантажувати в піч для спільної обробки деталі, виготовлені з магнієвих та алюмінієвих сплавів;
- 2) завантажувати в піч деталі, забруднені здатною до займання магнієвим або алюмінієвим пилом (стружкою) і жиром (олією), а також деталі, вкриті вологою, оскільки наявність водяної пари в печі збільшує небезпеку загоряння магнієвих сплавів;
- 3) обробляти деталі з магнієвих та алюмінієвих сплавів на наждачних верстатах;
- 4) вести нагрівання деталей з магнієвих та алюмінієвих сплавів у рідких селітрових або ціаністих ваннах;
- 5) здувати пил стисненим повітрям, тому що при цьому пил переходить у виважений вибухонебезпечний стан;
- 6) виконувати зварювальні роботи, пов'язані із застосуванням відкритого полум'я (без екранування місця роботи);
- 7) користуватися пінними вогнегасниками або водою на ділянці обробки магнієвих сплавів, оскільки магній розкладає воду та викликає вибух.

5.5 Охорона довкілля

Охорона навколишнього середовища (НС) – це комплекс науково-обґрунтованих міжнародних, державних, регіональних, адміністративно-господарських, політичних, економічних, громадських заходів, спрямованих на підтримання фізичних, хімічних і екологічних параметрів природного середовища в межах, які забезпечують нормальні умови життєдіяльності людини та можливість збереження і зміцнення її здоров'я.

Екологічні та природоохоронні відносини в суспільстві регулюються Конституцією України, в 13-ій статті якої зазначено: «Земля, її надра, атмосферне повітря, водні та інші природні ресурси є всенародним надбанням, а власником їх є Держава».

Проблеми охорони навколишнього середовища в цій області виробництва пов'язані з наступним [52]:

- шум;
- викиди в атмосферу;
- стічні води;
- тверді відходи.

Пил виділяється при термічних (наприклад, плавильна піч) і фізико-хімічних технологічних процесах – наприклад, формування та виробництво прутків, а також при механічних діях, таких, як навантаження/розвантаження сировини, в основному піску, а також процеси відливки та доведення.

У процесі плавлення форма і хімічний склад твердих викидів у вигляді пилу, частинок металу і парів оксидів металу можуть змінюватися залежно від типу печі, палива, оплавленого металу чи сплаву, режимів плавки. Як правило, вагранки під час роботи виробляють велику кількість твердих частинок (наприклад, кокс, летюча зола, кремнезем, іржа та вапняк). Електродугові печі (ЕДП) також є джерелом великих кількостей твердих частинок, як при завантаженні, а також під час плавки, подачі кисню і на стадії зневуглицьовування. Інші типи плавильних печей забезпечують більш низький процент викидів, особливо індукційні електричні печі [52].

Для запобігання значних викидів твердих частинок потрібно:

- використовувати індукційні печі
- використання в плавильних печах технологій, які дозволяють понизити використання значної кількості електричної енергії (наприклад, встановлення кисневопаливних пальників тощо).

Викид оксидів нітрогену, викликаний нагріванням до високих температур та окисленням нітрогену. Зменшення викидів можна досягти, якщо змінити основний технологічний процес і вторинну технологію очищення в місці викиду.

Хлориди і фториди присутні в невеликих кількостях у відпрацьованих газах з плавильних печей і утворюються з флюсових речовин. Запобігання і зниження викидів цих утворених газів слід проводити на стадії сухого видалення пилу, а також в процесі використання технологій скрубєрів

мокрого очищення, що встановлюються в печах для зменшення викидів твердих частинок і при плавці сталі оксидів сірки [53].

Процес термічної або хіміко-термічної обробок вимагає великої кількості енергії, при цьому в печі утворюється значна кількість CO_2 і це веде до збільшення забрудненості повітря діоксидом вуглецю (CO_2). Цей оксид, як відомо, утворюється під час спалювання палива. Рекомендуються наступні методи запобігання викидам CO_2 [53]:

- впровадження у виробництво провідних технологій спалювання (наприклад, збагачення киснем повітря, що використовується при продувці, попередніє підігрівання ресурсів при завантаженні, управління параметрами спалювання);

- виконання необхідного регламенту експлуатації та техобслуговування устаткування та недопущення часткового завантаження термічного обладнання;

- Вибір палива з низьким хімічним вмістом вуглецю до теплотворної здатності (наприклад, метану CH_4). Викиди оксиду вуглецю CO_2 при спалюванні метану десь на 60% менше, порівняно з викидами під час спалювання кам'яного вугілля або нафтового коксу.

Під час ТО та ХТО утворюються різноманітні джерела шуму, включаючи навантаження/розвантаження деталей, а також системи транспортування та вентиляції. Рекомендовані методи боротьби з шумом включають наступне [52]:

- звукоізоляція приміщення або їх огороження;

- звукоізоляція приміщень, які призначені для навантаження/розвантаження деталей;

- використання заслінок, огороження вентиляторів, ізоляція вентиляційних труб;

- введення заходів для боротьби з шумом.

5.6 Висновок

В даному розділі було розглянуто охорону праці в термічних цехах. Представлені правила по охороні праці при обробці металів, обов'язки роботодавця у забезпеченні належних умов праці, вимоги охорони праці у процесі гартування, у процесі поверхневої обробки, а саме під час дифузійної металізації, термообробки імпульсним індукційним нагріванням, лазерної термообробки, вимоги охорони праці в процесі термообробки магнієвих та алюмінієвих сплавів, титану та його сплавів.

В розділі представлений аналіз засобів протидії шкідливим факторам під час роботи в термічних дільницях. Існують стандарти, які регламентують правила розміщення обладнання і устаткування в термічних цехах. Проаналізовано вплив забрудненого повітря, речовин, які потрапляють в повітря під час проведення робіт в термічних цехах на здоров'я працівників. Розроблено ряд заходів щодо попередження забруднення повітря в цеху.

ВИСНОВКИ

1. На основі критичного аналізу переваг та недоліків відомих методів поверхневого зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів з метою підвищення їх механічних властивостей та зносостійкості встановлено, що одним з найбільш перспективних методів є електроіскрове легування, при якій потоками частинок високої щільності енергії забезпечується створення поверхневих структур з підвищеними механічними властивостями при значній простоті технологічного обладнання та економічності процесу. ЕІЛ дає змогу одержувати на поверхні алюмінієвих деталей покриття з різних матеріалів у доволі простий спосіб, як у технологічному відношенні, так і в апаратному оформленні, що є його великою перевагою. Залишаються не визначеними параметри ЕІЛ для отримання нанопокриттів і наноструктурування поверхні алюмінієвих сплавів, зокрема, алюмінієво-мідних сплавів типу дуралюмінів, що широко застосовуються в промисловості.

2. Розглянута методика та матеріали для дослідження. У якості підкладки обрано дюралюмін марки Д1, легуючого електроду – сплав системи алюміній – олово. Представлене обґрунтування вибору обладнання, режими обробки, технології проведення ЕІЛ у ручному режимі. У якості методів дослідження представлений опис методик металографічного аналізу, електронно-мікроскопічних досліджень, визначення мікротвердості.

3. Вивчена мікроструктура легувального електроду. Вона представлена алюмінієвою матрицею з диспергованими в ній частинками олова розміром $(3\div 5) \cdot 10^{-6}$ м, які мають форму тонкої сітки або рівномірно розподілені у матриці дисперсні частинки.

4. Проведений аналіз мікроструктури, фазового і хімічного складу покриття. З результатів елементного аналізу можна визначити, що вони являють собою суміш оксидів і нітридів алюмінію (зразок), а також оксидів алюмінію, олова і міді. Хімічний аналіз дозволив виявити, що на поверхнях зразків у режимах 0,07-0,79 Дж було присутнє олово (в незначних кількостях), а

іноді - і мідь.. Морфологія поверхонь, отриманих у зазначених умовах, є характерною для оплавлених поверхонь.

5. На поверхнях зразків і обробного електрода, що обробляються за режимів 0,39-0,79 Дж, зафіксовано специфічні структури у вигляді ниток, діаметр яких менший за 1 мкм. Отже, в умовах ЕІЛ матеріалами, що являють собою механічну суміш легкоплавкого компонента (наприклад, система Al-Sn), можливе утворення в міжелектродному проміжку нанониток з матеріалу, збагаченого легкоплавким компонентом. Утворені нанонитки переносяться з поверхні електрод-інструменту на поверхню зразка, що різко збільшує концентрацію легкоплавкого компонента в поверхневому шарі при ЕІЛ.

6. В економічній частині розраховані складові частини економічної доцільності проведення експериментальних досліджень. Її основою є собівартість. Собівартість продукції — це загальна сума витрат на виробництво одиниці товару або надання послуги, тобто сума грошей, яку підприємець витрачає на виробництво та продаж товару.

7. Розглянуто охорону праці в термічних цехах. Представлені правила по охороні праці при обробці металів, обов'язки роботодавця у забезпеченні належних умов праці, вимоги охорони праці у процесі гартування, у процесі поверхневої обробки, а саме під час дифузійної металізації, термообробки імпульсним індукційним нагріванням, лазерної термообробки, вимоги охорони праці в процесі термообробки магнієвих та алюмінієвих сплавів, титану та його сплавів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Krivonosova Ye. A., Gorchakov A. I., Scherbakov Yu. V. Structure and properties of coatings in microarc oxidation. *Welding International*, 2014. Vol. 28. No. 10. p.816–819.
2. Білик І. І., Руденький С. О. Технологія нанесення покриттів та їх властивості навчальний посібник. Електронне мережне навчальне видання Видання друге, перероблене і доповнене. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 120 с.
3. The corrosion behavior of the alloy based on Ti, Zr, Al and Fe / A. Herman, V. Shtefan, A. Smyrnova, V. Zuyok, R. Rud. 10th Int. Conf. on Physics of Advanced Materials (22–28 September 2014): book of abstracts. Iasi, Romania, 2014. P. 141.
4. Харченко В. В. Прогнозування високотемпературного окиснення жароміцних композиційних сплавів. Технічний прогрес в АПВ: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 21-22 травня 2024 р. Харків: ДБТУ, 2024. С. 328-332.
5. Voitovich I.D., Lebyedyeva T.S., Rachkov O.E., Gorbatiuk O.B., Shpylovyy P.B. Anodic alumina-based nanoporous coatings for sensory applications. In: Fesenko O., Yatsenko L., editors. Nanoplasmonics, nano-optics, nanocomposites, and surface studies. Springer, 2015. P. 423–431.
6. Коробов Ю.С., Полякова А.М., Яковлева І.Л., Щаслівцев В.М. Дослідження структури і властивостей перехідної зони в алюмінієвих деталях з напиленим сталевим покриттям. *Зварювальне виробництво*. 1996. № 12. С. 20-22.
7. Korobov Yu., Baranovski V., Pryadko A., Schastlivtsev V. Arc Spraying of Wear - Resistant Steel Coatings on Aluminum Parts. *Surface Modification Technologies: Int. Conf. SMT25*, Trollhattan. Sweden. June 20-22, 2011.
8. Шкилько, А.М. Анализ способа упрочнения деталей микродуговым окисдированием [Текст] / А.М. Шкилько, В.В. Тихоненко. *Вісник*

Національного технічного університету „ХПІ”: зб. наук, праць. Тематичний вісник: Нові рішення в сучасних технологіях, 2010. № 46. С. 252-257.

9. Дослідження впливу складу електроліту на структуру та властивості покриттів, отриманих методом мікродугового оксидування / В. В. Субботіна [та ін.]. *Фізика і хімія твердого тіла*, 2022. Т. 23. № 2. С. 380-386.

10. Мікроплазмові електрохімічні процеси. Огляд. [Текст] / В.І. Белеванцев, О.П. Терлеєва, Г.А. Марков та ін. *Захист металів*, 1998. Т. 34. № 5. С. 469-484.

11. Магурова, Ю.В. Вплив катодної складової на процес мікроплазмового оксидування сплавів алюмінію змінним струмом [Текст] / Ю.В. Магурова, О.В. Тимошенко. *Захист металів*, 1995. Т. 31, № 4. С. 414 -418.

12. Модельні уявлення про механізм мікродугового оксидування металевих матеріалів та управління цим процесом [Текст] / А.Г. Ракоч, В.В. Хохлов, В.А. Баутін та ін. *Захист металів*. 2006. Т. 42, № 2. С. 173-184.

13. Саакіян, Л. С. Розвиток уявлень Г.В. Акімова про поверхневу оксидну плівку та її вплив на корозійно-механічну поведінку алюмінієвих сплавів [Текст] / Л. С. Саакіян, О. П. Єфремов, О. В. Епельфельфельд. *Захист металів*, 2002. Т. 38, № 2. С. 186-191.

14. Субботіна В. В. Формування багатофункціональних покриттів на вентильних металах методом мікродугового оксидування : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.01 - Матеріалознавство; наук. конс. О. В. Соболю: Харків, 2019. 43 с.

15. Nagai, A., Tsutsumi, Y., Nozaki, K. (2019). Surface Modification with Micro-arc Oxidation. In: Setsuhara, Y., Kamiya, T., Yamaura, Si. (eds) *Novel Structured Metallic and Inorganic Materials*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7611-5_35

16. Luisa Quintino, 1 - Overview of coating technologies, Editor(s): Rosa Miranda, *Surface Modification by Solid State Processing*, Woodhead Publishing, 2014, P. 1-24. <https://doi.org/10.1533/9780857094698.1>

17. O. I. Oranska, Yu. I. Gornikov Фазові перетворення в нанокompозитах на основі пірогенних оксидів кремнію, алюмінію та оксидів рідкісноземельних металів Ln_2O_3 ($\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Gd}$). *Хімія, фізика та технологія поверхні*, 2017. 8(2). С. 155-164. <https://doi.org/10.15407/hftp08.02.155>

18. Харламов, Ю. О., Романченко О. В., Міцик А. В. Особливості отримання оксидних покриттів детонаційно-газовим напиленням. *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 2020. 4 (260). С. 129-140.

19. Хімічна технологія кераміки [Електронний ресурс]: підручник для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія»/ І.С. Суббота, Л.М. Спасьонова, В.Ю. Тобілко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 178 с.

20. Zhijian Yin, Shunyan Tao, Xiaming Zhou. Effect of the thickness on properties of Al_2O_3 coatings deposited by plasma spraying. *Materials characterization*, 2011. 62. P.90-93.

21. Kosenko N.F. Alumina polymorphism. *Izv. Universities. Chemistry and chemical technology*. 2011. Vol. 54. Is. 5. P. 3 - 16.

22. Analysis of the structural condition of a surface coating after electroerosive alloying. I. Features of formation of electroerosive coatings on steel 45 / V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, I. V. Konoplianchenko, N. S. Evtushenko, V. A. Herasymenko. *Metallofizika i noveishie tekhnologii*, 2018. Vol. 40, № 2. P. 235–253. DOI: 10.15407/mfint.40.02.0235

23. Тарельник В.Б, Коноплянченко Є.В., Гапонова О.П, Тарельник Н.В. Забезпечення захисту поверхонь торцевих імпульсних ущільнень турбомашин шляхом формування зносостійких наноструктур: монографія / під загальн. ред. В.Б. Тарельника. Суми: Університетська книга. 2022. 252 с.

24. Тарельник В. Б., Марцинковський В. С. Модернізація та ремонт роторних машин : монографія. Суми : Вид-во «Козацький вал», 2005. 364 с.

25. Manakova O. S., Kudryashov A. E. Levashov E. A. On the application of dispersion hardened SHS electrode materials based on (Ti, Zr)C carbide using

electrospark deposition. In: *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2015. Vol. 51. Is. 5, pp. 413-421.

26. Тарельник В. Б. Управление качеством поверхностных слоев деталей комбинированным электроэрозионным легированием. Сумы : Изд-во «МакДен», 2002. 323 с.

27. Повышение качества покрытий нанесенных электроискровым методом / Т. С. Скобло, А. Д. Мартыненко, А. В. Харьяков и др. *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства*. Харків, 2004. Вип. 23: Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні. С. 191–196.

28. Изучение напряженного слоя после ЭИО / Т. С. Скобло, А. И. Сидашенко, А. А. Науменко и др. *Повышение надежности восстанавливаемых деталей машин* : сборник научных трудов. Харьков : ХГТУСХ, 1999. С. 63–66.

29. Скуйбіда, О. Л., and І. П. Волчок. "Підвищення якості алюмінієвих сплавів за рахунок модифікування." *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarya*, 2011. Vol. 37: 235-237.

30. Марченко, А. П., Пильов, В. О., Ліньков, О. Ю., & Ликов, С. В. (2021). Порівняльна оцінка повзучості поршневих алюмінієвих сплавів. *Двигуни внутрішнього згоряння*, (2), 43-49.

31. Василенко, А. С., Мельник О. О. Особливості оброблення алюмінієвих сплавів. *Інновації молоді в машинобудуванні 2024*. 2024. Електронний ресурс: <https://imm-mmi.kpi.ua/imm2024/paper/view/30683/17690>

32. Кольорові метали і сплави: Навчальний посібник / В. Л. Грешта, О. В. Климов, О. В. Лисиця, Л. П. Степанова. Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. 336 с

33. Тарельник В. Б., Марцинковский В. С., Антошевский Б. Современные методы формообразования поверхностей трения деталей машин : монография. Сумы : Издательство «МакДен», 2012. 280 с.

34. Gaponova O.P., Tarellyk V.B., Tarellyk N.V., Myslyvchenko O.M. Nanostructuring of Metallic Surfaces by Electrospark Alloying Method. *JOM*. 2023. 75 (9). 3400 – 3412. <https://doi.org/10.1007/s11837-023-05940-1>
35. Осташ, О. П., Андрейко, І. М., Маркашова, Л. І., Головатюк, Ю. В., Семенець, О. І., Ковальчук, Л. Б. Вплив тривалої експлуатації на структуру і фізико-механічні властивості алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 2013.
36. Nikolenko S. V. Nanostructuring a steel surface by electrospark treatment with new electrode materials based on tungsten carbide. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2011. Vol. 47. Iss. 3. P. 217-224.
37. Vladislav P. Smolentsev *et al* 2018 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **327**, 042015, DOI 10.1088/1757-899X/327/4/042015
38. ГОСТ 14113-78 Сплавы алюминевые антифрикционные. Марки.
39. Методи та засоби мікроскопії: моногр. / В.С. Антонюк, Г.С. Тимчик, Ю.Ю. Бондаренко та ін. К.: НТУУ "КПІ", 2013. 336 с.
40. Бялік О. М., Кіндрачук М. В., Кондратюк С. Є., Черненко В. С. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія. Київ : Політехніка, 2006. 328 с.
40. Скануюча електронна мікроскопія. [URL](#): (дата звернення 21.10.2024)
41. 5449 Методичні вказівки щодо виконання лабораторної роботи з теми "Визначення твердості матеріалів" із дисципліни "Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів" [Електронний ресурс] : для студ. спец. 132 "Матеріалознавство" усіх форм навчання / А. І. Дегула, Т. П. Говорун, Н. А. Харченко. — Суми : СумДУ, 2022. — 23 с.
42. Yang, T., Chen, Q., Li, X. *et al*. Low-temperature synthesis of $Ti_3Al(Sn)C_2$ solid solution using replacement reaction. *J Mater Sci: Mater Electron*, 2020. Vol. 31. P. 20601–20610. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04580-4>
43. Юрченко В.І., Юрченко О.В., Фомічов В.М., Баранов С.А., Дікусар О.І. Отримання нанониток в умовах електророзрядної обробки сплавом Al-Sn. *Електронна обробка матеріалів*, 2009. Том 45. № 4. С. 4-10.

44. Nandana Bhardwaj, Subhas C.Kundu, Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. In : *Biotechnology Advances*, 2010. Vol. 28. P. 325-347.
45. Юрченко В.І., Юрченко О.В., Дікусар О.І. Застосування бар'єрних шарів при отриманні наноструктурованих електроіскрових покриттів підвищеної товщини на алюмінієвих сплавах. *Електронна обробка матеріалів*, 2018. Том 54. № 4. С. 9-13 , <https://doi.org/10.5281/zenodo.1345710>
46. Yurchenko, V.I., Yurchenko, E.V. & Dikusar, A.I. Thick-Layer Nanostructured Electrospark Coatings of Aluminum and Its Alloys. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 2020. Vol. 56 P. 656–664. <https://doi.org/10.3103/S1068375520060162>
47. Економіка виробничого підприємства: Навчальний посібник / За ред. І. М. Петровича. К.: Знання 2001. 405 с.
48. Атамас П.Й. Управлінський облік: [навчальний посібник] / П.Й. Атамас. – К.: Центр навчальної літератури, 2006. – 440 с.
49. Ресурс НПАОП 28.5-1.02-07 Правила охорони праці при термічній обробці металів <https://pro-oboі.com.ua/doc/15180/>
50. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов, Р. В. Сабарно, О. І. Полукаров, В. С. Коз'яков, Л. О. Мітюк. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. К.: Основа, 2006. 448 с.
51. Крюковська О.А., Левчук К.О. Охорона праці в галузі (для хімічних спеціальностей) під редакцією к.т.н., доцента Толока А.О.: Навч. посібник. – 2011. – 230 с.
52. Величко О.М., Зеркалов Д.В. Контроль забруднення довкілля: Навчальний посібник. К.: Основа, 2002. 256 с.
53. Зеркалов Д.В. Екологізація енергоспоживання: Монографія. К.: ТОВ Міжнар. фін. агенція, 1998. 271 с.