

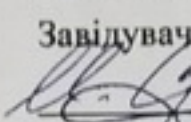
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Зварювальний факультет
Кафедра інженерії поверхні

«На правах рукопису»
УДК 620.178.16

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

 Л.В. Смирнов

«4» 12 2019р.

Магістерська дисертація

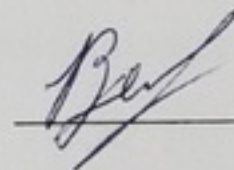
на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» («Споріднені технології
зварювання та ресурсозбереження»)

на тему: «Формування та зносостійкість електроіскрових покриттів
системи $\text{AlN-TiB}_2\text{-Si}_2$ на сплавах алюмінію»

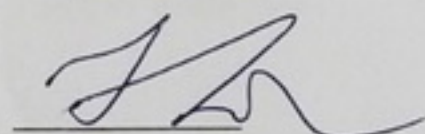
Виконав:

студент II курсу, групи ЗП-81мп
Овсієнко Іван Анатолійович



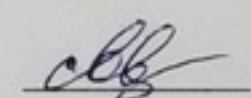
Керівник:

Професор, д.т.н,
Копилов В. І.

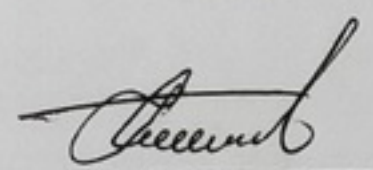


Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях

Професор, д.т.н,
Левченко О. Г.

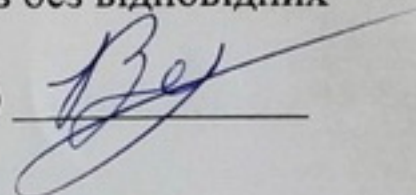


Рецензент: Доцент, к.т.н.
Сидоренко П. Ю.



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

Студент (-ка)



Київ – 2019 року

Реферат

Одним з актуальних завдань сучасного матеріалознавства є підвищення зносостійкості і твердості такого важливого класу конструкційних матеріалів, як алюмінієві сплави, широко використовувані в авіабудуванні, аеронавтики та інших галузях машинобудування. Це завдання вирішується шляхом нанесення захисних покриттів з використанням традиційних методів газотермічного напилення, хімічного осадження з газової фази, лазерного легування і ін. В ряду перерахованих способів електроіскрового легування (ЕІЛ), що відносяться до екологічно чистих технологій, відрізняється низькою енергоємністю, простотою процесу, малими габаритами обладнання в поєднанні з високою ефективністю підвищення рівня фізико-механічних властивостей поверхні.

Мета роботи: створення зносостійких електроіскрових покриттів на алюмінієвих сплавах без втрати маси деталі в процесі обробки за рахунок легуючих матеріалів систем AlN-Ti $\text{B}_2\text{-Ti}$ Si_2 , шляхом встановлення закономірностей масопереносу, змочування, структуроутворення, фазових перетворень і фізико-механічних властивостей.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні завдання:

- встановлення особливостей структурних і фазових перетворень при ЕІЛ сплавів АЛ9, АЛ25, Д16Т композиційною керамікою на базі комплексного дослідження структури і складу як покриттів, так і легуючих електродних матеріалів;
- вивчення кінетики електромасопереносу з урахуванням адгезійної взаємодії, змочування і формування вторинної структури; побудова фізико-хімічної моделі ЕІЛ алюмінієвих сплавів;
- отримання композиційних електроіскрових покриттів на сплавах алюмінію з підвищеною твердістю і зносостійкістю; використання ЕІЛ-підшару для нанесення газотермічних покриттів;

- встановлення особливостей трибологічних поведінки ЕІЛ-покриттів з урахуванням впливу режимів тертя, способів нанесення і складу електрода;
- видача практичних рекомендацій;

Предмет дослідження: підвищення зносостійкості і забезпечення процесу ЕІЛ без втрати маси деталі, склад, структура, закономірності масопереносу, мікромеханічні і триботехнічні властивості ЕІЛ-покриттів.

Методи дослідження: рентгенівська дифрактометрія, електронна мікроскопія, металографія, мікрорентгеноспектральний аналіз, термогравіметрія. Дослідження електромасопереносу - гравіметричним методом, тертя і зносу в умовах сухого тертя, вивчення потенціодінамічним методом електрохімічної поведінки покриттів. Для статистичної обробки результатів використаний метод Стьюдента.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

Розроблений спеціальний стенд, який дає змогу виконувати декілька технологічних операцій на одному стенді. Що в свою чергу зменшує тривалість переходів вузлів між установками.

Практичне значення одержаних результатів. Застосування нового технологічного процесу на виробництві, дасть змогу значно збільшити продуктивність виготовлення, зробити процес виготовлення швидшим, таким чином збільшити виробничу програму, одночасно даючи економію витрат на виготовлення одної одиниці виробу.

Магістерська дисертація представлена: розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з реферату, 7-ми частин, висновків, переліку посилань, та додатків. Обсяг роботи: 110 арк. формату А4 та графічної частини- 3 аркушів формату А1

Ключові слова: електроіскрове легування, мікроструктури, покриття, електроерозія, AlN-TiB₂-TiSi₂, кінетика.

Abstract

One of the urgent tasks of modern materials science is to increase the durability and hardness of such an important class of structural materials as aluminum alloys, widely used in aviation, aeronautics and other engineering fields. This problem is solved by applying protective coatings using the traditional methods of gas thermal spraying, chemical deposition from the gas phase, laser doping, etc. In a number of the listed methods of electrospark alloying (EIL) related to environmentally friendly technologies, it is characterized by low energy intensity, simplicity of the process, small dimensions of the equipment in combination with high efficiency of increasing the level of physical and mechanical properties of the surface.

Purpose of work: creation of wear-resistant electrospark coatings on aluminum alloys without loss of mass of the part in the process due to the alloying materials of AlN-Ti B₂-Ti Si₂ systems, by establishing regularities of mass transfer, wetting, structure formation, phase transformations and physical and mechanical properties.

To achieve this goal, the following tasks were solved in the work:

- establishment of features of structural and phase transformations at EIL of alloys AL9, AL25, D16T by composite ceramics on the basis of complex research of structure and composition of both coatings and alloying electrode materials;
- study of the kinetics of electromassage with regard to adhesion interaction, wetting and formation of the secondary structure; construction of physicochemical model of EIL aluminum alloys;
- obtaining composite electrospark coatings on aluminum alloys with high hardness and wear resistance; use of EIL sublayer for gas-thermal coatings;
- determination of the tribological behavior of EIL coatings taking into account the influence of friction modes, methods of application and composition of the electrode;
- issuing practical recommendations;

Subject of research: increase of durability and maintenance of process of EIL without loss of mass of details, structure, structure, regularities of mass transfer, micromechanical and tribotechnical properties of EIL coatings.

Research methods: X-ray diffractometry, electron microscopy, metallography, micro-X-ray spectral analysis, thermogravimetry. Study of electromass transfer - gravimetric method, friction and wear in conditions of dry friction, study of potentiodynamic method of electrochemical behavior of coatings. Student's method was used for statistical processing of results.

The scientific novelty of the obtained results is the following:

A special stand for assembly-welding of an autoclave is developed, which allows to perform several technological operations on one stand. Which in turn reduces the duration of node transitions between installations.

The practical significance of the results obtained. The use of a new manufacturing process will significantly increase the manufacturing productivity, make the manufacturing process faster, thus increasing the production program, while saving the cost of manufacturing one unit of the product.

Master's dissertation presents: explanatory note and graphic part. The explanatory note consists of an abstract, 7 parts, conclusions, a list of references, and appendices. Volume of work: 110 sheets. A4 size and graphic part - 3 sheets A1 format

Keywords: electrosark doping, microstructures, coatings, erosion, AlN-TiB₂-TiSi₂, kinetics,

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1 ЗНОСОСТІЙКІ ПОКРИТТЯ НА АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ ТА МЕТОДИ ЇХ НАНЕСЕННЯ	12
1.1 Сучасні методи і матеріали для отримання зносостійких покриттів на алюмінієвих сплавах.....	12
1.2 Особливості електроіскрового легування алюмінію і його сплавів.....	16
1.3 Характеристика методу ЕІЛ.....	21
1.4 Модель формування електроіскрових керамічних покриттів на сталях і титанових сплавах.....	29
2 МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	39
2.1 Методи отримання і характеристика електродних матеріалів.....	39
2.2 Устаткування і методи нанесення покриттів.....	40
2.3 Методи дослідження кінетики масопереносу, складу, структури і фізико-хімічних властивостей поверхні	42
2.4 Методи вивчення триботехнічних і мікромеханічних властивостей	44
3 СТРУКТУРА, СКЛАД І ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ, ЛЕГУЮЧІ ЕЛЕКТРОДІВ.....	46
3.1 Фізико-механічні властивості електродних матеріалів на основі AlN-Ti (Zr) B ₂ -Ti (Zr) Si ₂	46
3.2 Мікроструктура поверхні	48
3.3 Корозійна стійкість	50
4 СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА СКЛАД ЕІЛ-ПОКРИТТІВ НА АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ.....	52
4.1 Кінетика масопереносу при ЕІЛ алюмінієвих сплавів композиційної кераміки на основі AlN-Ti B ₂	52
4.2 Фактори, що впливають на формування легованого шару	54
4.3 Склад і структура покриттів, що формуються при електроіскровому модифікуванні матеріалами на основі нітриду алюмінію	57
4.4 Фізико-хімічна модель формування ЕІЛ-покриттів на алюмінієвих сплавах	64
5 ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕІЛ-ПОКРИТТІВ НА СПЛАВАХ АЛЮМІНІЮ	67
5.1 Триботехнічні характеристики ЕІЛ-покриттів з великим вмістом бору.....	67
5.2. Триботехнические характеристики ЕІЛ-покриттів на основі нітриду алюмінію	69
5.3. Вимоги до матеріалу електрода, призначеному для ЕІЛ сплавів алюмінію.....	71
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	73
6.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів	73
6.2 Забезпечення безпеки праці	74
6.2.1 Освітлення приміщення.....	74
6.2.2 Шум і вібрація	76
6.2.3 Організація робочих місць	77
6.2.4 Електробезпека	77
6.2.5 Електробезпека	79
6.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці.....	81
6.4 Пожежна безпека.....	82

	9
7. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	85
7.1 Опис ідеї проекту	85
7.2 Технологічний аудит ідеї проекту	86
7.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	87
7.4 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	93
7.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	96
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	99
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	101
ДОДАТКИ.....	107

ВСТУП

Одним з актуальних завдань сучасного матеріалознавства є підвищення зносостійкості і твердості такого важливого класу конструкційних матеріалів, як алюмінієві сплави, широко використовувані в авіабудуванні, аеронавтики та інших галузях машинобудування. Це завдання вирішується шляхом нанесення захисних покриттів з використанням традиційних методів газотермічного напилення, хімічного осадження з газової фази, лазерного легування і ін. В ряду перерахованих способів електроіскрового легування (ЕІЛ), що відносяться до екологічно чистих технологій, відрізняється низькою енергоємністю, простотою процесу, малими габаритами обладнання в поєднанні з високою ефективністю підвищення рівня фізико-механічних властивостей поверхні. Однак ЕІЛ алюмінієвих сплавів традиційними компактними електродними матеріалами (металами, їх сплавами і металоподібними тугоплавких сполук) супроводжується інтенсивною електроерозією катода з втратою маси деталі, що перевищує масоперенос продуктів електроерозії електрода (анода), внаслідок низької температури плавлення алюмінію. Перерозподіл енергії іскрового розряду за рахунок часткової втрати енергії в міжелектродному проміжку (МЕП) забезпечує приріст маси катода (деталі). Зроблено припущення про те, що аналогічний ефект може бути досягнутий в процесі ЕІЛ компактным електродом в тому випадку, якщо під дією іскрового розряду в умовах високотемпературного окислення матеріал електрода еродує з утворенням в МЕП парів і частинок діелектричних компонентів, які створюють екрану хмару над поверхнею алюмінієвого катода, пригнічуючи його електроерозію. Такими діелектричними компонентами можуть бути AlN , Al_2O_3 , B_2O_3 . У зв'язку з цим було використано і розроблено нове покоління керамічних електродних матеріалів для ЕІЛ алюмінієвих сплавів - композити на основі нітриду алюмінію з електропровідної боридною фазою системи $AlN-Ti$ (Zr) B_2-Ti (Zr) Si_2 , що дозволило вперше реалізувати ЕІЛ алюмінієвих сплавів компактними електродами на основі тугоплавких сполук без втрати маси катода в процесі обробки. Модифікування поверхні зазначеними композитами, які в умовах електромасо переносу і трибоокислення можуть забезпечувати утворення

сполук (МУЛЛИТО, β - тиліт), що грають роль твердого змащення при сухому терті ковзання, призвело до зниження коефіцієнта тертя (до 0,20) і інтенсивності зношування алюмінієвих сплавів в 2 ...3 рази. Вивчення процесів масопереносу і трибологічної поведінки ЕІЛ-покриттів на алюмінієвих сплавах при електроіскровому модифікуванні керамічними електродами в літературі відсутня. Крім того, в узагальненій моделі ЕІЛ, запропонованій Б.Р. Лазаренко, Б.М. Золотих і А.Д. Верхотурова, не розглядається можливість модифікування легкоплавких металів, що вимагає подальшого розвитку фізико-хімічних уявлень про формування легованого шару.

1 ЗНОСОСТІЙКІ ПОКРИТТЯ НА АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ ТА МЕТОДИ ЇХ НАНЕСЕННЯ

1.1 Сучасні методи і матеріали для отримання зносостійких покриттів на алюмінієвих сплавах

Підвищення фізико-механічних властивостей і зносостійкості алюмінію і його сплавів є актуальною технічною задачею, вирішення якої дозволяє різко знизити масу багатьох деталей і конструкцій машин, що особливо важливо для авіаційної і ракетно-космічної техніки.

Існує два шляхи підвищення службових характеристик конструкційних матеріалів, в тому числі і алюмінієвих сплавів - об'ємне і поверхневе модифікування. Однак, слід зазначити, що об'ємне легування, як правило, хоча і дозволяє в значній мірі підвищити службові характеристики алюмінію, часто є неекономічним, а в багатьох випадках недоцільним через втрату інших цінних властивостей [1]. Сучасним актуальним науковим напрямком є розробка технології нанесення захисних керамічних покриттів. Розширення областей застосування легких металів стало підставою для розробки комбінованих покриттів на легких металевих підкладках, включаючи алюміній і алюмінієві сплави, для досягнення високого рівня триботехнічних властивостей. В цьому напрямку вирішуються дві основні задачі, в тому числі стосовно алюмінієвих сплавів:

1. підвищення робочої температури сплаву за рахунок нанесення теплозахисних бар'єрних шарів;
2. підвищення зносо- і корозійної стійкості сплаву за рахунок нанесення градієнтних керамічних покриттів.

Для підвищення експлуатаційних характеристик виробів з алюмінію і його сплавів використовують різні методи обробки, що додають поверхні необхідні функціональні властивості хімічне і гальванічне осадження металевих покриттів, нітрування з використанням пульсуючої плазми, нанесення твердих

зносостійких покриттів методами хімічного газофазного осадження, плазмово-хімічне нанесення оксидно-керамічних покриттів в кислих електролітах, термічне напилення і ін. Значний обсяг досліджень пов'язаний з азотуванням алюмінію для утворення на його поверхні зносо і корозійно стійкого нітриду алюмінію. Це досягається різними шляхами - лазерним модифікуванням, хімічним осадженням з пари і плазмовим напиленням. Однак, нанесення нітриду алюмінію на поверхню Al-сплаву є не найефективнішим способом захисту від зносу і корозії, так як композиційні матеріали на основі AlN забезпечують більш високий рівень триботехнічних і корозійних властивостей в порівнянні з індивідуальним AlN. Прикладом можуть служити покриття з композиційних матеріалів систем AlN-TiB₂, TiCN-AlN, TiCN-AlN-SiC. [2-7].

Для зміцнення поршнів, що застосовуються в автомобільних і тракторних двигунах внутрішнього згоряння, більш технологічними є методи дугового наплавлення з додатковим легуванням розплавленої ванни спеціальної присадочним або електродним дротом.

Для відновлення і зміцнення деталей з жароміцних алюмінієвих сплавів, зокрема поршнів дизельних двигунів, виготовлених зі сплаву АЛ25, розроблена технологія імпульсно-дугового наплавлення електродом, що плавиться. В якості електрода, що плавиться, застосовували порошковий дріт ПП-МА-5. Використання порошкового дроту дозволяє в широких межах змінювати хімічний склад наплавленого металу, варіюючи вміст компонентів в шихті, а також застосовуючи в якості оболонки порошкового дроту алюмінієву стрічку різних складу і товщини. Застосування імпульсно-дугового наплавлення для відновлення поршнів дизельних двигунів дозволило підвищити стабільність режиму процесу, поліпшити перемішування розплавленого металу, а отже, його однорідність, активізувати процес дегазації металу зварювальної ванни з метою отримання щільного наплавленого металу.

При легуванні наплавленого металу за рахунок компонентів шихти порошкового дроту ПП-МА-5 утворюється насичений легуючими елементами (Mn, Si, Cu) твердий розчин алюмінію. Наплавлений метал має дрібнозернисту структуру з рівномірним розподілом надлишкових фаз, що забезпечує його

підвищену зносостійкість [8]. Однак цей спосіб не позбавлений недоліків. Так, зокрема, застосування аргоно-дугового наплавлення неплавким електродом з присадковим дротом пов'язане з відносно низькою продуктивністю процесу, необхідністю використання в якості присадки композиційних дротяних матеріалів волокнистої будови, великодисперсністю зміцнюючих фаз і їх нерівномірним розподілом в наплавленого металу, що призводить до його руйнування в процесі подальшої проточки канавки і при експлуатації поршнів. У разі наплавлення порошковим дротом потрібна попередня обробка кромки в тілі поршня, мають місце інтенсивне розбризкування електродного металу і підвищена пористість наплавленого металу. Причини утворення пір і підвищення щільності наплавленого металу докладно досліджені в роботах. Спроба усунення цих недоліків була зроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, де була розроблена технологія локального зміцнення поршнів з алюмінієвих сплавів, яка полягає в наплавленні на тіло поршня високолегованого зносостійкого шару способом дводуговим наплавлення з використанням електродів, що плавиться і не плавиться [10, 11]. Роль дуги при неплавкому електроді зводиться в основному до проплавлення тіла поршня на задану глибину і катодного очищення поверхні основного металу і розплавленої ванни від оксидних плівок.

Сучасне обладнання для плазмового напилення дозволяє отримувати як дисперсно-зміцнені композиційні матеріали на основі легких сплавів, так і комбінацію волокнистих матеріалів з дисперсно-зміцненою матрицею. Вельми перспективним є зміцнення алюмінієвих сплавів дискретними частинками і волокнами. Такі матеріали поряд з низькими значеннями щільності мають високі зносостійкість і міцність, що дозволяє використовувати їх в конструкціях і деталях, що працюють в умовах підвищеного зносу і великих навантажень.

Для отримання дисперсно-зміцненого алюмінію був розроблений спосіб отримання порошків композитів Al-SiC, AlSi-SiC методом прокатки суміші порошків алюмінію або його сплавів і карбіду кремнію з наступним подрібненням продуктів прокатки. Способом прокатки порошків були отримані матеріали Al-17% SiC, Al-40% SiC, Al-50% SiC, силумін-50% SiC [13].

Дослідження мікроструктури композиційного матеріалу, отриманого способом газотермічного напилення у вигляді покриття товщиною 2 мм на алюмінієвій підкладці, показало [13] повну відсутність пористості, що свідчить про оптимальний режим напилення, хорошого зчеплення матриці і зміцнення. Матеріали систем Al-SiC і AlSi-SiC поряд з низькими значеннями щільності мають високі зносостійкість і міцність, що дозволяє використовувати їх в конструкціях і деталях, що працюють в умовах підвищеного зносу і великих навантажень.

Розроблено перспективні матеріали для іонно-плазмових покриттів на основі сплавів системи Al-Cu-Fe [14]. Структура таких покриттів містить квазі- та нанокристалічні інтерметалідні фази, що дає поєднання високої твердості, зносостійкості і в'язкості руйнування. На властивості покриттів, отриманих шляхом розпилення порошків, значний вплив має ступінь дисперсності і пористість порошків, що використовують [14]., дисперсний порошок забезпечує створення щільнішого покриття, але при цьому відбувається істотне зменшення вмісту алюмінію і кількості квазікристалічної фази в покритті, що позначається на твердості покриття і відтворюваності властивостей.

Застосування вищевказаних методів не завжди економічно вигідно, а в окремих випадках - утруднено через надмірного перегріву деталей (при імпульсно-дугового наплавленні, газополум'яному і плазмовому напиленні) або через недостатню твердості покриття (при гальванічному нанесенні).

Серед різних способів підвищення фізико-хімічних і механічних характеристик поверхні алюмінію і його сплавів перспективним методом є ЕІЛ. Метод ЕІЛ, заснований на використанні концентрованого потоку енергії - плазмового струменя іскрового розряду, відрізняється в ряді інших методів нанесення зносостійких покриттів низькою енергоємністю процесу, здійснюваного на повітрі, екологічною чистотою, простотою технологічної операції, що не вимагає висококваліфікованого обслуговуючого персоналу, а також попередньої підготовки оброблюваної поверхні, малими габаритами обладнання, можливістю локального нанесення покриття на будь-які струмопровідні матеріали і реалізується як в механізованому варіанті (з

автоматизацією процесу), так і у варіанті ручного вібратора [15,16]. Наведені в таблиці 1.1. для зіставлення деякі характеристики промислових установок плазмового напилення і ЕІЛ показують переваги методу ЕІЛ з точки зору споживчої потужності, габаритів обладнання, коефіцієнта використання матеріалу і відсутності попередньої обробки поверхні. Однак реалізувати технологію ЕІЛ алюмінію і його сплавів з використанням традиційних електродних матеріалів (металевих сплавів і композиційних матеріалів на основі металоподібних тугоплавких сполук) не є можливим через низьку температури плавлення алюмінію [17].

Таблиця 1.1 – Порівняльні характеристики методів нанесення покриття

Марка установки	Споживча потужність, кВт	Габарити обладнання, м	Коефіцієнт витратів матеріалу, %	Попередня обробка поверхні
Промислові установки для плазмового напилення (типу УПУ, Київ-7, АПР)	8...120	довжина 5,4...7,2 ширина 3,6...4,4 висота 0,5...1,8	35...80	Піскоструминний
Промислові установки для ЕІЛ (типу «Елітрон»)	0,4...0,8	довжина 0,37...0,65 ширина 0,27...0,45 висота 0,15...1,20	40...90	Не вимагається

1.2 Особливості електроіскрового легування алюмінію і його сплавів

ЕІЛ сталей і титанових сплавів досить широко висвітлено в літературі [18,19], відомості ж про ЕІЛ алюмінію і його сплавів вельми обмежені, що пов'язано з низькою температурою плавлення алюмінію (660 оС), що сприяє його інтенсивній ерозії при ЕІЛ. З іншого боку, у зв'язку з відсутністю у алюмінію високотвердих інтерметаллідних з'єднань, перспективним є розробка таких методів поверхневого зміцнення, в тому числі ЕІЛ, які забезпечували б утворення на поверхні структур, зумовлених не діаграмами стану сплавів

алюмінію [16], а формуванням композиційних матеріалів за участю тугоплавких сполук для більш ефективного підвищення рівня фізико-механічних характеристик алюмінієвих сплавів. В цьому аспекті представляє інтерес застосування захисних покриттів з використанням в якості матеріалу, що наноситься тугоплавких сполук, що дозволяють значно підвищити зносо, жаро- і корозійну стійкість матеріалу основи.

1.2.1. ЕІЛ компактними електродами

Дослідження процесу ЕІЛ алюмінієвих сплавів АК4 і АЛ25 були проведені в роботі [20]. Як матеріал електродів застосовували Fe, Ti, Cu, тверді сплави ВК2, ВК4, ВК6, ВК8, Т16Т, Т15К6, сплави на основі алюмінію АЛ25, АМц, АМг-2, АМг-6. Легування здійснювалося на механізованій установці, зібраної на базі токарного верстата з генератором імпульсів від ЕФД-25М на режимах з робочими струмами 80 ... 100 А. Результати цієї роботи показали, що легування алюмінієвого сплаву АЛ25 твердими сплавами призводить до руйнування матеріалу катода, яке супроводжується зменшенням його маси. При цьому зі зменшенням кобальту в твердому сплаві знижується коефіцієнт масопереносу. При ЕІЛ алюмінієвих сплавів АК-4М і АЛ25 матеріалами, що мають температуру плавлення, порівнянну з температурою плавлення алюмінію, маса катода в процесі обробки зростає. Найбільший приріст катода досягається при зміцненні алюмінієвими сплавами Д16Т і АМг-2, найбільший коефіцієнт масопереносу - при ЕІЛ міддю і сплавом АЛ25.

Характерною особливістю електроіскрових покриттів на сплаві АЛ25 при ЕІЛ алюмінієвими сплавами, залізом, сталлю або міддю є формування окремих «острівців», висота яких найбільша при ЕІЛ міддю (0,8 ... 1,5 мм) [20]. При легуванні міддю спостерігаються висока твердість легованого шару (2,1 ... 2,2 ГПа) і адгезійна міцність (0,08 ... 0,1 ГПа) за рахунок утворення в легованому шарі інтерметалліда Al-Cu і оксиду міді [20].

Ефективність процесу ЕІЛ сплаву АЛ25 і АК-4М міді в значній мірі визначається обраними параметрами процесу:

- а) число проходів легуючого електрода n надає особливо великий вплив на коефіцієнт масопереносу. Його зменшення або збільшення в порівнянні з оптимальним ($n = 4$) на два-три проходи зменшує коефіцієнт масопереносу в 3 ... 4 рази.
- б) з підвищенням струму короткого замикання $I_{к.з.}$ до величини ≤ 100 А кількість матеріалу, перенесеного з анода на поверхню катода, збільшується, при цьому твердість поверхневого шару практично не змінюється; при $I_{к.з.} > 100$ А твердість легованого шару зменшується.

Однак, легування на режимах з високим значенням робочого струму (> 20 А) не виправдане, тому що з практики ЕІЛ відомо [18,19], що при обробці сталей, титанових сплавів і інших матеріалів кращі результати отримані при легуванні на режимах з робочими струмами до 5 А. Перевищення цього значення призводить до утворення в поверхневих шарах великої кількості дефектів (пор, тріщин), нерівномірності самого покриття, а також високих залишкових напружень в ньому, які в деяких випадках перевищують межу міцності самого матеріалу катода. Прояв цих недоліків при ЕІЛ алюмінію тим більш імовірно. Отже, якщо навіть при зміцненні поверхні алюмінію на зазначених режимах збільшується поверхнева твердість, то в підсумку така поверхня через дефекти стає непридатною до експлуатації.

Масоперенос при ЕІЛ алюмінію марок А95, А5 і алюмінієвих сплавів АД31, АК4, Д16Т, Д20, АЛ3, АЛ25 АМг-6 і САП-1 досліджений в роботі для різних класів електродних матеріалів. Процес здійснювався в ручному і механізованому варіантах. Як електроди були використані метали: Pb, Zn, Al, Ag, Ni, Ti, Cr, Mo, Re, W, вуглець (C), карбіди вольфраму (WC), титану (TiC) і композиції (TiC + Ni). Було відзначено, що величина ерозії алюмінієвого катода істотно залежить від природи матеріалу електрода і корелює з його температурою плавлення. При використанні в якості електродів легкоплавких матеріалів Pb, Zn, Sn кількість продуктів електроерозії електрода, перенесених на катод переважно в рідкій фазі, в результаті впливу іскрових розрядів, переважає над ерозією матеріалу катода. У зв'язку з цим з плином часу маса, що прибуває на катод матеріалу поступово зростатиме, а отже, зросте і загальна маса

катода. У міру збільшення температури плавлення матеріалу легуючого електрода, кількість продуктів електроерозії, викинуте з його поверхні за один електричний імпульс, зменшується. В цьому випадку ерозія катода більша ніж перенесення матеріалу анода і його маса поступово зменшується. Легування металами з температурою плавлення більшої, ніж у алюмінію, призводить до того, що ерозія катода перевищує приріст маси за рахунок перенесення продуктів електроерозії електрода (тобто маса катода зменшується).

Металографічний і рентгенофазовий аналізи зразків, легуваних легкоплавкими металами, показали [21], що поверхневі шари складаються в основному з матеріалу обробного електрода. Наприклад, при ЕІЛ алюмінію цинком сформоване покриття складається з чистого цинку і невеликої кількості (~ 3%) оксидів цинку (ZnO_2), які утворюються в результаті взаємодії Zn з киснем повітря.

При ЕІЛ електродами з більш тугоплавких металів, ніж Al, незважаючи на істотну ерозію алюмінієвого катода, все ж певна кількість матеріалу анода досягає його поверхні і взаємодіє з нею. Так, на поверхні алюмінієвого катода після його обробки хромом, нікелем і міддю виявлені інтерметаліди $CrAl_7$, $NiAl$, $NiAl_3$, $CuAl_2$.

Таким чином, отримані дані показують, що при ЕІЛ компактними електродами на алюмінію можна нарощувати шари тільки в разі використання анодів з легкоплавких металів - Pb, Sn, Zn і ін., Температура плавлення яких менше, ніж у алюмінію. Обробка ж електродними матеріалами з температурою плавлення більшою, ніж у алюмінію, завжди призводить до переважної ерозії катода, при цьому процес може супроводжуватися модифікуванням поверхні.

У зв'язку з важливістю проблеми підвищення зносостійкості алюмінієвих сплавів шляхом їх ЕІЛ композитами на основі тугоплавких сполук були зроблені спроби придушити електроерозію алюмінієвого катода шляхом ЕІЛ через шар металевих порошків, насипаного на поверхню катода, або при дозованій подачі порошків в міжелектродний проміжок (МЕП), яке здійснювалося з бункера, оснащеного спеціальним дозуючим пристроєм [21,22]. Передбачалося, що це

надасть екранний вплив на поверхню катода і призведе до приросту маси катода. Детально це питання викладено в наступному розділі.

1.2.2 ЕІЛ порошковими сумішами

У роботах [21,22] встановлено, що при подачі порошкових сумішей в МЕП тим чи іншим способом, при однакових по потужності розрядах, що утворилися на поверхні катода, ерозійні лунки набагато менше по діаметру і глибині, ніж лунки, отримані при ЕІЛ компактними електродами, і при цьому вони заповнені матеріалом електрода і переплавленими частинками порошку. Отримані дані показують, що при подачі в МЕП в процесі ЕІЛ порошкового матеріалу ерозія катода різко зменшується. Незалежно від природи матеріалів використовуваних порошків з плином часу відбувається збільшення маси катода. Твердість сформованих покриттів має значення, близькі до твердості наносяться матеріалів. Наприклад, при подачі в МЕП порошку композиції ТН-20 (80% TiC, 20% Ni) твердість сформованого покриття на окремих ділянках досягає 17 ... 18 ГПа [21]. Припустили, що різке зменшення ерозії алюмінієвого катода в умовах ЕІЛ з подачею в МЕП порошкових матеріалів відбувається внаслідок перерозподілу енергії розряду в системі анод-МЕП-катод. При зближенні електродів електричне поле зростає пропорційно зменшенню відстані між електродами. Електричне поле, що збільшується, призводить до втягування в МЕП частинок, що знаходяться поблизу електродів. Частка порошку, що опинилися в міжелектродному проміжку ініціюють розряд на відстані між електродами більше пробивного [23,24]. При збільшенні відстані між електродами відбувається перерозподіл енергії, що виділяється на електродах і в МЕП. Частка енергії, виділеної на електродах, зменшується, а в МЕП - збільшується. При одночасному зменшенні ерозії електродів відбувається інтенсивне розплавлення частинок порошку, що потрапляють в канал розряду, перенесення цього матеріалу на підкладку (катод) і формування покриття. Позитивний внесок у формування покриття вносить і постійна складова струму короткого замикання при використанні RC-генераторів, який протікає через шар частинок порошку в момент контакту електродів. За рахунок цього струму

частинки додатково розігріваються і більш інтенсивно взаємодіють з матеріалом катода.

На прикладі ЕІЛ сплаву Д16Т нікелем показано [17], що твердість покриттів істотно залежить від режимів ЕІЛ, складу порошкової суміші і може змінюватися в процесі тертя.

Так як при ЕІЛ порошковими сумішами температура частинок суміші і мікрооб'ємів підкладки досягає температур плавлення і випаровування з'єднань і елементів, що входять до складу суміші, тоді на підкладці відбуваються процеси активного хімічного взаємодії електродних матеріалів, і склад покриттів завжди відрізняється від складу порошкової суміші і зміцнюваного матеріалу [25].

ЕІЛ алюмінієвого сплаву Д16Т порошковими сумішами на основі нікелю і графіту різко підвищує його зносостійкість: покриття практично не зношуються при швидкості ковзання 0,01 м / с і тиску в зоні контакту 1 ... 2 МПа протягом 10 ... 12 годин [17]. Слід зазначити, що нікель і графіт традиційно застосовуються для підвищення зносостійкості алюмінієвих сплавів [26], що працюють в умовах низьких перевантажених швидкісних параметрів. Результати робіт [25] свідчать про те, що в разі подання в МЕП порошкових матеріалів можливе отримання на алюмінії і його сплавах ЕІЛ-покриттів з тугоплавких матеріалів без втрати маси катода і створення зносостійких пар тертя.

Необхідно відзначити, що подача порошків в МЕП значно підвищує вартість технологій і ускладнює автоматизацію процесу ЕІЛ. Тому зазначений варіант ЕІЛ не знайшов широкого практичного застосування. Але, проведені дослідження показали можливість здійснення процесу ЕІЛ алюмінію і його сплавів з приростом маси катода шляхом перерозподілу енергії в МЕП.

1.3 Характеристика методу ЕІЛ

До числа ефективних сучасних методів зміни фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей металевих поверхонь відносяться електрофізичні методи, серед яких одним з перспективних є електроіскрове легування (ЕІЛ). Існують три основних напрямки в розвитку методу ЕІЛ: в газовому середовищі

компактним електродом, в газовому середовищі порошковим матеріалом, в електролітній плазмі. Найбільше застосування і розвиток знаходить в даний час метод ЕІЛ в газовому середовищі компактним електродом [19], який використовується в даній роботі. Суть методу полягає в тому, що при іскровому розряді в газовому середовищі відбувається переважно ерозія матеріалу анода і перенесення продуктів ерозії на катод, на поверхні якого утворюється шар зміненого складу і структури як за рахунок перенесення матеріалу, так і в результаті впливу імпульсних і теплових навантажень, що виникають при ЕІЛ.

Метод ЕІЛ дозволяє вирішити такі основні завдання [19]: 1) поліпшити фізико-хімічні властивості широко використовуваних конструкційних матеріалів нанесенням на їх поверхню тугоплавких металів, їх сплавів і композиційної кераміки; 2) розширити застосування тугоплавких металів, їх сплавів і композиційної кераміки шляхом створення на їх основі зносостійких і антикорозійних високотемпературних покриттів; 3) варіювати в заданому напрямку хімічним і фазовим складом поверхні твердого тіла з метою зміни зносостійкості, електроопору, емісійно-адсорбційних, теплофізичних та інших властивостей.

1.3.1 Класифікація видів ЕІЛ

Класифікація видів ЕІЛ (Рис. 1.1) заснована на критерії, який визначає співвідношення електричних параметрів розряду і механічної міцності матеріалу [27]. Кількість еродованої речовини в рідкій і паровій фазах визначається переважно тепловим впливом іскрового розряду, що залежать від величини струму короткого замикання $I_{к.з.}$. Кількість еродованої речовини у твердій фазі визначається імпульсними термомеханічними напруженнями, залежними від величини енергії в імпульсі E . Ці напруження виникають при нагріванні і кристалізації, від реактивної дії струменя стікаючих парів, від впливу ударної хвилі плазмового струменя в момент спаду струму в імпульсі, а також від удару інструмента і деталі.

Для спільного обліку теплового і механічного навантаження від дії іскрового розряду була введена величина $R = R_1 \cdot (1 - R_2)$ [19], яка визначає співвідношення електричних параметрів розряду $R_1 = I_{к.з.} / E$, [А/Дж] і механічного навантаження, виникає від удару інструменту і поверхні деталі, $R_2 = \sigma / [\sigma]$ (σ - внутрішня напруга в матеріалі електрода, $[\sigma]$ - допустимі внутрішні напруги, характерні для даного матеріалу). При $R > 100$ А/Дж переважає Рідкофазна і парова ерозія за рахунок переважно теплового впливу іскрового розряду на електрод, відповідно до цього область значень $R > 100$ А/Дж може бути визначена як «теплова» ЕІЛ. При $R < 100$ А/Дж домінує внесок твердої фази в ерозію - «термомеханічна» ЕІЛ. Кордон переходу від одного виду ЕІЛ до іншого, що визначається величиною $R \approx 100$ А/Дж, встановлений емпірично. Величина R є технологічним параметром обробки до серійного випуску установкам ЕІЛ. Кожному режиму обробки відповідають певні значення E і $I_{к.з.}$; при цьому тривалість імпульсу відповідає оптимальній величині 100 ... 150 мкс.

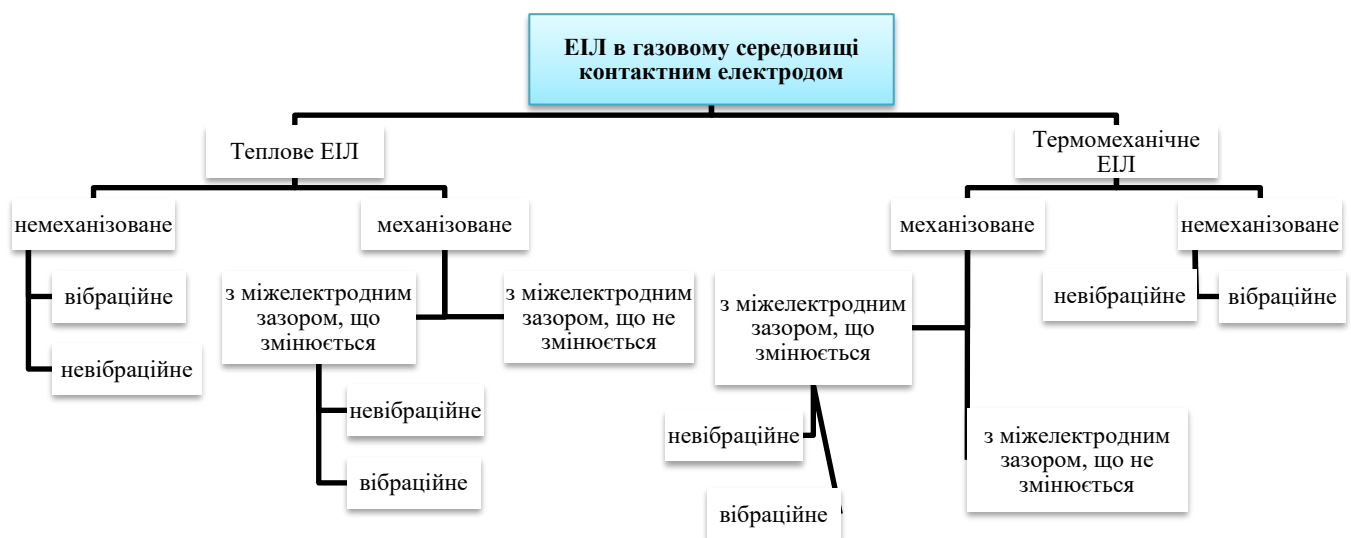


Рисунок.1.1. Класифікація видів ЕІЛ

Легування із змінним міжелектродним зазором здійснюється із застосуванням ручних вібраторів (вібраційний принцип) або зміцнюючих головок (безвібраційних принцип) або їх механічним переміщенням щодо зміцнюючих деталей. Вібраційний принцип реалізується, коли $R_2 < 0,1 \dots 0,2$,

безвібраційний - при $R_2 > 0,6 \dots 0,8$, коли твердофазна ерозія превалює навіть при великих $I_{к.з.}$ за рахунок удару інструменту і деталі.

ЕІЛ з постійним межелектродним зазором δ можливо тільки при механізованому або автоматизованому процесі, так як потрібно застосувати системи, що стежитимуть за процесом для підтримки певного зазору. При $\delta > 0$ (метод ЛЕН) підігрів електродів не відіграє суттєвої ролі в формуванні легованого шару. При $\delta = 0$, коли електроди знаходяться в механічному контакті під час обробки, має місце їх інтенсивний підігрів, котрий сприяє формуванню шару. При ЕІЛ з постійним зазором $R_2 \cong 0$ і $R = R_1 = I_{к.з.}/E$, А/Дж.

З ростом R збільшується жорсткість легованого шару, але одночасно зростає і його товщина. При термомеханічному ЕІЛ металами в поверхневому шарі катода виявляються в основному механічні суміші через низькі $I_{к.з.}$, в зв'язку з чим твердість легованого шару не перевищує $6000 \dots 10000$ МПа; з ростом R в шарі з'являються інтерметалліди, оксиди, нітриди, бориди, карбіди, що призводить до збільшення твердості покриття [28]. Однак для кожного виду ЕІЛ найбільша ефективність процесу досягається при утворенні матеріалами електродів взаємних твердих розчинів [29].

Таким чином, дана класифікація видів ЕІЛ дозволяє оцінити вплив на величину ерозії матеріалу різних видів і режимів ЕІЛ.

1.3.2 Області застосування методу ЕІЛ

В даний час метод ЕІЛ використовується для підвищення зносостійкості, корозійної стійкості, вогнестійкості та інших експлуатаційних властивостей деталей машин і механізмів в авіаційній, машинобудівній та оборонній промисловості. Практичне використання методу безперервно розширюється, що багато в чому пов'язано з механізацією і автоматизацією методу. Використання механізованих установок дозволяє значно розширити технологічні можливості методу - зменшити жорсткість, збільшити суцільність, однорідність легованого шару. Порівняно невелика продуктивність процесу ЕІЛ обумовлює специфіку

його практичного використання - зміцнення невеликих за площею ділянок, тобто локальне нанесення покриттів.

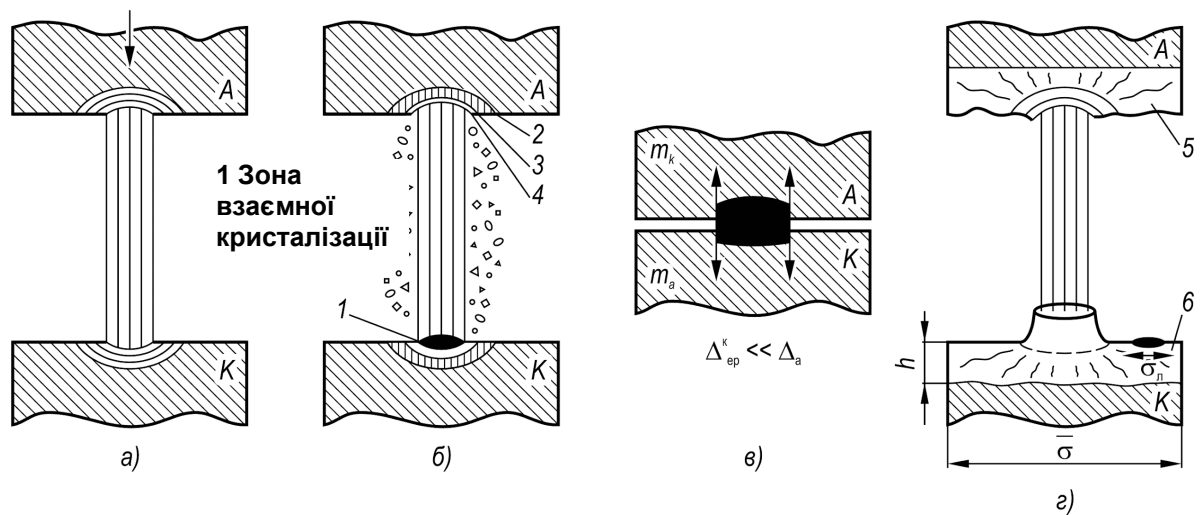
Найбільш широке практичне використання метод ЕІЛ знаходить при зміцненні габаритного ріжучого інструменту (свердла, фрези, різці, гільйотини і деревообробні ножі та ін.) і штампового оснащення з інструментальних і машинобудівних сталей [30]. ЕІЛ використовують для ремонту валів димососів і вентиляторів при ослабленні посадки підшипників [30], а також для поверхонь ущільнювачів трубопровідної арматури. Термін служби арматури після ЕІЛ збільшується в три-чотири рази. Є також досвід електроіскрового зміцнення для захисту входних кромek лопаток парових турбін (Харківський турбінний і Полтавський турбомеханічний заводи). Крім цього, ЕІЛ застосовується і для захисту зовнішніх поверхонь гільз, встановлених в трактах подачі вугільного пилу до пальників на котлоагрегатах. Термін служби гільз, виготовлених зі сталі Ст3, після ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 збільшився в два-три рази.

1.3.3 Узагальнена модель процесу ЕІЛ

Рішення матеріалознавчого аспекту проблеми ЕІЛ неможливо без знання моделі процесу, що включає фізичну сутність явищ, які протікають на робочих поверхнях електродів і в міжелектродному проміжку в умовах іскрового розряду.

Розглянемо модель процесу ЕІЛ стосовно немеханізованого вібраційного виду легування (використовуваному в цій роботі), що відрізняється від безвібраційних механізованого ЕІЛ (метод ЛЕН) наявністю контакту електродів і їх вібрацією. Це обумовлює підвищенні механічні навантаження на матеріал електродів і більший рівень їх фізико-хімічної взаємодії в першому випадку. Однак в цілому основні положення моделі зберігаються і для безвібраційних механізованого ЕІЛ. Згідно узагальненої моделі процесу немеханізованого вібраційного легування (Рис. 1.3) [31,32], іскровий розряд надає на матеріал електродів імпульсні тепловий і механічний вплив. Потік електронів призводить до локального розігріву електрода (анода), а в поперечному магнітному полі створює високий тиск в плазмовому шнурі розряду, в якому реалізується середня

електронна температура $T_i \approx (5 \dots 7) \cdot 1000^\circ \text{K}$ з середньою електронною щільністю $n_e \approx (4 \dots 13) \cdot 10^{16} \text{см}^{-3}$ (Рис. 1.2, а). В результаті впливу на поверхні електродів з'являються об'ємні джерела тепла, що призводять до виникнення ерозійних лунок на анод і катод. У самій лунці можна виділити три зони: випаровування, плавлення і напруженого стану (Рис. 1.2, б). Розмір зон плавлення і випаровування тим більший, чим менша температури плавлення $T_{\text{пл}}$, кипіння $T_{\text{кип}}$ і коефіцієнт теплопровідності матеріалу електрода λ .



а – пробій міжелектродного проміжку; б - утворення ерозійних лунок на анод і катод з трьома зонами - випаровування (4), плавлення (3), напруженого стану (2); в - момент контакту електродів (схоплювання і зворотний перенос); г - формування на аноді вторинної структури (5) і легованого шару (6) на катод

Рисунок 1.2. Узагальнена модель процесу ЕІЛ

Зона напруженого стану виникає за рахунок хвилі термічних і термомеханічних напружень в результаті імпульсного нагрівання, реактивної дії плазмового струменя і її розширення в момент спаду струму в імпульсі. Зміна внутрішніх термічних напружень, що виникають в поверхневому шарі при дії імпульсного джерела тепла, носить хвильовий характер, причому внутрішня напруга змінюється від розтягування до стискання, затухаючи зі збільшенням відстані від джерела. Великі значення напруг, що розтягуються на робочій поверхні електрода є основною причиною утворення тріщин і створення

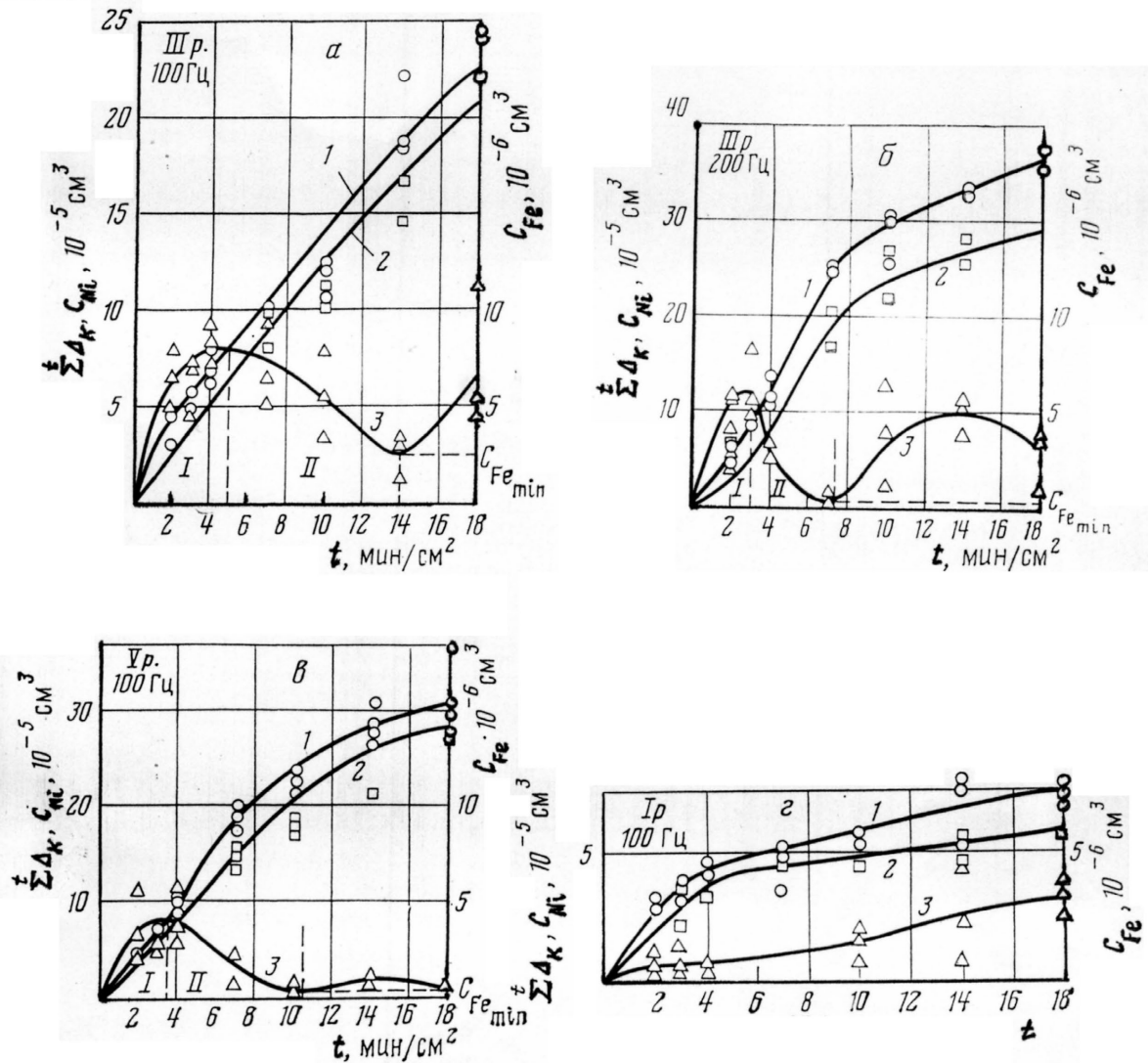
твердофазної ерозії, внесок якої до загального ерозійного ефекту залежить від режимів обробки і гомеопольного міжатомного зв'язку в матеріалі анода.

У плазмовому струмені присутні елементи матеріалу анода і домішкові елементи матеріалу катода. На катоді відбуваються інтенсивне перемішування і хімічна взаємодія матеріалу катода з перенесеним матеріалом анода не тільки в рідкій і паровій фазах, але і в твердій, причому частинки матеріалу анода твердої фази розміром 1 ... 2 мкм, як правило, не закріплюються на поверхні катода.

Наступний момент механічного контакту електродів також супроводжується інтенсивною хімічною взаємодією матеріалів, якому супроводжуються захоплення електродів і перенесення матеріалу з катода на анод за рахунок ефектів Томсона, Коллера і Пельтьє.

1.3.4 Кінетика масопереносу і фазоутворення при ЕІЛ

Масоперенос продуктів електроерозії з анода на катод характеризують коефіцієнтом масопереносу K , рівним відношенню величини сумарного приросту катода $\Sigma \Delta k$ до сумарної ерозії анода $\Sigma \Delta a$ за час обробки t : $Kt = \Sigma \Delta k / \Sigma \Delta a$. Максимальна величина коефіцієнта масопереносу, складова для сталей і титанових сплавів 60 ... 90%, є однією з умов ефективності процесу ЕІЛ. У тих випадках, коли електроерозія матеріалу катода перевищує приріст маси за рахунок перенесення матеріалу анода, має місце спад маси катода ($\Sigma \Delta k < 0$) і коефіцієнт масопереносу втрачає фізичний зміст, набуваючи негативні значення. Саме така ситуація реалізується при ЕІЛ легкоплавких металів, в тому числі алюмінію, традиційними електродними матеріалами - металевими сплавами і композитами системи "металоподібне тугоплавке з'єднання-металева зв'язка" [21].



1 - зміст Ni в сталях 55 (C_{Ni}), визначено атомно-абсорбційним методом; 2 - сумарний приріст катода ($\sum \otimes_k$); 3 - зміст заліза в Ni-аноді (C_{Fe}); а- III режим, 100 Гц; б-III, 200; в- V, 100; г- I режим, 100 Гц [89].

Рисунок 1.4. Кінетика процесу масопереносу для різних режимів ЕІЛ сталі 55 нікелем

Зворотний масоперенос матеріалу (з катода на анод) є одним з найважливіших моментів формування вторинної структури на аноді. Дані атомно-абсорбційного аналізу свідчать про нестационарність цього процесу. Таким чином, кінетика зворотного масопереносу розділяється на два етапи, пов'язаних з формуванням вторинної структури (I етап) і її руйнуванням (II етап). Частота повторення циклів руйнування і відновлення вторинних структур збільшується з ростом енергії в імпульсі і зі збільшенням частоти імпульсів. Зовнішні термомеханічні і фізико-хімічні впливи неминує призводять до

руйнування (ерозії) вторинних структур, але ці ж дії і пов'язують процеси перенесення з катода і з міжелектродного середовища забезпечують регенерацію вторинної структури на аноді при тривалій обробці.

В процесі ЕІЛ відбувається електроерозія матеріалу електрода. Продукти електроерозії взаємодіють в рідко-паровій і твердій фазах з матеріалом деталі і киснем повітря в мікрований розплав на робочій поверхні, де відбувається їх активне механічне перемішування [34,35]. Разом з тим, незважаючи на короткочасність електричного імпульсу ($t = 10^{-3}$ с), в МЕП створюються умови для протікання термічноактивних плазмохімічних реакцій. Це забезпечується високою температурою плазми ($5 \cdot 10^3 \dots 10^4$ С) і наявністю в потоці еродованої анодної речовини іонно-плазмової фази [36]. Висока температура і іонізація еродованих частинок активізують плазмохімічні реакції і дифузійні процеси в міжелектродному середовищі, створюючи умови для високотемпературного окислення компонентів і їх взаємодії з утворенням нових фаз. В результаті формуються ЕІЛ-покриття, фазовий склад яких відрізняється від складу легуючих електродів [34].

Головний висновок, який впливає з розгляду узагальненої моделі процесу ЕІЛ, полягає в необхідності врахування фізико-хімічної взаємодії продуктів електроерозії матеріалів електрода один з одним і з матеріалом катода в МЕП і на поверхні електродів в умовах високотемпературного окислення і зворотнього масопереносу.

1.4 Модель формування електроіскрових керамічних покриттів на сталях і титанових сплавах

Аналіз зміненого поверхневого шару (ЗПШ), що формується в процесі ЕІЛ, проведений Верхотуровим А.Д. [37] на основі багатьох робіт, приводить до наступних висновків:

1. на поверхні катода в процесі ЕІЛ утворюється шар зміненої структури і складу - так званий "білий" шар (БШ), що володіє високою твердістю, зносостійкістю, корозійну стійкістю;

2. безпосередньо до БШ прилягає дифузійна зона (ДЗ) і зона термічного впливу (ЗТВ) ("підшар"), що представляють різні фази і структури, в більшості випадків спостерігаються при термічній обробці матеріалів;

3. на поверхні катода в залежності від фізико-хімічної природи матеріалів електродів і режимів обробки можна отримати або покриття з матеріалу анода, або утворення зони спільної кристалізації, або дифузійну зону;

4. хімічний склад БШ в більшості випадків складається з елементів, що входять до складу матеріалу електродів і міжелектродного середовища. При цьому малокристалічні хімічні сполуки, тверді розчини та інтерметаліди утворюються в різних умовах;

5. ефект зміцнення БШ тим більше, чим більше твердість матеріалу легуючого електрода і менше потужність електроіскрового розряду;

6. ПС неоднорідний за хімічним, фазовим складом і властивостями як за глибиною, так і вздовж легованого шару;

7. кількість перенесеного матеріалу анода залежить від фізико-хімічного складу матеріалу катода;

8. маса катода в процесі ЕІЛ (з підвищенням питомого часу обробки) змінюється нелінійно і виражається кривою з максимумом;

9. чим більш інертне міжелектродне середовище, тим довше може тривати обробка одиниці площі катода і тим товщі можуть бути використані шари.

Таким чином, в приповерхневих шарах матеріалу катода в загальному випадку утворюється легований шар (ЛШ), що складається з БШ і ДЗ. ПС складається з ЛШ і ЗТВ. Залежно від фізико-хімічних властивостей матеріалу електродів, режимів обробки, міжелектродні середовища утворень деяких зон може не відбуватися.

В даний час в літературі немає єдиних поглядів на процесі формування ІПШ і його властивостей при ЕІЛ. Ряд дослідників припускає, що при іскровому розряді формування ІПШ на катоді і ефект його зміцнення відбувається в результаті переважно теплової дії іскрового розряду. Інші вважають, що основним фактором, що впливає на формування ІПШ і його зміцнення, є масоперенос матеріалу анода на катод. Існує також думка, що зміцнення

відбувається в результаті як перенесення речовини, так і теплового впливу іскрового розряду. Однак в більшості випадків розглядають зміцнення переважно за рахунок перенесення матеріалу. На зміну властивостей поверхні електродів при ЕІЛ також впливає і склад міжелектродного середовища. Так, в рідкому міжелектродному середовищі при іскровій обробці перенесення речовини електрода на протилежний невелике. З іншого боку, газове міжелектродне середовище зменшує охолодження поверхні електродів і продуктів ерозії в порівнянні з рідким, сприяє кращому переносу елементів ерозії на протилежний електрод і їх зчепленню з поверхнею. Однак при ЕІЛ як в рідкій, так і в газовому середовищі умови формування поверхневого шару і ефект зміцнення на різних ділянках поверхні катода відрізняються. Це пов'язано з тим, що елементи, котрі видаляються з електрода ерозії мають різний гранулометричний склад, температуру, вектор швидкості, в зв'язку з чим вони по-різному взаємодіють з поверхнею катода. З іншого боку, поверхня катода, на яку осідають елементи ерозії, має різну температуру на різних ділянках.

В роботі запропоновано класифікувати частки продуктів ерозії електрода по їх температурі. Елементами ерозії рідкої фази є сферичні частинки, що утворилися при охолодженні рідких крапель. Їх називають "гарячими" частинками, так як їх температура близька до температури плавлення $T_{пл}$ і вище температури частинок осколкової форми, що утворилися в результаті крихкого руйнування матеріалу електрода. Частинки крихкого руйнування називають "холодними" частинками, якщо їх температура $T_ч$ близька до температури навколишнього середовища $T_е$. Термін "розігріта" частка застосуємо до частинкам, для яких $T_е < T_ч < T_{пл}$. На основі цієї класифікації пропонуються наступні основні варіанти взаємодії продуктів ерозії з поверхнею катода:

- "Холодна" частка ($T_ч = T_е$) переноситься на "холодну" поверхню ($T_п = T_е$). У більшості випадків частки не закріплюються на поверхні;
- "Гаряча" частка ($T_ч \approx T_{пл}$) і "розігріта" частка ($T_ч < T_{пл}$) переносяться на "гарячу" поверхню ($T_п \approx T_{пл}$). У цих випадках, що відповідають оптимальним умовами формування ЛС, відбувається утворення зони

взаємної кристалізації, що супроводжується перемішуванням матеріалів частинки і основи (катода);

- "Холодна" частка переноситься на розігріту поверхню ($T_{\text{ч}} < T_{\text{п}} < T_{\text{пл}}$). У цьому випадку можливе закріплення частинок на поверхні без утворення зони взаємної кристалізації. У разі, якщо розмір частки ($R_{\text{ч}}$) менше ерозійної лунки ($R_{\text{ч}} < R_{\text{л}}$), можливе впровадження частки в розігрітий метал і утворення механічної суміші;
- "Розігріта" частка переноситься на "холодну" поверхню ($T_{\text{пл}} > T_{\text{ч}} > T_{\text{п}} \approx T_{\text{е}}$) або "гаряча" частка переноситься також на "холодну" поверхню ($T_{\text{п}} < T_{\text{ч}} \approx T_{\text{пл}}$). У цьому випадку також можливе закріплення частинок на катоді і утворення на його поверхні шару покриття з утворенням дифузної зони.

Таким чином, при одиничному іскровому розряді на поверхні катода знаходяться елементи ерозії матеріалу анода, що не зчепилися з поверхнею катода, ділянки покриття з матеріалу анода і розташованої нижче зони дифузії, а також ділянки зон взаємної кристалізації і механічної суміші матеріалів електродів.

Проведений аналіз [37] показує складність фізико-хімічних і механічних процесів, що протікають на поверхні електродів при ЕІЛ, які впливають на основні параметри легованого шару - його структуру і фазовий склад, що визначають в кінцевому підсумку властивості модифікованої поверхні.

Наявні літературні дані про формування легованого шару відносяться в основному до традиційно використовуваних електродними елементами на основі металевих сплавів і композитів системи "металоподібне тугоплавке з'єднання - металева зв'язка" [19]. Причому процес формування покриття розглядався лише в рамках вивчення кінетики масопереносу [33] з урахуванням утворення твердих розчинів у системі "металева зв'язка - підкладка", що сприяють збільшенню суцільного покриття. При ЕІЛ традиційними електродними матеріалами на опрацьованій поверхні формується композиційний матеріал на основі металів підкладки і зв'язки, армованих тугоплавких сполук.

В останні роки з'явився ряд публікацій [34, 35], присвячених формуванню електроіскрових керамічних покриттів на сталях і титанових сплавах, отриманих

з використанням перспективних електродних матеріалів нового покоління на основі нітриду алюмінію систем AlN-TiB_2 , AlN-ZrB_2 , що відрізняються наявністю діелектричного компонента як основної фази (AlN) і відсутністю металевого зв'язування. Використання цих матеріалів призводить до формування градієнтної (по металу підкладки) структури керамічного покриття з підвищеним рівнем триботехнічних характеристик (Рис. 1.5). В роботі [39] на основі узагальнення результатів вивчення мікроструктури, складу і розподілу елементів на поверхні структурних складових покриття, що утворюється при ЕІЛ керамічними електродами безметалевого зв'язування, запропонована наступна модель формування такого покриття на тугоплавких металах - сталях, нікель-хромових і титанових сплавах.

Scala: O – 50, Al – 3000, Ti – 750

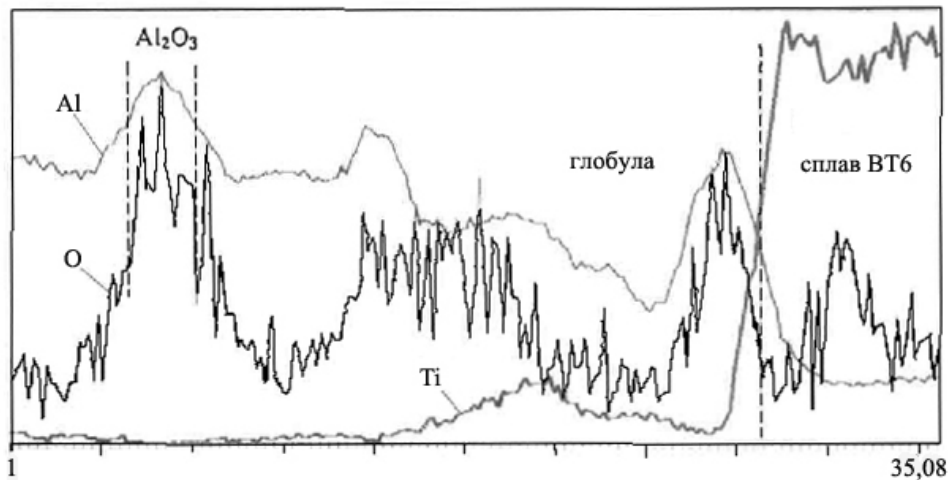


Рисунок 1.5. Розподіл елементів в поперечному перерізі глобули при ЕІЛ сплаву ВТ6 матеріалом системи $\text{AlN-ZrB}_2\text{-ZrSi}_2$

Структура легованого шару формується в процесі кристалізації металевого сплаву підкладки в ванні розплаву, що утворилося при впливі іскрового розряду. Ділянки покриття у вигляді острівців (глобул), що представляють спечений шар з елементів електроерозії електрода, армують поверхню металевого сплаву підкладки, модифіковану включеннями легуючих компонентів. Участь рідкої фази призводить до того, що острівці мають форму, близьку до сферичної (глобули). Al присутній в основному в глобулах, тоді як Ti - переважно в міжглобульному просторі. Міжглобульна поверхня являє собою металевий сплав підкладки, модифікований оксидом/оксинитрида алюмінію і диборидом титану/цирконію. При цьому у всіх випадках частки в міжглобульному просторі більш дисперсна в порівнянні зі спеченим шаром глобули, що пов'язано з високими швидкостями нагрівання-охолодження фаз, що кристалізуються з розплаву. Відмінність фазового складу керамічної глобули від міжглобульного простору проявляється в різній величині мікротвердості структурних складових поверхні [39].

Найбільш активну фізико-хімічну взаємодію продуктів електроерозії електрода з матеріалом підкладки має місце в мікророзплаву на оброблюваній поверхні. Продукти електроерозії легуючого електрода - AlN і Ti

(Zr) B2 - по-різному взаємодіють з поверхнею розплаву в залежності від їх змочуваності металевим сплавом підкладки. Боридна складова, адгезійно-активна взаємодіє з матеріалом підкладки (Fe, Ni, Ti), захоплюється конвективними потоками розплаву, не встигаючи повністю окислюватися, утворюючи міжглобульний простір. Нітрид алюмінію, практично не змочується матеріалом підкладки, слабо втягується в конвективні потоки розплаву, проходячи стадію часткового окислення і беручи участь переважно в формуванні керамічного шару глобули. Массоперенос металу підкладки в глобулу створює градієнтну (по металу основи) структуру глобули, в якій зовнішній шар, який не містить металевої складової, або армований включеннями металевого сплаву подошки, забезпечує високий рівень фізико-механічних характеристик, властивих кераміці, а внутрішній, що прилягає до основи, містить метал підкладки, забезпечуючи адгезійний зв'язок і демпфирні властивості (рис. 1.6). Підтвердженням цього є розподіл елементів в поперечному перерізі глобули, що утворюється при ЕІЛ сплаву ВТ6 матеріалом $\text{AlN-ZrB}_2\text{-ZrSi}_2$ (Рис. 1.5) [39]. Титан розподілений у внутрішньому шарі глобули поблизу кордону розділу "кулька-підкладка", зовнішня частина глобули представляє кераміку на основі оксиду Al_2O_3 і, ймовірно, тверді розчини боросиліцида цирконію. Розподіл металу основи по товщині глобули може регулюватися параметрами обробки - енергією в імпульсі і частотою імпульсів струму [40].

З точки зору запропонованої моделі, в разі ЕІЛ металів традиційними електродними матеріалами системи "тугоплавке з'єднання-металева зв'язка", наприклад, Ti (Zr) B2-Fe (Ni) Cr, керамічні глобули практично не утворюються через високе змочування всіх компонентів системи металами підкладки та зв'язків. У цьому випадку має місце модифікування поверхні металевого сплаву підкладки тугоплавною фазою (MeB_2) з утворенням композиційного матеріалу на основі металів підкладки та зв'язки.

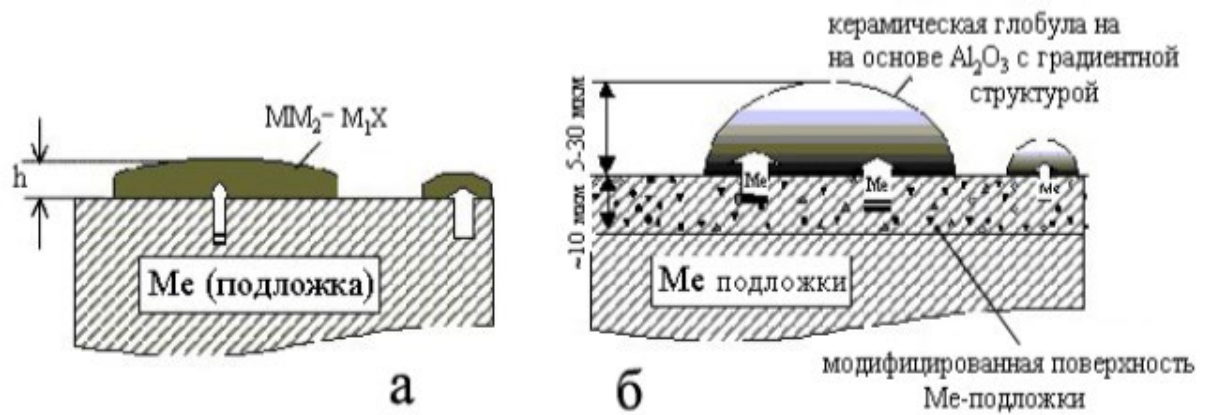


Рисунок 1.6. Схема структури легованного шару: а - традиційний підхід (М, М2 - металеві основи і зв'язки; М1 - перехідний метал, Х - С, В, N), б - запропонована модель

Представлена модель, справедлива для ЕІЛ тугоплавких металів (залізо-вуглецеві, нікель-хромові і титанові сплави), враховує фізико-хімічну природу змочування і адгезійного взаємодії компонентів легирующего електрода з матеріалом підкладки і є подальшим кроком в розумінні механізму формування ЕІЛ-покриттів. Однак стосовно до алюмінієвих сплавів вона вимагає подальшого розвитку в зв'язку з низькою температурою плавлення алюмінію, яка зумовлює підвищену електроерозія. Відомості про ЕІЛ алюмінієвих сплавів композиційної керамікою на основі нітриду алюмінію відсутні.

Висновки:

В даний час в якості матеріалу легуючого електрода використовують перехідні метали, їх сплави і композити системи "металоподібне тугоплавке з'єднання - металева зв'язка". Однак при ЕІЛ традиційними матеріалами спостерігається значна електроерозія алюмінію і його сплавів, що супроводжується втратою маси деталі в процесі обробки. Тому розробка нових високоефективних електродних матеріалів, що забезпечують формування зносостійких ЕІЛ-покриттів на алюмінієвих сплавах без руйнування деталі, залишається невирішеною і актуальним завданням матеріалознавства.

Відомості про структуру, склад, кінетики масопереносу, триботехнічні параметрах покриттів на алюмінієвих сплавах, що формуються при ЕІЛ

компактними електродами з композиційної кераміки, відсутні. Це вимагає проведення досліджень в зазначеному напрямку і встановлення впливу на характеристики покриттів режимів тертя, складу легуючого електрода і матеріалу підкладки для прогнозування трибологічної поведінки покриттів.

Модель формування покриттів на тугоплавких металевих сплавах при ЕІЛ композиційної керамікою потребує подальшого розвитку стосовно металів алюмінію з урахуванням їх низької електроерозійної стійкості.

Постановка завдання дослідження

В літературі наводяться результати великих досліджень структури, властивостей і кінетики формування ЕІЛ-покриттів на залізовуглецевих і титанових сплавах, представлених в роботах Лазаренко Б.Р., Верхотурова А.Д., Подчерняева І.А., Єгорова Ф.Ф., Гітлевіча А.А., Паустовського А.В. та ін. Було встановлено, що ЕІЛ алюмінію і його сплавів традиційними електродними матеріалами супроводжується втратою маси катода (оброблюваної деталі) перевищує масоперенос продуктів електроерозії електрода (анода), що призводить до руйнування деталі в процесі ЕІЛ. При цьому найбільш перспективними матеріалами зносостійкого покриття на сплавах алюмінію не є алюмініди та інтерметаліди, що володіють низькою твердістю, а композити за участю металоподобних тугоплавких фаз впровадження.

Позитивний досвід ЕІЛ алюмінієвих сплавів порошковими сумішами [53-56] показав, що досягається при цьому перерозподіл енергії іскрового розряду за рахунок часткової втрати енергії в міжелектродному проміжку (МЕП) забезпечує приріст маси катода. Нітрид алюмінію в умовах високотемпературного окислення в процесі ЕІЛ буде частково окислюватися з утворенням в МЕП другого діелектричного компонента - Al_2O_3 . Суміш часток і парів AlN , Al_2O_3 , утворюючи екранує хмара над поверхнею алюмінієвого катода, може пригнічувати його електроерозію. Враховуючи, що легуючий електрод повинен бути електропровідним, в якості матеріалу електрода були запропоновані композити на основі нітриду алюмінію систем $AlN-Ti$ (Zr) B_2 з добавкою Ti (Zr) Si_2 , що включають електропровідну боридну і силіцидну фазу. Модифікування поверхні такими композитами, що поєднують корозійну стійкість нітриду

алюмінію з твердістю і зносостійкість боридної складової, має забезпечити високий рівень триботехнічних властивостей алюмінієвих сплавів.

У виборі зазначених матеріалів для нанесення зносостійких покриттів важливу роль відіграє також та обставина, що вони можуть бути віднесені до класу самозмащувальних матеріалів і покриттів, призначених для роботи в умовах сухого тертя ковзання. У високотемпературних процесах ЕІЛ алюмінієвих сплавів зазначеними матеріалами можливе утворення безпосередньо в обсязі покриття (в присутності кисню робочого середовища) і на його поверхні в умовах трибоокислення обмежених твердих розчинів системи $\text{ZrO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, оксидних фаз TiO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , La_2O_3 і відповідних з'єднань β -тіаліта, МУЛЛИТО і ін., які можуть грати роль твердого змащення.

Таким чином, в роботі ставиться завдання створення зносостійких покриттів на алюмінієвих сплавах без втрати маси катода в процесі обробки за рахунок використання в якості електродних матеріалів композиційної кераміки на основі AlN-Ti (Zr) B_2 та $\text{LaB}_6\text{-ZrB}_2$ з метою зміцнення пар тертя ковзання зі сплавів алюмінію.

2 МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1 Методи отримання і характеристика електродних матеріалів

В якості легуючих електродів використовували композиційну кераміку систем $\text{AlN-TiB}_2\text{-TiSi}_2$ (ТБСАН), $\text{AlN-ZrB}_2\text{-ZrSi}_2$ (ЦБСАН) з різним співвідношенням компонентів (ЦЛАБ-1, ЦЛАБ-2). Компактні керамічні зразки електродів отримували методом гарячого пресування під тиском 35 МПа у вигляді штабиків розміром $3 \times 4 \times 35$ мм. Склад електродів і режими їх отримання наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Фазовий склад і режими одержання електродних матеріалів, використовуваних для нанесення ЕІЛ-покриттів

Склад матеріалів, вага. %	Фазовий склад за даними РФА	Температура гарячого пресування, °С	Час спікання, хв
$50\text{AlN}+45\text{TiB}_2+5\text{TiSi}_2$ (ТБСАН)	$\text{AlN}, \text{TiB}_2, \text{TiSi}_2$	1780...1820	25...35
$50\text{AlN}+45\text{ZrB}_2+5\text{ZrSi}_2$ (ЦБСАН)	$\text{AlN}, \text{ZrB}_2, \text{ZrSi}_2$	1820...1860	25...45

Вихідні компоненти (табл. 2.2) змішували в середовищі ацетону в планетарному млині протягом 6 ... 8 годин з метою гомогенізації і подрібнення суміші. Суміші подрібнювали в барабанах, футерованих нітридом алюмінію, з використанням в якості тіл, що мелють сталевих куль; зміст примісного заліза (за рахунок подрібнення) не перевищувало 5. Отримані електроди із залишковою пористістю не більше 3 ... 5% піддавали потім механічній обробці. Фізико-механічні властивості електродних матеріалів (міцність на вигин $\sigma_{\text{вг}}$, тріщиностійкість K_{Ic} , твердість HV) представлені в табл. 2.3.

Для нанесення плазмових покриттів, отриманих після розмелювання, композиційний порошок гранулювали з подальшою розмірною класифікацією.

Таблиця 2.2 – Характеристики вихідних порошків

Склад компонентів, ваг. %	
AlN-Atochem A4 N-33,8 O-1 C<0,2 Fe _{ppm} <50 Si _{ppm} <70 Ca _{ppm} <50 Середній розмір частинок 1,5мкм	ZrB₂ B-19,0 Zr-остача TiSi₂ Ti-45,2 Si-53,8 C-1,0 ZrSi₂ Si-36,9 C-1,2 Zr- остача
AlN-техн. N-32,5 O-1,2 C-0,1 Середній розмір частинок 2...5 мкм	

Таблиця 2.3 – Фізико-механічні властивості електродних матеріалів

матеріал електрода	$\sigma_{ізг}$, МПа	K_{1C} , МПа*м ^{1/2}	HV, ГПа
ТБСАН	560 ± 10	4,8	23,5
ЦБСАН	600 ± 12	4,8	25,5*
ЦЛАБ-1	200 ± 12	—	15,04
ЦЛАБ-2	620 ± 10	4,5	27...28

*) Мікротвердість Н

2.2 Устаткування і методи нанесення покриттів

Електроіскрове легування здійснювали на повітрі на установках Елітрон-21 і Елітрон-24А в режимах, відповідно: струм короткого замикання $I=1A$, енергія імпульсу $E = 0,08$ Дж, частота імпульсів струму $f=1200$ Гц і $E=1,1$ Дж, $f=110$ Гц. Питомий час обробки становив 1 ... 8 хв / см².



Рисинок. 2.1 Елітрон-21

Для наведених режимів, відповідно до класифікації видів ЕІЛ (розділ 1.3.1), параметр $R_1 = I_{к.з.}/E < 100 \text{ А/Дж}$, що передбачає домінування твердої фази в продуктах електроерозії електрода ("термомеханічне" ЕІЛ).

Плазмове нанесення порошків здійснювали на установці УПУ-8М на заводі 410ГА в режимі: відстань між плазмометром і деталлю 100...120 мм, витрата плазмоутворюючих газів (аргон + азот) від 30 до 50 л / хв, струм 400...440 А, напруга дуги 48...54 В, гранулометричний склад порошку 80...120 мкм.

Порошок для плазмового напилення отримували наступним способом: шихту завантажували в залізні барабани з металевими кульками в відповідному співвідношенні. Розмелювання здійснювали в планетарному млині в середовищі ацетону протягом 8 годин. Потім шихту висушували в термостаті при температурі 70 ... 80 оС і протирали через сито. Середня дисперсність частинок шихти ~ 1 ... 3 мкм. З отриманих порошків пресувалися зразки, які спікалися в печі СШВЛ або на гарячому пресі при температурі ~ 1350°С протягом 1 ... 2 годин, а потім розмелювали і просівали для отримання порошків з розміром частинок 80 ... 120 мкм.

Як матеріал підкладки використовували алюмінієві сплави АЛ9 (0,2 ... 0,4 Mg; 6,0 ... 8,0 Si; 0,3 ... 0,6 Fe, 0,5 Mn; 0,2 Cu; 0,3 Zr ; решта алюміній), АЛ25 (11 ... 13 Si; 1,5 ... 3,0 Cu; 0,8 ... 1,3 Mg; 0,8 ... 1,3 Ni; 0,3 ... 0,6 Mn; 0,05 ... 0,2 Ti, решта алюміній) і Д16Т (3,8 ... 4,5 Cu; 0,3 ... 0,9 Mn; 1,2 ... 1,8 Mg; <0,5 Si; <0,5 Fe, решта алюміній).

2.3 Методи дослідження кінетики масопереносу, складу, структури і фізико-хімічних властивостей поверхні

У зв'язку з неаддитивністю процесів ерозії і формування легованого шару зміна маси анода (ерозію) і приріст катода визначали на різних етапах ЕІЛ. Кінетику масоперенесення вивчали гравіметричним методом з точністю 10^{-4} г, вимірюючи питомий (Δk) і сумарний ($\sum \Delta k$) приріст катода і питому (Δa) і сумарну ерозію ($\sum \Delta a$) анода через кожну хвилину обробки 1 cm^2 поверхні як середнє арифметичне величини шести вимірювань з подальшою статистичною обробкою результатів за методом Стюдента. Коефіцієнт масопереносу (К)

оцінювали як відношення
$$K = \frac{\sum \Delta k}{\sum \Delta a}$$
, де t - час обробки [41].

Склад і структуру робочих поверхонь досліджували методами металографічного, рентгенофазового (РФА), мікрорентгеноспектрального (МРСА) аналізів з використанням приладів: ПМТ-3, ДРОН-3М (в CuK_α -випромінюванні), оптичний мікроскоп Zeiss "Axioplan", поєднаний з дигітальним фотоапаратом Minolta Dimage 7 (з дозволом $5,2 \cdot 10^6$ пікселя), дефрактометр Theta-2Theta Diffractometer (D5000) в Cu-K_α випромінюванні, скануючий електронний мікроскоп фірми JEOL-840A, поєднаний з рентгеноспектральним аналізатором EDX фірми Tracor. Хімічний склад структурних складових покриттів визначали методом МРСА на мікроаналізаторах фірми "Camebax SX-50". На поверхню зразків з покриттям в

деяких випадках наносили шар Ni (електрохімічним осадженням), щоб уникнути пошкодження покриття під час виготовлення шліфа.

Підготовку зразків для металографічних досліджень проводили звичайними способами, застосовуваними в металографії [42]. З огляду на гетерофазне покриття і малих розмірів полів окремих фаз, вимір мікротвердості проводили двома способами. У тому випадку, якщо фази чітко відрізняються за своєю відбивною здатністю (кольором), то вимірювання проводили в диференційованих за такою ознакою областях, розташованих в різних місцях покриття (в сумі не менше 5 вимірів, при можливості до 20 по кожній фазі). Якщо розрізнити фази візуально важко, то робили 30...50 замірів рівномірно по полю покриття з обробкою результатів методами математичної статистики.

Електрохімічну поведінку легованих зразків досліджували при температурі 22 °C в 3% -розчину NaCl в порівнянні з вихідними зразками. Анодні поляризаційні криві отримані потенціодинамічним методом при використанні потенціостата П-5848 зі швидкістю розгортки 0,5 мВ/с.

Стійкість зразків до високотемпературного окислення досліджували на повітрі (до 1500 °C) як в неізотермічних умовах при швидкості нагріву зразків 15°/хв (методами ДТА і ТГ), так і в ізотермічному режимі (методом термогравіметрії) на приладі "Seteram".

Вивчення адгезії металевих сплавів до тугоплавких з'єднань проводили за відомим методом "лежачої" краплі з подальшим аналізом фазового складу зони взаємодії. Контактний кут змочування визначали в вакуумі 1,33...3,3 Па на установці і за методикою, описаною в роботі [43]. Установка являє горизонтальну піч опору в сукупності з водоохолодженої вакуумною камерою з вікнами для фіксування контактних кутів (θ).

2.4 Методи вивчення триботехнічних і мікромеханічних властивостей

Триботехнічні характеристики (коефіцієнт тертя f і інтенсивність зношування L) вивчали в режимі торцевого тертя без змащення при коефіцієнті взаємного перекриття, близькому до 1, за схемами:

- 1) вал-вкладиш в контакті зі сталлю 65Г (HRC 58 ... 62) на установці МТ-68 ІПМ НАНУ - для легуючих електродів;
- 2) "кільце-кільце" в контакті зі сталлю ШХ15 (HRC 62 ... 64) на установці М-22ПВ Національного Авіаційного Університету - для електродів і ЕІЛ-покриттів;
- 3) "палець-площина" в контакті зі сталлю ШХ15 на установці УМТ-2М заводу 410ГА - для плазмових покриттів в широкому діапазоні швидкостей ковзання (V) і навантажень (P).

Перед проведенням випробувань за схемою вал-вкладиш зразки попередньо обробляли на машині тертя алмазним кругом, що має той же діаметр, що і використовується в подальшому контртіло. Після цього на зразок наносилось покриття, а попередня підготовка зразків забезпечувала вже в початковий момент випробувань практично повний контакт з сполученою деталлю. В процесі експерименту фіксувалася сила тертя, за якою визначався коефіцієнт тертя і інтенсивність зношування.

Міцність на вигин електродів оцінювали методом 4-х точкового вигину, при якому передбачаються зразки розміром $3 \times 4 \times 45$ мм, що обертаються ролики опор з відстанями $a=10$, $L=40$, швидкість деформування 0,5 мм/хв [44]. Коефіцієнт тріщиностійкості K_{1c} визначали методом індентування [45].

Мікромеханічні характеристики зміцненого шару досліджували методом мікротвердості (кінетичної мікротвердості) і оцінювали за показником пластичності - відновленої мікротвердості H_u , описаним в роботі [46]. Модуль Юнга оцінювали методом кінетичної мікротвердості [46], так як більш коректний вимір динамічним резонансним методом вимагає використання зразків (матеріалу покриття) циліндричної форми великих розмірів, що представляє значні експериментальні труднощі. Коефіцієнт Пуассона (μ) при

обчисленні модуля пружності (E) знаходили за літературними даними. При цьому, як показують наші розрахунки, зміна μ на 0,1 призводить до зміни величини E всього на 5,2%.

3 СТРУКТУРА, СКЛАД І ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ, ЛЕГУЮЧІ ЕЛЕКТРОДІВ

3.1 Фізико-механічні властивості електродних матеріалів на основі $\text{AlN-Ti (Zr) B}_2\text{-Ti (Zr) Si}_2$

Міцність композиційних матеріалів системи $\text{AlN-MeB}_2\text{-MeSi}_2$ значно вище, ніж індивідуальних фаз [47]. Це пов'язано з існуванням гетерофазної зернистої структури, стабілізованою за рахунок введення добавок боридів і силіцидів. При цьому між зернами фаз існує когерентний зв'язок. Борид і силіцид, розташовуючись між зернами нітриду алюмінію, перешкоджають росту зерен і, мабуть, також релаксують внутрішні напруги, що виникають при відповідних навантаженнях. Так, міцність на вигин матеріалу ТБСАН становить ~ 560 МПа, тріщиностійкість $K_{IC}=44,8$ МПа $\cdot\text{м}^{1/2}$, твердість $\text{HV}=23,5$ ГПа; останнє зменшується до $19,3\ldots 19,6$ ГПа при навантаженні 500 Н. При цьому вже спостерігається утворення радіальних тріщин. Отже, композиційні матеріали ТБСАН мають досить високі значення твердості HV, які практично зберігаються при високих навантаженнях. Це свідчить про деяку частину пластичного руйнування, яке може виникати в гетерофазних матеріалах за рахунок присутності фаз, що знаходяться в різному напруженому стані (одна фаза - в стані стиснення, інша - в стані розтягування).

Матеріал ТБСАН також має високий рівень антифрикційних властивостей, який підвищується з ростом швидкості ковзання і навантаження (табл. 3.1).

Матеріали електродів ТБСАН і ЦБСАН мають високий рівень механічних властивостей (табл. 2.3) і триботехнічних характеристик (Рис. 3.1).

Таблиця 3.1 - Триботехнічні властивості композиційного матеріалу системи $\text{AlN-TiB}_2\text{-TiSi}_2$

V, м/с	P, МПа	f	I, мкм/км
5	2	0,48	5
10	2	0,40	7
15	2	0,32	8
5	8	0,35	4
10	8	0,34	6
15	8	0,29	7
5	12,5	0,26	11
10	12,5	0,24	16
15	12,5	0,22	22

Отримані низькі значення тертя і інтенсивності зношування, а також зменшення цих величин з ростом швидкості ковзання можуть бути обумовлені утворенням в процесі трибоокислення матеріалів екранізуючих вторинних плівок, що містять елементи окислення основних фаз: Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , SiO_2 і відповідні високотемпературні з'єднання ® -тіаліта, мулітів і боратів алюмінію. Ці плівки адгезійно міцно пов'язані з матеріалом електрода і практично не взаємодіють зі сталевим контртілом, що утримує їх в зоні трибоконтакта, створюючи екранний ефект.

Спостережуване в усіх випадках зниження коефіцієнта тертя (f) і швидкості зношування (I) зі збільшенням вантажо-швидкісних параметрів (P , V) свідчить про формування вторинних структур в процесі трибоокислення, в складі яких можлива присутність оксидних фаз, що екранізують робочу поверхню від фізико-хімічної взаємодії з контртілом і сприяють підвищенню рівня триботехнічних характеристик матеріалів електродів.

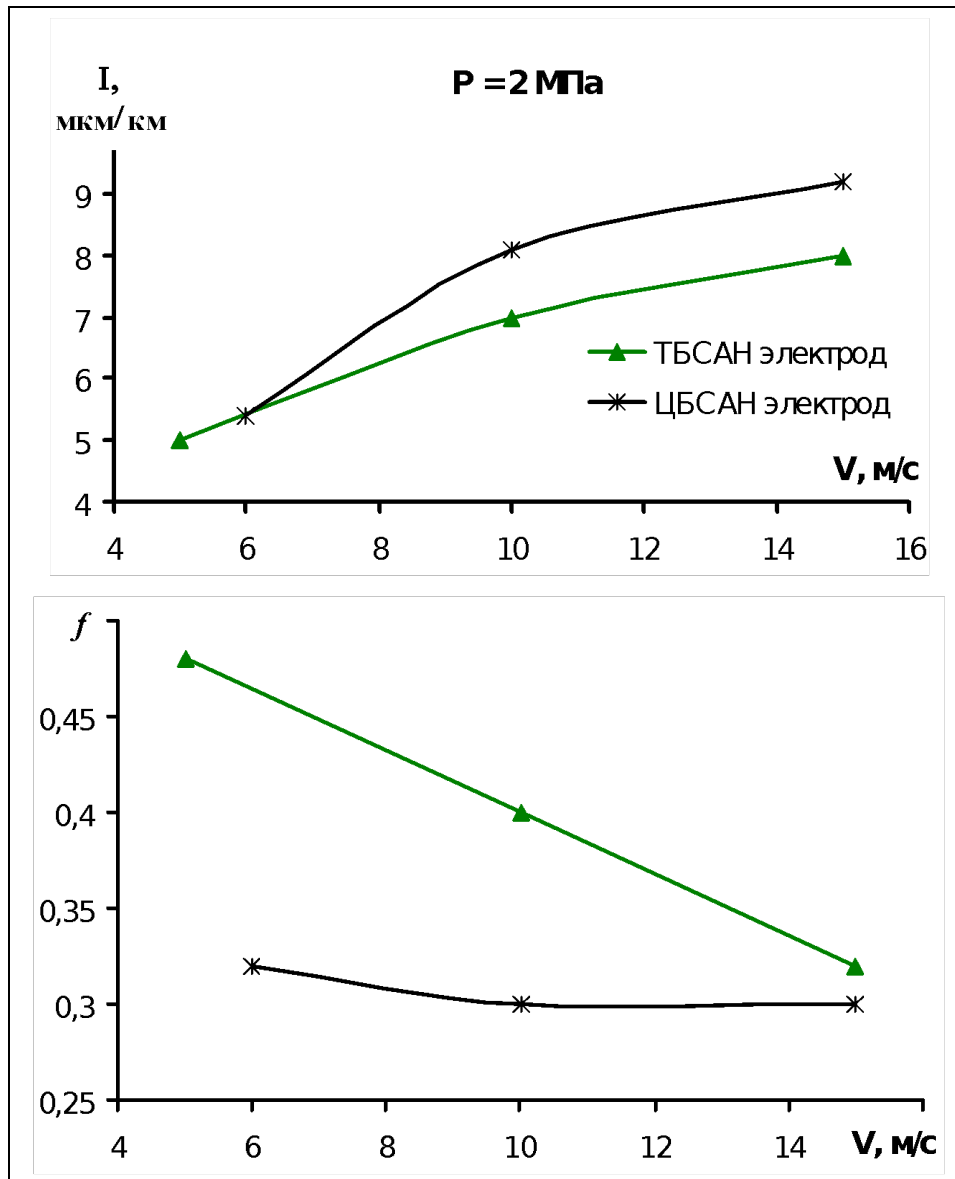


Рисунок 3.1. Триботехнічні характеристики електродних матеріалів ТБСАН і ЦБСАН

3.2 Мікроструктура поверхні

Легуючий електрод ТБСАН характеризується дрібнодисперсною структурою з розміром зерна 1/3 мкм (рис. 3.2, а) і рівномірним розподілом основних фазових складових AlN і TiB₂ (рис. 3.2, б-д).

Характер концентраційних залежностей Si і Ti (рис. 3.4, б, в) вказує на існування кремнію в основному в складі твердих розчинів TiB₂-TiSi₂.

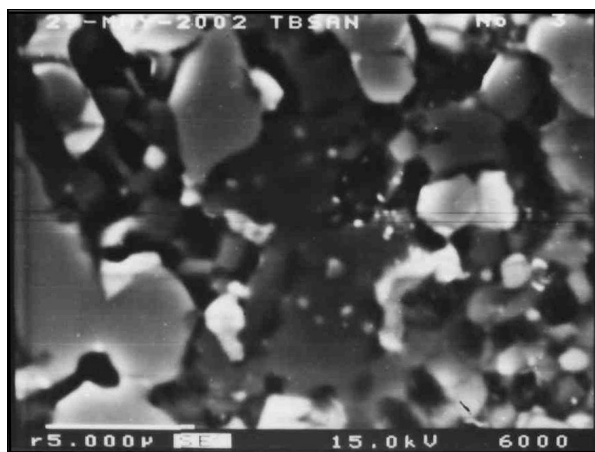
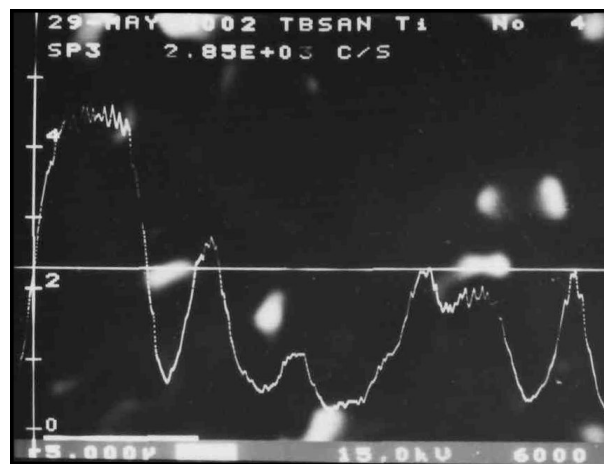
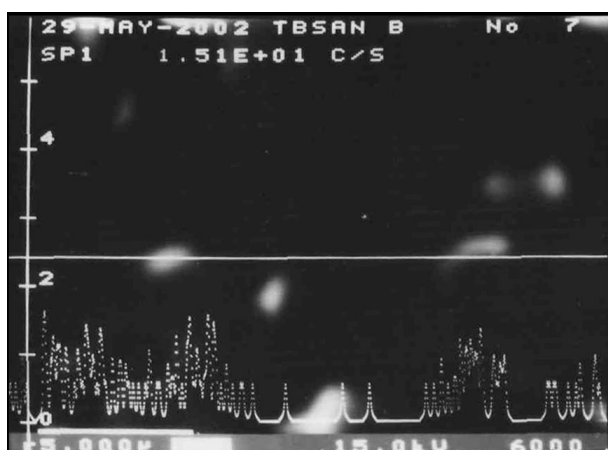
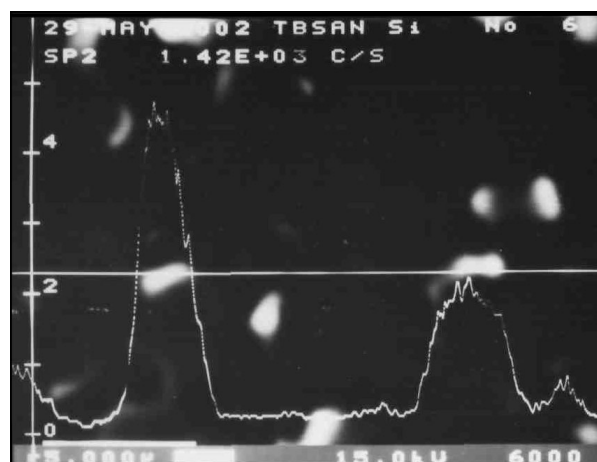
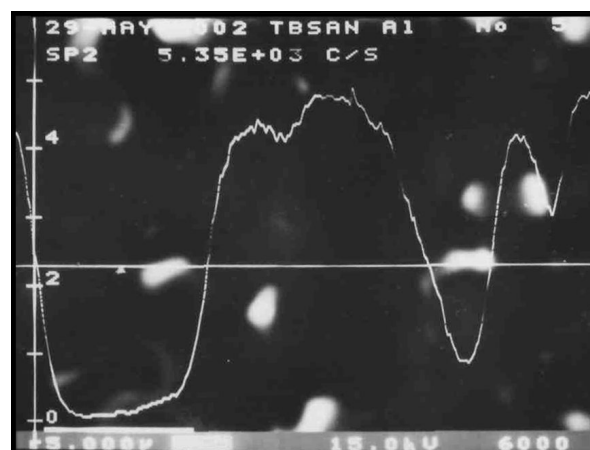
**а****б****в****г****д**

Рисунок. 3.2. Мікроструктура (а) і розподіл Ti (б), Si (в), Al (г), B (д) на поверхні електрода ТБСАН на основі системи $\text{AlN-TiB}_2\text{-TiSi}_2$

Фазовий склад ЕІЛ-покриття практично завжди відрізняється від фазового складу матеріалу легуючого електрода. Така відмінність характерна для процесу

ЕІЛ і пов'язане з фазовими перетвореннями і взаємодією компонентів в умовах високотемпературного окислення продуктів електроерозії електрода як при проходженні через міжелектродний проміжок, так і на оброблюваній поверхні. Детально це питання буде розглянуто в розділі V.

3.3 Корозійна стійкість

Матеріали системи AlN-TiB₂-TiSi₂

Відомості про високотемпературне окислення композиційної кераміки на основі AlN-TiB₂ в літературі обмежені. В роботі [48] вивчено окислення еквімолярного композиту AlN-TiB₂ в температурному інтервалі від 700 ° до 1300°C в потоці кисню. Показано, що вказаний матеріал володіє досить високою стійкістю до окислення при температурах нижче 1100°C, проте інтенсивне окислення з утворенням порівняно товстих оксидних шарів обмежує його застосування при більш високих температурах. Що стосується високотемпературного окислення твердого розчину (TiB₂-TiSi₂), то відома лише одна робота [49], що повідомляє про склад продуктів окалиноутворень у внутрішньому і зовнішньому шарі окалини в інтервалі температур 1000-1200°C.

Вивчення кінетики високотемпературного окислення на повітрі (до 1500°C) керамічних матеріалів системи AlN-TiB₂-TiSi₂ як в неізотермічних умовах при швидкості нагріву зразків 15°/хв, так і в ізотермічному режимі показало [47], що при окисленні зразків кераміки ТБСАН з 50% вмістом (TiB₂-TiSi₂) оксидна плівка формується при 1200°C. Вона характеризується дрібнозернистою структурою з максимальною величиною зерен ≤2 мкм і містить оксинітриду алюмінію Al₁₀N₈O₂, оксиди TiO₂ (рутил), ® -SiO₂, борат алюмінію AlBO₃ і невелика кількість Fe₂O₃ (залізо дифундує до поверхні). Залізо у вигляді домішки (<2%) з'являється в складі матеріалу в результаті подрібнення порошкової суміші в планетарному млині з використанням сталевих куль.

При 1400°C в окалині на кераміці ТБСАН містяться: Al₂O₃ з розміром зерен <3 мкм, ®-тіаліт (Al₂TiO₅) із середнім розміром зерен <1,5 мкм і вищий муллит (Al₆Si₂O₁₃). Також ймовірно існування твердих розчинів Al₂O₃ і Fe₂O₃ в ®-тіаліті і муллі. Склад окалини (розподіл в ній елементів - за даними мікрорентген-

спектрального аналізу), представлений на рис. 3.9, підтверджує утворення в окисленому шарі зазначених фаз.

Як свідчать DTA- і TG-криві неізотермічного окислення, а також ізотерми приросту маси зразків від часу, компактні матеріали системи $\text{AlN-TiB}_2\text{-TiSi}_2$ є виключно корозійностійкими до температур 1400-1450°C [123]. Про стійкість до високотемпературної корозії зразків ТБСАН можна судити за величиною приросту маси на одиницю площі поверхні при нагріванні зразків на повітрі при 1350°C протягом 210 хв, яка становить 6,0 мг/см₂.

Отримані результати високотемпературного окислення електродних матеріалів системи $\text{AlN-TiB}_2\text{-TiSi}_2$ вказують на можливість утворення в процесі трибоокислення у вторинних структурах як електродів, так і поверхонь з них високотемпературних сполук на основі TiO_2 -тиаліта, оксидних фаз цирконію, кремнію та інших, які можуть грати роль твердого змащення, міцно пов'язаної з поверхнею електрода (покриття).

4 СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА СКЛАД ЕІЛ-ПОКРИТТІВ НА АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ

4.1 Кінетика масопереносу при ЕІЛ алюмінієвих сплавів композиційної кераміки на основі AlN-Ti B2

Однією з основних характеристик формування покриття при ЕІЛ є масоперенос продуктів електроерозії матеріалу анода на катод, що характеризується коефіцієнтом масопереносу і визначає товщину легованого шару, його суцільність і продуктивність процесу. Коефіцієнт масопереносу залежить від ряду факторів [50]:

- 1) величина електроерозії електрода (анода);
- 2) зворотний масоперенос матеріалу катода на анод, який призводить до формування вторинної структури на робочій поверхні анода;
- 3) гранулометричний склад продуктів електроерозії з урахуванням поганого зчеплення великих частинок тугоплавкої фази осколкової форми з поверхнею катода;
- 4) змочування і адгезионне взаємодія продуктів електроерозії з матеріалом підкладки, що визначають міцність їх зв'язку з підкладкою;
- 5) фазовий склад продуктів електроерозії, який може суттєво відрізнятися від складу вихідного електрода за рахунок процесів дисоціації, високотемпературного окислення і взаємодії компонентів в плазмовому струмені іскрового розряду.

Відомості про вплив на масоперенос адгезійного взаємодії продуктів електроерозії з підкладкою і їх фазового складу в літературі відсутні. Крім того, не освітлюється взаємозв'язок всіх зазначених факторів і її вплив на кінетику масоперенесення.

Відомо, що при ЕІЛ на робочій поверхні легирующего електрода формується вторинна структура зміненого складу за рахунок ущільнення поверхневого шару і зворотного масопереносу матеріалу катода на анод. Тому величина

електроерозії вторинної структури, як істинного об'єкта ерозії, повинна залежати, при інших рівних умовах, від матеріалу підкладки. Крім того, було необхідно встановити вплив адгезійного взаємодії компонентів в системі електрод-підкладка на кінетику масоперенесення при ЕІЛ алюмінієвого сплаву. Питання впливу змочування і матеріалу підкладки на коефіцієнт електромасопереноса при ЕІЛ в літературі не висвітлюються.

У постановці завдання дослідження була сформульована ідея про те, що для забезпечення позитивного приросту катода при ЕІЛ алюмінію і його сплавів необхідно створити в міжелектродному проміжку (МЄП) "хмара" частинок і парів з непровідних фаз продуктів електроерозії електрода, що екранують поверхню катода за рахунок збільшення частки енергії іскрового розряду в МЄП. Цій умові задовольняє композиційна кераміка на основі діелектричної компоненти AlN (50 мас.%) Систем AlN-Ti B₂-Ti Si₂. Основними непровідними фазами в продуктах електроерозії електрода є AlN Al₂O₃ і утворюється в результаті його високотемпературного окислення в МЄП Al₂O₃, у другому - оксид B₂O₃, що утворюється в МЄП.

Вибір цих матеріалів як об'єктів дослідження обумовлений також поєднанням в них високої корозійної стійкості AlN з електропровідністю і високими фізико-механічними властивостями боридних складових, що зумовлює високий рівень експлуатаційних характеристик одержуваних з них покриттів.

Співвідношення основних фазових складових в матеріалі електрода визначається, з одного боку, вимогою оптимальної електропровідності композиту, що забезпечує проходження електричного струму в ланцюзі анод-МЄП-катод, а з іншого - необхідністю забезпечити достатню кількість непровідних фаз в продуктах електроерозії для ефективного екранування поверхні алюмінієвого катода. Попередніми експериментами було встановлено, що при утриманні AlN менше 50 мас.% Кількість які виникають в МЄП непровідних фаз виявляється недостатнім і в процесі ЕІЛ ерозія катода перевищує кількість матеріалу анода, що надходить на катод.

У виборі компонентів матеріалу електрода для ЕІЛ алюмінієвих сплавів значну роль відіграє також прогнозування складу вторинних структур, що

формуються в процесі трибоокислення. Цей прогноз заснований на припущенні, що дисипативні вторинні плівки в зоні трибоконтакта матеріалами / покриття містять ті ж оксидні фази, що і окалина, що утворюється при високотемпературному окисленні. Так, в композитах систем AlN-Ti B₂-Ti Si₂ в процесі високотемпературного окислення утворюються оксид і оксинитрида алюмінію, TiO₂, ZrO₂, SiO₂, відповідні високотемпературні корозійностійкі з'єднання β-тіаліта (Al₂TiO₅), МУЛЛИТО і боратів алюмінію, які адгезійно міцно пов'язані з матеріалом електрода / покриття і можуть грати роль твердого змащення в умовах сухого тертя ковзання.

4.2 Фактори, що впливають на формування легованого шару

Процес ЕІЛ доцільно систематизувати за тимчасовим принципом, згрупувавши фактори, що впливають на формування легованого шару на різних етапах процесу.

На I етапі має місце електроерозія матеріалу анода під дією плазмового струменя іскрового розряду. У гранулометричному складі продуктів електроерозії, як відомо [41], поряд з частинками твердої фази, є рідко-парова складова. Однак для електродних матеріалів з композиційної кераміки, яка характеризується підвищеною крихкістю і високою температурою плавлення компонентів, в продуктах електроерозії повинні переважати частки твердої фази осколкової форми, слабо зчіплюються з поверхнею катода. Слід враховувати також різну температуру еродованих твердих частинок композиційного матеріалу електрода в зв'язку з їх різною провідністю. Діелектричні компоненти не піддаються електронній бомбардуванню і нагріваються на робочій поверхні анода тільки за рахунок контакту з провідними фазами. Тому реакційна здатність "гарячих" електропровідних компонентів повинна бути вище. З цього випливає також, що твердофазная складова електроерозії електрода представлена переважно у вигляді частинок компонентів з різною температурою - "холодної" непровідящей і "гарячої" електропровідної фази.

II етап - проходження продуктів електроерозії через МЕП, що супроводжується їх взаємодією з киснем і азотом повітря в умовах високотемпературного окислення.

Виділяють чотири основних механізми взаємодії напилуються частинок з газами плазмового потоку при газотермічних методах нанесення покриттів: адсорбція газів на поверхні частинок; хімічну взаємодію з утворенням оксидних і нітридних плівок; розчинення газів в рідкій фазі частинок; дифузійні процеси і механічні "заміс" конвективними потоками в об'єм частинок продуктів поверхневого взаємодії. Ці механізми в повній мірі застосовні до взаємодії продуктів електроерозії з плазмою іскрового розряду в умовах ЕІЛ. Відмінною особливістю процесу ЕІЛ є низька швидкість частинок в плазмі іскрового розряду (кілька км / с) в порівнянні з газотермічним нанесенням, що характеризується високими швидкостями плазмових потоків аж до звукових і надзвукових. Цим компенсується малий МЕП (~ декількох мкм), тому тривалість взаємодії продуктів електроерозії з навколишнім середовищем (повітря) в іскровому МЕП не менш, ніж при газотермічних методах розпилення. З цієї причини температура частинок в плазмі іскрового розряду і ефект впливу навколишнього середовища і фазообрання в МЕП на структуру і властивості ЕІЛ-покриттів повинні бути значними.

Компоненти матеріалу легуючого електрода з малими контактними кутами змочування θ матеріалом підкладки захоплюються конвективними потоками мікрочастинок розплаву і модифікують поверхню металевих сплавів. За формування глобул ("горбів") на поверхні відповідальні легируючі компоненти з низькими θ , які слабо залучаються до конвективних потоків розплаву, утворюючи на оброблюваній поверхні напівсферичні глобули спеченого композиційного матеріалу. Массоперенос металу підкладки в глобулу забезпечує градієнтними її структури і адгезійну міцність зв'язку. Очевидно, що чим менше різниця в змочуваності металом підкладки легуючих компонентів, тим ймовірність утворення глобул менше, і відповідно, менше шорсткість поверхні.

Ідея виборчого залучення продуктів електроерозії в мікротік розплаву запропонована в роботі [39] на основі результатів дослідження процесу ЕІЛ тугоплавких матеріалів: сталей, Ti- і Ni-Cr сплавів матеріалами системи Al-Ti - B-N. Було показано, що діелектричні компоненти продуктів електроерозії електрода (AlN, Al₂O₃), не змочувані або мало змочуються залізом і нікелем ($\theta \geq 60^\circ$), переважно входять до складу глобул, тоді як диборид титану з досить низьким контактним кутом змочування ($\leq 40^\circ$) модифікує в основному поверхню металевого сплаву підкладки. Це наочно ілюструється розподілом елементів на поверхні Ni-Cr сплаву після його ЕІЛ матеріалом системи AlN-TiB₂: Al-містять фази (AlN, Al₂O₃) знаходяться переважно в складі глобул, тоді як диборид титану - в основному в межглобульному просторі, модифікуючи Ni-Cr сплав підкладки.

Концепція формування електроіскрових покриттів на тугоплавких металах, розвинена в роботах [39], заснована на селективності змочування продуктів електроерозії матеріалом підкладки, в принципі може бути застосована

Таблиця 4.1 Контактні кути змочування θ тугоплавких сполук металами

з'єднання	Контактні кути змочування θ	
	Fe	Ni-Cr сплав
AlN	не змочується	62
Al ₂ O ₃	~ 90	91
TiB ₂	39	24
ZrB ₂	72	—
TiN _{0,95}	98	—

* кут змочування алюмінієвих сплавом АЛ5

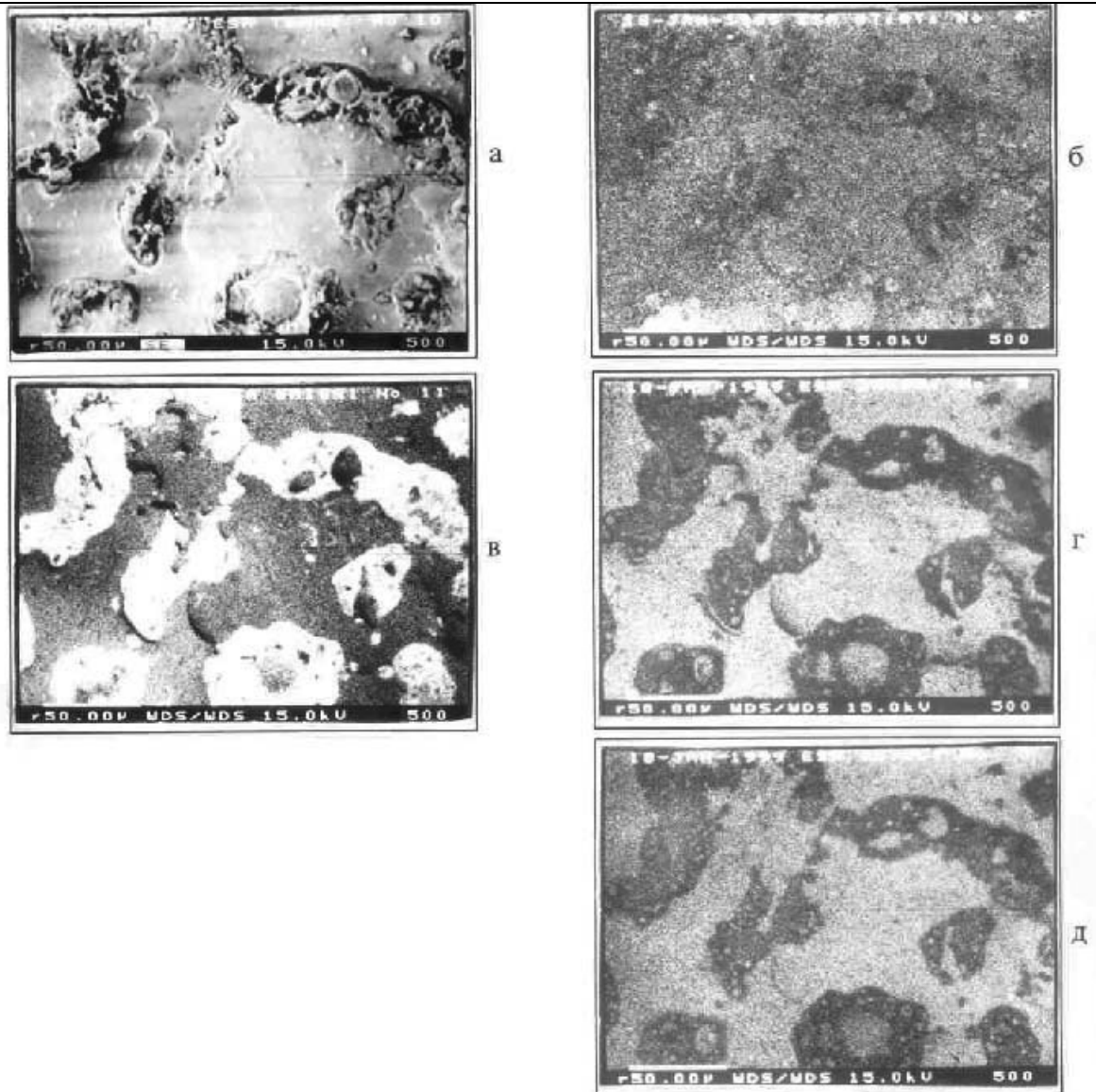


Рисунок 4.1. Мікроструктура ЕІЛ-покриття на нікелевому сплаві у вторинних електронах (а) і в рентгенівському випромінюванні: Ті (б), Al (в), Ni (г), Cr (д)

4.3 Склад і структура покриттів, що формуються при електроіскровому модифікуванні матеріалами на основі нітриду алюмінію

За даними металографічного аналізу, в процесі ЕІЛ алюмінієвого сплаву АЛ9 електродним матеріалом ТБСАН формується шар з зміненими складом і структурою, товщиною ≤ 10 мкм з утворенням на поверхні глобул (у вигляді "горбів") висотою ~ 20 мкм. Глобули займають $\sim 40 \dots 50\%$ робочої площі поверхні, розподілені досить рівномірно і мають діаметр $100 \dots 200$ мкм. У порівнянні з міжглобульним простором кулька характеризується підвищеним

вмістом боридних компоненти (TiB_2) і зниженим вмістом кисню і кремнію (рис.4). Збагачення киснем межглобульного простору вказує на підвищений вміст в ньому алюміній-містять фаз системи Al-O-N-B .

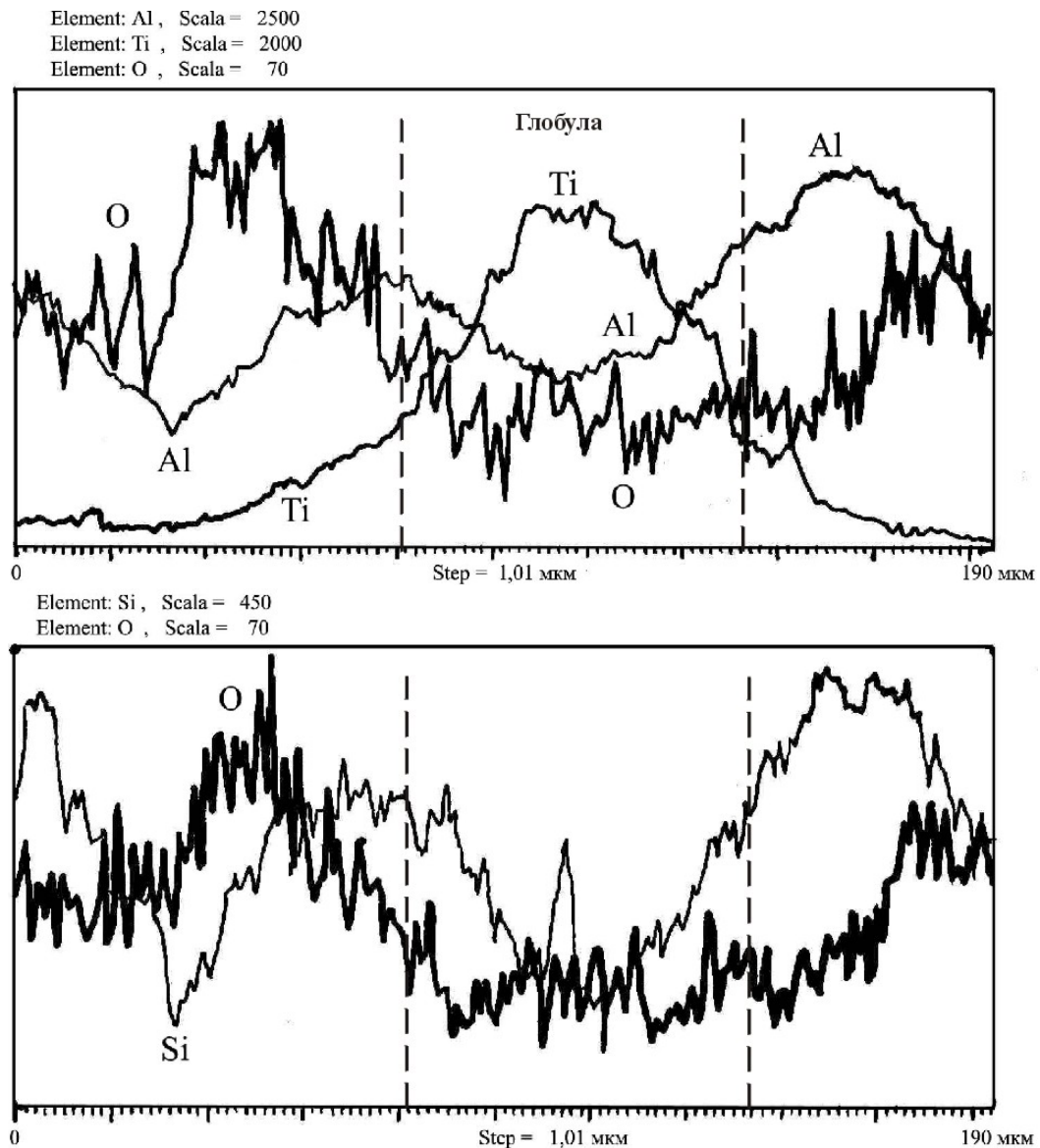
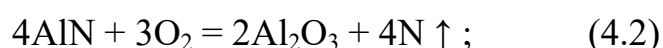
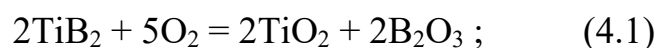


Рисунок 4.2 Розподіл елементів на поверхні глобули в покритті ТБСАН / АЛ9

Покриття має більш високі значення мікротвердості ($H_{\mu} = 3,99 \pm 0,5$ ГПа) і модуля Юнга ($E = 206,43 \pm 20$ ГПа) в порівнянні з основою (для сплаву АЛ9: $H_{\mu} = 1,2$ ГПа, $E = 72,02$ ГПа).

Результати РФА покриття ТБСАН / АЛ9 для різного часу обробки (t), представлені на рис. 5.3, призводять до висновку про відмінність фазового складу покриття від складу матеріалу легуючого електрода, що характерно для методу ЕІЛ, як і для тих методів нанесення покриттів, зокрема, газотермічних, в яких має місце вплив робочого середовища і термомеханічних навантажень. У

разі ЕІЛ це відмінність пов'язана з фазовими перетвореннями і високотемпературним окисленням легуючих компонентів в плазмовому струмені іскрового розряду і на робочій поверхні в нерівноважних умовах процесу. При $t = 2 \text{ хв} / \text{см}^2$ основними компонентами покриття є (в порядку убутання інтенсивності ліній рентгенівського випромінювання): $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, TiB_2 (змінений період решітки) і нижчий борат алюмінію AlBO_3 (рис. 4.3, а). Фаза AlBO_3 утворюється відповідно до реакції окислення, що протікає в МЕП і на поверхні алюмінієвого катода:

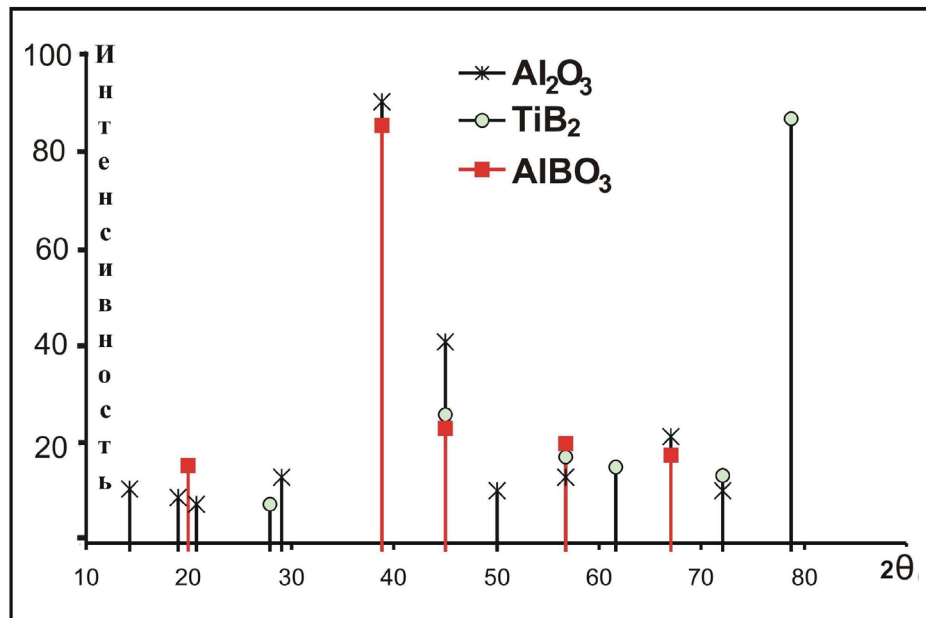


Реакція (4.2) може протікати також за участю алюмінію (підкладки):

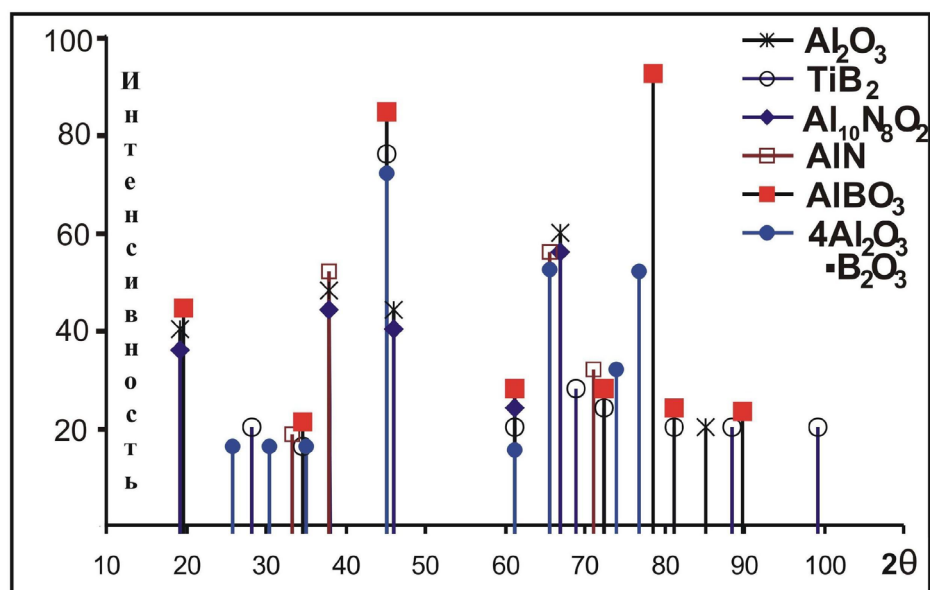
$4\text{Al} + 3\text{O}_2 = 2\text{Al}_2\text{O}_3$. Рентгенографічно нітрид алюмінію не виявляється; мабуть, його кількість в покритті не перевищує 5 ... 7%.

Зі збільшенням часу обробки t до $8 \text{ хв} / \text{см}^2$ в складі покриття з'являються фази нітриду і оксинітрида алюмінію, а також вищий борат алюмінію. Це може бути результатом збільшення кількості перенесеного матеріалу легуючого електрода на катод, що узгоджується зі збільшенням приросту маси катода Δk з ростом t для системи ТБСАН / АЛ9

Необхідно відзначити, що на всіх дифрактограмах ЕІЛ-покриттів присутній лінія відображення алюмінію. Її поява може бути пов'язано як з підкладкою (через дискретності покриттів), оскільки товщина оксидної плівки алюмінію на поверхні алюмінієвого сплаву недостатня для екранування рентгенівських променів, так і з присутністю алюмінію в складі глобул, в тому числі у вигляді окислених з поверхні частинок.



а



б

Рисунок 4.3. Штрих-діаграма ЕІЛ-покриття ТБСАН / АЛ9:

а) час обробки 2 хв / см²,б) час обробки 8 хв / см²

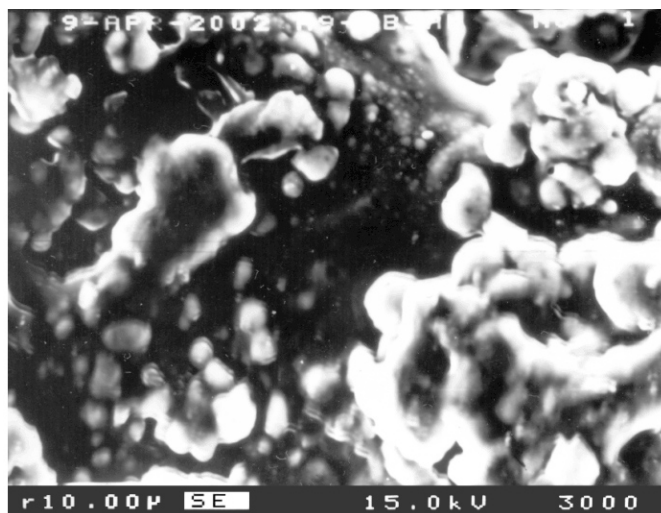
На рис. 4.4 приведена мікроструктура поверхні покриття у вторинних електронах (рис. 4.4, а) і характеристичний рентгенівському випромінюванні (рис. 4.4, б, в). Основу покриття ТБСАН / АЛ9 становлять алюміній-містять фази (темне поле на рис. 4.4, а) і включення тугоплавких частинок, в тому числі непровідних (світле поле), з розміром 1 ... 3 мкм і їх агломерацій. Зустрічаються темні частки

зі світлою зовнішньою оболонкою, що свідчить про проходження реакції окислення з зовнішньої поверхні зерна. Такими зернами можуть бути частинки алюмінію із зовнішньою оболонкою з Al_2O_3 . На мікрофотографії (рис. 4.4, а) чітко видно світлі подовжені зерна оксиду, оксинитрида алюмінію, а також овальні зерна бората алюмінію. Збіг областей максимальної інтенсивності характеристичного випромінювання Ti і Si вказує на існування твердих розчинів системи $\text{TiB}_2\text{-TiSi}_2$ (рис. 4.4, б, в).

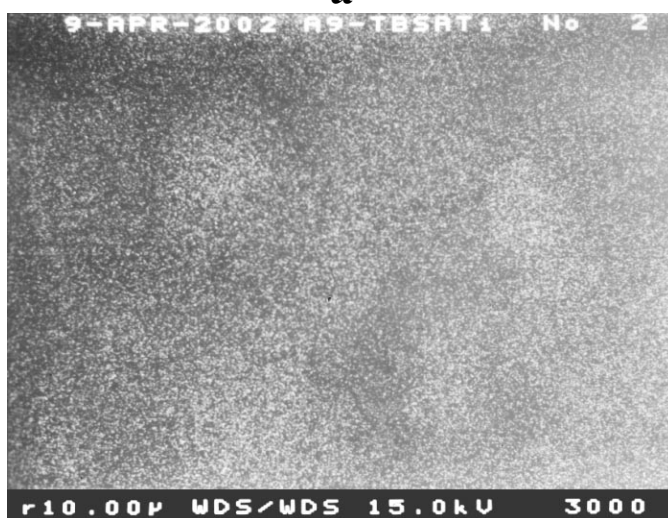
Отримані результати РФА узгоджуються з розподілом елементів на поверхні покриття ТБСАН / АЛ9 (рис. 4.5, а). Згідно з цими даними, основними фазами легованого шару є алюміній-містять фази.

Підтверджується участь кисню у формуванні покриття, кількість якого досить велика і складає по відношенню до алюмінію і титану, відповідно (в відносних одиницях): $\text{O: Al} = 1:10$ і $\text{O: Ti} = 1: 1$ (рис.4.5, а). Накладення відповідних концентраційних максимумів Ti і Si; Al, Ti і O; Al, Si та O вказує на можливість існування обмежених твердих розчинів в системі $\text{TiB}_2\text{-TiSi}_2$ і відповідних з'єднань β -тіаліта і МУЛЛИТО, що утворюються відповідно до реакцій: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 = \text{Al}_2\text{TiO}_5$; $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 = \text{Al}_2\text{SiO}_5$.

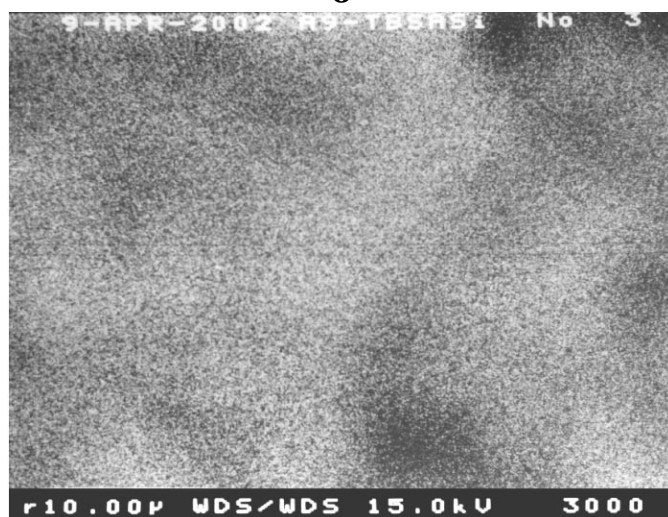
Близький характер спектрів МРСА з поверхні покриття ТБСАН / АЛ9 (рис. 4.5, а) і електрода ТБСАН після його окислення при 1200 оС (рис. 4.5, б) підтверджує освіту на поверхні покриття вже в процесі його формування оксидних фаз. Відповідно до результатів РФА і МРСА окисленої при 1200 оС поверхні матеріалу електрода ТБСАН



а



б



в

Рисунок 4.4. Мікроструктура поверхні глобули ЕІЛ-покриття ТБСАН / АЛ9 у вторинних електронах (а) і в рентгенівському випромінюванні: Ti (б), Si (в)

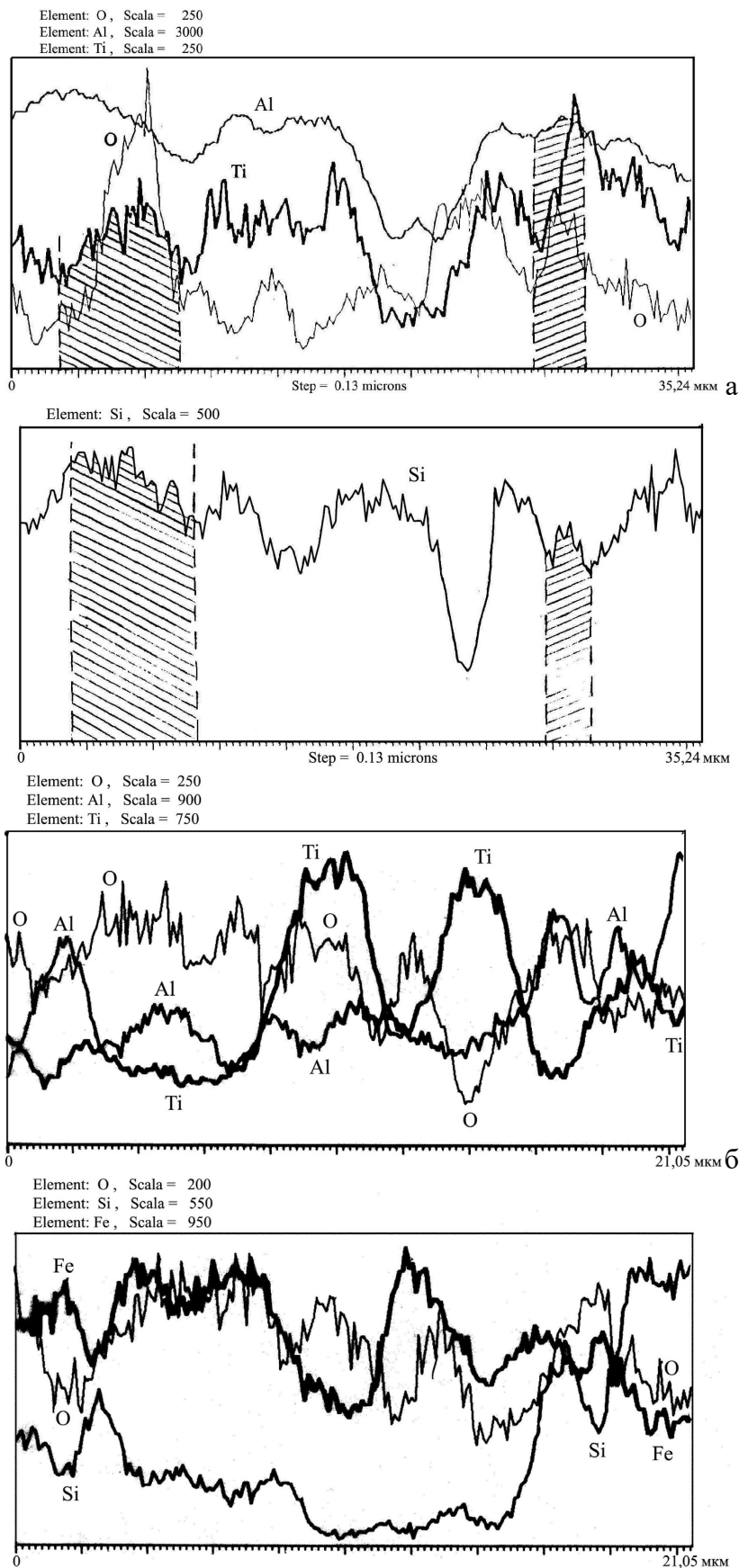


Рисунок 4.5. Розподіл елементів на поверхні: а) ЕІЛ-покриття ТБСАН / АЛ9 (час обробки $t = 8 \text{ хв} / \text{см}^2$); б) електрода ТБСАН після СОТ при 1200 оС такими фазами є оксинитрида алюмінію $\text{Al}_{10}\text{N}_8\text{O}_2$, TiO_2 (рутил), борат алюмінію AlBO_3 і невеликі кількості $\alpha\text{-SiO}_2$ і Fe_2O_3 . При 1400 оС в окалині на

зразку кераміки ТБСАН містяться Al_2O_3 , β -тіаліт (Al_2TiO_5), муллит ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) і, ймовірно, тверді розчини Al_2O_3 і Fe_2O_3 в β -тіаліте і мулли. Передбачається можливість утворення цих фаз у вторинних структурах, що формуються в нерівноважних умовах процесу трібоокислення покриття ТБСАН / АЛ9.

Можна очікувати, що шорсткість модифікованої поверхні буде тим менше, чим менше відмінність у смачиваємості матеріалом основи легуючих компонентів. З іншого боку, армування модифікованої поверхні алюмінієвого сплаву глобулами матеріалу підвищеної твердозволоження має сприяти підвищенню зносостійкості покриття.

Таким чином, в процесі ЕІЛ сплаву АЛ9 електродними матеріалами на основі нітриду алюмінію систем $\text{AlN-TiB}_2\text{-TiSi}_2$ формується композиційне покриття, що характеризується глобулярної структурою. Основу покриттів складає алюміній-яка містить матриця системи Al-NOB , модифікована борідами і силіцидом перехідного металу, боратами алюмінію, в якій присутні також боросіліциди титану (цирконію), оксидні фази і обмежені тверді розчини системи $\text{Ti B}_2\text{-Ti Si}_2$.

4.4 Фізико-хімічна модель формування ЕІЛ-покриттів на алюмінієвих сплавах

Особливістю ЕІЛ легкоплавких металів, як уже зазначалося, є їх інтенсивна рідко-парова ерозія внаслідок випаровування під дією іскрового розряду, яка перевищує приріст маси за рахунок перенесення легуючих компонентів.

На підставі результатів дослідження фазового, елементного складу, структури легованого шару, міжфазної взаємодії та кінетики масопереносу в системах ТБСАН / АЛ9, пропонується наступна фізико-хімічна модель [51] формування електроіскрових покриттів на алюмінії і його сплавах, що включає вибір компонентів легирующего композиційного матеріалу, процеси електро массо переноса, селективність змочування легуючих компонентів алюмінієм, фазові перетворення в МЕП і на легуємі поверхності. Схематично модель представлена на рис. 4.6.

В процесі ЕІЛ позитивний приріст алюмінієвого катода забезпечується наявністю в МЕП "екрану" з парів і частинок непровідящих фаз продуктів електроерозії електрода, що пригнічують ерозію матеріалу катода за рахунок перерозподілу енергії іскрового розряду в МЕП. Створення такого "екрану" досягається використанням в якості матеріалу легуючого електрода композиційної кераміки, що містить, у вигляді основної фази (≥ 50 мас.%), Діелектричний компонент (AlN) іскрового розряду з утворенням непровідящих фаз (B_2O_3). Взаємодія частинок продуктів електроерозії електрода з поверхнею катода в мікророзплаву визначається їх смачиваємостю алюмінієвим сплавом і адгезійним взаємодією (табл. 4.1).

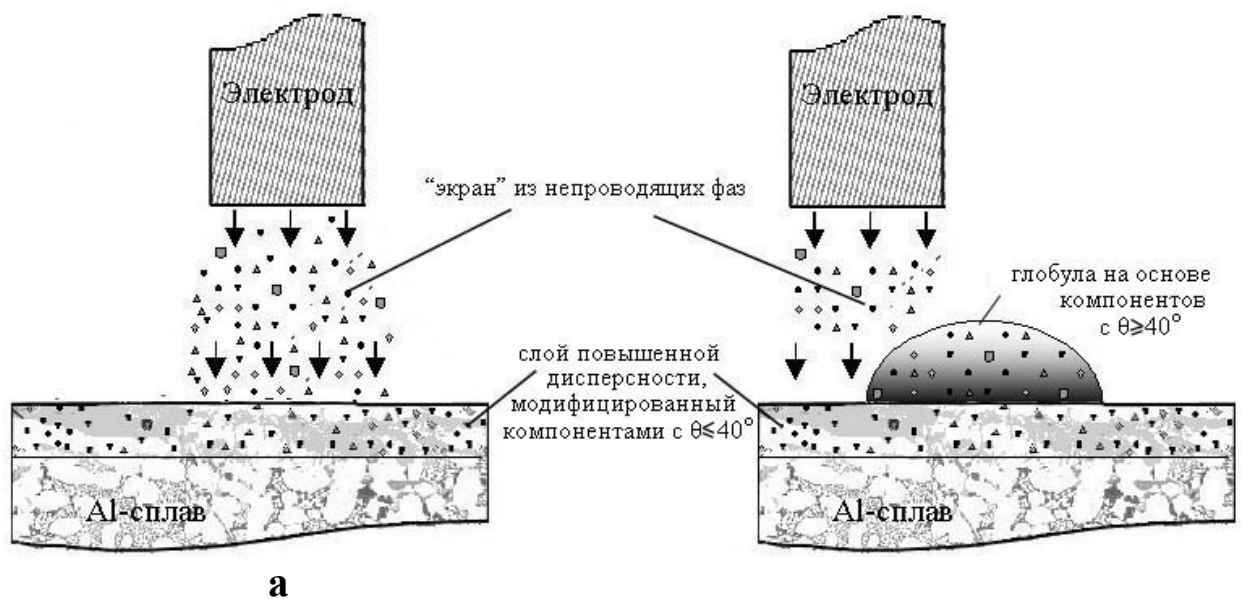


Рисунок 4.6. Модель формування ЕІЛ-покриття на сплавах алюмінію:

а - для випадку компонентів з контактним кутом змочування $\theta \ll 40^\circ$

б - для випадку компонентів з контактним кутом змочування $\theta \geq 40^\circ$

Компоненти з високою смачиваємостю алюмінієм (AlN, Al_2O_3 ; $\theta \ll 40^\circ$), інтенсивно втягуються в конвективні потоки розплаву, відповідальні за формування матричної структури модифікованого шару (товщиною ≤ 10 мкм) підвищеної дисперсності на основі алюмінієвого сплаву системи AlN-O-B.

Компоненти з низькою смачиваємостю алюмінієм (ZrB_2 ; TiB_2 $\theta \geq 40^\circ$) слабо захоплюються конвективними потоками розплаву, утворюючи на модифікованій поверхні алюмінієвого сплаву напівсферичні глобули

композиційного матеріалу (висотою 40 ... 100 мкм) діаметром до 600 мкм, висота яких і займана ними площа оброблюваної поверхні тим більше, чим більше контактний кут змочування. Структура глобули є градієнтною за складом за рахунок масопереносу алюмінію з основи, що визначає плавне зменшення мікротвердості покриття в напрямку до основи .

Традиційно при різних методах нанесення покриттів прагнуть до такої оптимізації технологічних режимів, яка забезпечувала б збереження складу та структури наносяться матеріалів, що містять карбіди, бориди і інші металоподібні з'єднання, що особливо важливо для WC-Co і аморфізуючих сплавів. З іншого боку, при високотемпературному осадженні композиційної кераміки досліджуваних складів в кисневозосередженому середовищі МЕР і на легуючій поверхні відбувається інтенсивна взаємодія компонентів продуктів електроерозії один з одним і з матеріалом підкладки в умовах окислення, що супроводжується утворенням нових оксидних фаз відповідно до реакціями. Це дає можливість прогнозованого зміни складу покриття за рахунок вибору компонентів матеріалу, що наноситься з урахуванням утворення нових оксидних фаз, які є високотемпературними корозійно стійкими сполуками і можуть грати роль твердого змащення в умовах сухого тертя ковзання. До них відносяться муліта, β -тіаліт, алюмінати і титанати заліза. Відносно β -тіаліта це підтверджується модельними дослідями вивчення трибологічних поведінки попередньо окисленої кераміки TiN-AlN [52].

Таким чином, ЕІЛ є структуроутворюючої технологією, контрольованої вибором компонентів матеріалу легуючого електрода.

5 ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕІЛ-ПОКРИТТІВ НА СПЛАВАХ АЛЮМІНІЮ

5.1 Триботехнічні характеристики ЕІЛ-покриттів з великим вмістом бору

В даний час увагу дослідників направлено на розробку композиційних покриттів, в яких варіювання структурними ефектами і вибір фазових складових дозволяє конструювати покриття таким чином, щоб комбінувати властивості, що забезпечують оптимальні умови експлуатації трібоконтакта. Наявність контактних навантажень в вузлах тертя, при яких можлива істотна пружна або навіть пластична деформація підкладки, призводить до необхідності забезпечувати пружність матеріалу покриття. Вимога поєднати високу твердість і пружні властивості матеріалу покриття привело до використання тонкодисперсних гетерофазних градієнтних або багат шарових структур з чергуванням твердої і м'якої складових. Інший найважливіший аспект проблеми зносостійких покриттів полягає у виборі фазових складових. Вони повинні забезпечувати формування в зоні контакту в процесі трібоокислення вторинних самовідновлюючих структур у вигляді тонких нанодисперсних поліоксидних плівок, які перешкоджають адгезійною взаємодії поверхонь тертя, мають низький коефіцієнт тертя, міцну адгезионну зв'язок з поверхнею покриття щоб уникнути їх виносу з робочої зони, підвищений опір високотемпературному окислення і грають роль твердого змащення в умовах сухого тертя.

Відомо, що в процесі тертя поверхневий шар внаслідок пластичної деформації переходить в термодинамічно нерівноважний активний стан, з якого шляхом дифузії і хімічної взаємодії з навколишнім середовищем прагне перейти в пасивне. В результаті цієї взаємодії утворюються гетерофазні нанодисперсні вторинні структури, що екранують основний матеріал.

Близько 90% роботи по пластичної деформації матеріалу перетворюється в тепло, яке призводить до локального підвищення

температури (з теоретичних оцінками до 1000 оС), що забезпечує термічне активування хімічних процесів і фазових перетворень. Крім того, процес трибологічних пошкодження поверхні супроводжується трібоеміссією, яка визначається як емісія електронів, фотонів, негативних і позитивних іонів, фононів, рентгенівських променів і газів, що також ініціює хімічні реакції, які в умовах тертя можуть протікати при температурах, нижче рівноважних.

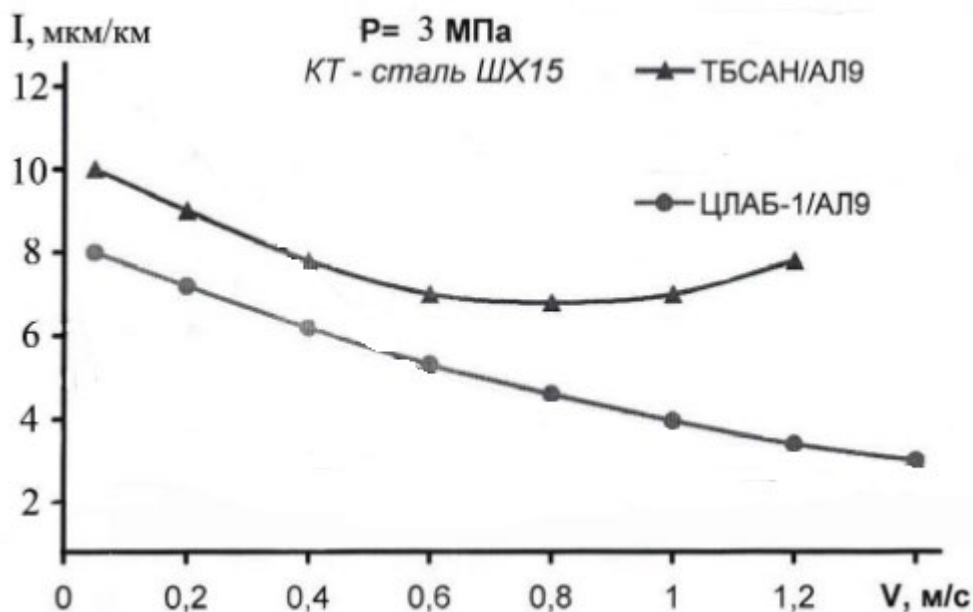
Використовувані в якості легуючих електродів композиційні матеріали ТБСАН, (табл. 2.1), забезпечують формування матричної структури гетерофазного матеріалу покриття на основі сплаву алюмінію, модифікованого тугоплавких сполук. При цьому необхідно враховувати, що в нерівноважних умовах ЕІЛ дослідженими матеріалами та трібоокислення можливе утворення як в зоні трібоконтакта, так і в ЕІЛ-покритті оксидних твердих розчинів на основі МУЛЛИТ, β -тіаліта. Наявність твердих розчинів в складі вторинних плівок в зоні трібоконтакта особливо важливо, тому що вони збільшують здатність системи до самоорганізації дисипативних структур і, отже, підвищують суцільність поліоксидної вторинної плівки, посилюючи її змащувальні властивості. Ці ж оксидні фази, що утворюються також в окалині на окисленої поверхні матеріалу електродів, грають роль твердого змащення в умовах сухого тертя і відповідальні за високі триботехнические характеристики як покриттів, так і електродних матеріалів, особливо при підвищених нагрузочно-швидкісних параметрах. Необхідно враховувати, що в парі зі сталевим контртіло в складі вторинних структур, як правило, присутня фаза Fe_3O_4 , яка також грає роль твердого змащення в умовах сухого тертя . Наведені в наступних розділах результати триботехнічних випробувань підтверджують ці уявлення.

Термодинамічними розрахунками і вивченням спікання в повітряному середовищі боз одержаних композиції показано, що при нагріванні бор активно взаємодіє з киснем і у вигляді оксиду бору B_2O_3 переміщується на поверхню з утворенням при терті вторинних структур на основі B_2O_3 . Через низьку температуру плавлення (450 ... 470 оС) оксид бору плавиться в умовах тертя і працює як рідка мастило до температури 650 оС, що призводить до

значного зниження тертя і зносу. На цій підставі можна очікувати високий рівень триботехнічних характеристик покриттів з матеріалів з високим вмістом бору.

5.2. Триботехнические характеристики EIL-покриттів на основі нітриду алюмінію

Згідно з даними РФА і МРСА, в складі досліджуваних покриттів присутні оксидні фази, що утворюються в процесі формування легованого шару: для ЦБСАН-покриття - Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , оксинитрида і борати алюмінію, а також тіаліт і МУЛЛИТ. Передбачається, що ці ж фази присутні в складі вторинних структур (в зоні трибоконтакта), утворення яких інтенсифікується в нерівноважних умовах трибоокислення і має супроводжуватися зниженням тертя і зносу з ростом нагрузочно-швидкісних параметрів в умовах сухого тертя. Отримані експериментальні результати підтверджують ці припущення. Як впливає з залежностей інтенсивності зношування покриттів від швидкості ковзання і навантаження $I = f(V) P = \text{const}$ і $I = f(P) V = \text{const}$ (рис. 5.1, а, в), на початковому етапі тертя з ростом нагрузочно-швидкісних параметрів знос I знижується до деякого стабільного значення 4 ... 6 і 7 ... 11 мкм / км для ЦБСАН- і ТБСАН-покриттів, відповідно. Це вказує на формування в процесі тертя екранують вторинних структур на поверхні покриття.



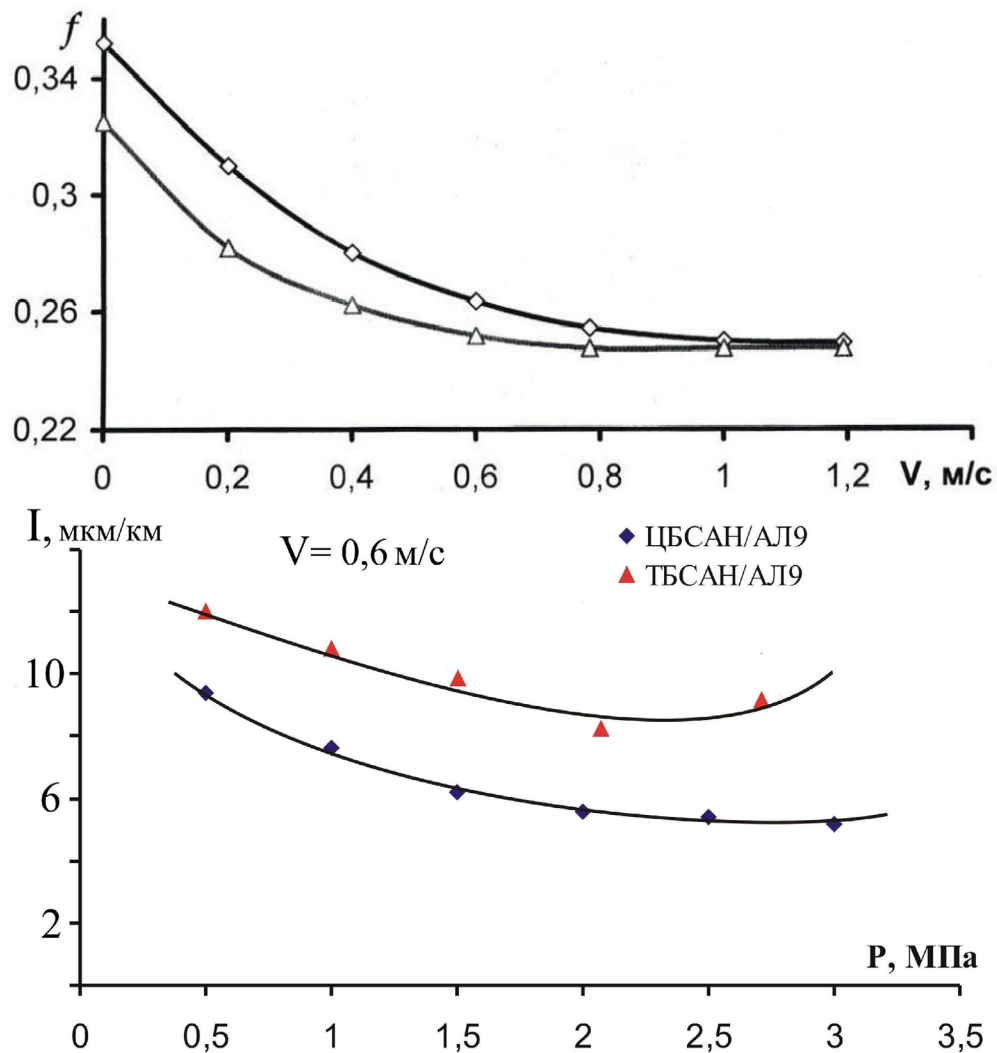


Рисунок. 5.1. Триботехнические характеристики ЕІЛ-покриттів і електродів на основі нітриду алюмінію

З ростом нагрузочно-швидкісних параметрів ($V > 0,6$ м / с і $P > 2$ МПа) знос ТБСАН-покриття зростає, тоді як у разі ЦБСАН-покриття зберігаються стабільно низькі значення I в більш широкому діапазоні швидкостей ковзання і навантажень (рис. 5.1, а, в). Це може бути результатом теплового захисту алюмінієвого сплаву діоксидом цирконію, що утворюється в складі вторинної плівки в процесі трібоокислення. Крім того, можливо позитивний вплив на інтенсивність зносу більш вираженого глобулообразовання в структурі покриття ЦБСАН / АЛ9. Багаторівнева гетерогенність мікроструктури глобулярних електроіскрових покриттів викликає зменшення реальної площі трібоконтакта, що сприяє значному (до 103 МПа [114]) підвищенню тиску і температури в зоні тертя (до 1000 оС і вище) і призводить до зростання ймовірності утворення вторинних структур.

На рисунку 5.1, а, б для порівняння наведені також залежності $I(V)$ і $f(V)$ для легуючих електродів. Величина зносу покриття ЦБСАН / АЛ9 наближається до такої кераміки ЦБСАН при швидкостях ковзання $V > 1$ м / с, що може свідчити про формування в процесі трібоокислення на поверхні як покриття, так і електрода поліоксидної вторинної плівки близького складу.

На рисунку. 5.1, а для порівняння представлена залежність $I(V)$ і також для покриття ЦЛАБ-1 / АЛ9. Близькість величини I при швидкостях ковзання $\geq 0,6$ м / с для покриттів ЦЛАБ-1 / АЛ9 і ЦБСАН / АЛ9, в складі яких присутній ZrO_2 , підтверджує можливий ефект теплового захисту алюмінієвого сплаву діоксидом цирконію. У той же час більш низькі значення зносу покриття ЦЛАБ-1 / АЛ9 в області низьких швидкостей ковзання ($V < 0,6$ м / с) можуть свідчити про позитивний вплив на зносостійкість рідкої фази B_2O_3 .

5.3. Вимоги до матеріалу електрода, призначеному для ЕІЛ сплавів алюмінію

На підставі результатів вивчення мікроструктури, складу покриттів, їх триботехнічних характеристик, а також змочування і кінетики масопереносу в процесі ЕІЛ сплавів АЛ9 і АЛ25 композиційної керамікою систем $AlN-TiB_2-TiSi_2$, (з різним співвідношенням компонентів) і силіцидом бору можна сформулювати такі вимоги до композиційному матеріалу легуючого електрода (анода), щоб забезпечити отримання зносостійких покриттів в процесі ЕІЛ алюмінієвих сплавів без втрати маси катода:

- матеріал електрода повинен містити в кількості ≥ 50 мас.% або діелектричний компонент (AlN), або таку провідну фазу, яка б утворювала в МЕР в процесі високотемпературного окислення продуктів електроерозії непровідні з'єднання (AlN , Al_2O_3 , B_2O_3);
- в разі композиту на основі діелектричного компонента інші фазові складові повинні забезпечувати електропровідність в ланцюзі анод-МЕР-катод;

- матеріал електрода повинен хімічно активно взаємодіяти з алюмінієвим сплавом для забезпечення адгезійного взаємодії матеріалу покриття з основою і, відповідно, для підвищення коефіцієнта масопереносу;
- продукти окислення матеріалу електрода повинні бути високотемпературними корозійностійкими сполуками (β -тіаліт, МУЛЛИТО, тверді розчини на їх основі та ін.), які виконують роль твердого змащення в умовах сухого тертя ковзання.
- для створення структурно-неоднорідного глобулярного покриття необхідно селективне змочування алюмінієвим сплавом основних компонентів легирующего електрода, для створення структурно-однорідного покриття - відсутність селективності змочування легуючих компонентів.
- матеріал електрода повинен володіти високою твердістю і зносостійкістю для забезпечення високого рівня експлуатаційних властивостей електроіскрового покриття.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Метою даного розділу є аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів, притаманних даному способу та забезпечення умов праці, отже основні проблеми, які ми розглядаємо це:

- зменшення викиду шкідливих речовин в атмосферу;
- захист виробничого персоналу від випромінювання в оптичному діапазоні (ультрафіолетове, видиме, інфрачервоне);
- забезпечення пожежобезпеки та електробезпеки;
- забезпечення захисту від крапель і виплесків розплавленого металу, іскор;
- безпечну експлуатацію механізмів і систем, що рухаються.

6.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів

Наявність зазначених небезпечних і шкідливих виробничих факторів є невід'ємним негативним наслідком при наплавленні. Серед них найбільшу загрозу для здоров'я зварників становить зварювальний аерозоль, від якого до цього часу зварник захищений дуже слабо. Вплив зварювальних аерозолів на організм призводить до бронхо-легеневих захворювань зварників.

При наплавленні спостерігається інтенсивне ультрафіолетове випромінювання та помірне інфрачервоне випромінювання, які негативно впливають на очі зварника та відкриті ділянки шкіри викликаючи почервоніння слизової оболонки повіки та опіки шкіри подібні до сонячних.

Під час наплення рівень шуму може сягати 120-130 дБА. Як засіб для захисту від такого рівня шуму можна використовувати біруши.

Шкідливі та небезпечні виробничі фактори, що виникають при цьому способі зварювання:

- ✓ Виділення шкідливих речовин;
- ✓ Ультрафіолетове випромінювання;
- ✓ Інфрачервоне випромінювання;
- ✓ Шум при зварюванні;
- ✓ Ураження електричним струмом;
- ✓ Механізми і вироби, що рухаються.

6.2 Забезпечення безпеки праці

Для проведення напалення металів виділили окреме приміщення. Допоміжні операції для напалення (механічна обробка, очищення, приготування порошків тощо) проводяться за межами основних ділянок. Пристрої місцевої витяжної вентиляції блокуються з технологічним обладнанням.

Для усунення можливості ураження електричним струмом разом з загальними засобами електробезпеки прийнято рішення перевіряти роботу кнопкових пристроїв дистанційного вмикання і вимикання установки з метою запобігання випадковому пуску обладнання та блокуючих пристроїв, що забезпечують автоматичне відключення електроживлення у разі зупинки, а також блокування кожуха, що закриває струмопідвідні частини осцилятора і відключає електроживлення при зніманні кожуха.

Усі операції з напалення проводяться не менш ніж двома робітниками.

6.2.1 Освітлення приміщення

Освітлення повинне відповідати вимогам ДБН В 2.5-28:2018 "Природне і штучне освітлення". Допускається природне, штучне і сумісне освітлення. Природне освітлення може бути боковим і верхнім.

Природне освітлення:

На нашому місці природне освітлення – однобічне бокове.

Вікна виходять на захід.

Установка розміщена на відстані 2-х метрів від вікна.

Розряд роботи зору – II - III середньої точності.

Штучне освітлення:

Штучне освітлення передбачається у всіх виробничих та побутових приміщеннях для компенсації нестачі природного світла та для освітлення приміщень у темний період доби. Від того, наскільки кваліфіковано воно спроектовано залежить безпека праці та самопочуття працівників, продуктивність їх праці та якість продукції. Відомо, що раціонально виконане штучне освітлення приміщень при одній і тій же витраті електроенергії підвищує продуктивність праці на 15- 20%. Разом з тим неправильно вибране та недостатнє освітлення робочих місць може бути причиною функціональних зорових порушень у працівників.

Загальне освітлення (незалежно від системи освітлення) повинно відповідати встановленим нормам стосовно нерівномірності освітлення в зоні розміщення робочих місць. Відповідно до вимог ДБН В 2.5-28:2018 відношення максимальної освітленості до мінімальної допускається не більше: для робіт I-III розрядів при люмінесцентних лампах – 1,5, при інших джерелах світла – 2; для робіт IV-VII розрядів – відповідно 1,8 та 3. Підрозряд роботи зору – б (фон середній, контраст об'єкта з фоном – малий);

Найменше значення штучної освітленості на робочих поверхнях при системі комбінованого висвітлення повинне бути не менш 1000 лк, при загальному освітленні - не менш 300 лк для ділянок ручного і напівавтоматичного плазменно-дугового напилювання, ділянок з використанням машин з числовим програмним керуванням - відповідно 750 і 300 лк.

Штучне освітлення здійснюється лампами освітлення люмінесцентного типу ЛД-40

Технічні характеристики люмінесцентної лампи ЛД-40 наведені в табл.6.1

Таблиця 6.1 Технічні характеристики люмінесцентної лампи ЛД-40

Потужність,Вт	Напруга мережі на лампі, В	Номінальний світловий потік, лм.	Колірна температура, К
40	220	2340	4000

Середній потік лампи нестабільний в світловому потоці тому приймаємо світловий потік рівний 2100 лм.

Визначимо кількість ламп на дільниці.

Світильник типу ЛП 002-4×40/II-02 з чотирма лампами ЛД-40, кожна знаходиться на висоті 3,5 метра над робочою поверхнею. Коефіцієнт запасу 1,8. Побілка в приміщенні дільниці світла ($\rho_{\text{ст}}=70\%$, $\rho_{\text{стіни}}=50\%$, $\rho_{\text{підл}}=10\%$).

Табличне значення відповідає освітленості 100лк, нормована освітленість становить 300 лк.

6.2.2 Шум і вібрація

Граничні величини шуму на робочих місцях регламентуються ДСН 3.36.037-99. В ньому закладено принцип встановлення певних параметрів шуму, виходячи з класифікації приміщень за їх використанням .

Основними джерелами шуму і вібрації механічного походження є установка для нанесення покриття Електрон 21. Джерела аеродинамічного шуму - вентиляторні установки,

Вібрацією у даному випадку можна знехтувати, так як установка не має відносно масивні рухомі частини з малою швидкістю обертання.

Оскільки рівень звуку при роботі обладнання при допустимому значенні 80 дБ, досягає до 132 дБ (виробничий шум перевищує встановлені норми), тому необхідно проведення заходів для зниження шуму.

До таких заходів відносяться:

1) Постійні робочі місця повинні бути забезпечені засобами колективного захисту від шуму і випромінювання неіонізуючої частини спектра електромагнітного поля - екранами.

2) При напилюванні матеріалів на вироби або деталі великих габаритів необхідно застосовувати звукоізолюючі кожухи, розраховані відповідно до глави ДБН В.1.2-10-2008 "Захист від шуму".

3) Захист від шуму повинний здійснюватися за допомогою навушників, касок або антифонів-вкладишів відповідно. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови".

6.2.3 Організація робочих місць

Постійні робочі місця, які живляться електричною енергією від багатопостових джерел обладнані щитками з сигнальною лампою, що показує зварнику на наявність або відсутність напруги у зварювальному ланцюгу.

Розташування обладнання виконано наступним чином:

- між стіною будинку та обладнанням – 0,5 м;
- між стаціонарними джерелами живлення – 0,8 м;
- між обладнанням та місцями складування – 1,0 м.

Трубопроводи гідросистем високого тиску, що розташовані в зоні роботи обслуговуючого персоналу закриті захисними екранами.

Прийнято рішення не допускати проведення наплавлювальних робіт без вживання заходів, що виключають можливість пожежі як під час напилення, так і після закінчення.

6.2.4 Електробезпека

Широке використання промисловості електричної енергії зобов'язує приділити увагу профілактиці електротравматизму. Невірне експлуатування електрообладнання або його несправність приводить до ураження електричним струмом. При протіканні електричного струму через тіло людини може виникнути небезпека ураження його окремих органів або організму в цілому.

Основними причинами ураження електричним струмом є:

- дія електричного струму, що проходить в зварюваному ланцюзі;
- доторкування до відкритих струмоведучих частин та дротів;
- доторкування до струмоведучих частин через предмети з низьким опором ізоляції;
- доторкання до металевих частин обладнання, що випадково потрапили під напругу.

Небезпека ураження електричним струмом створює також різноманітне обладнання:

- джерела зварювального струму;
- електричний привід (двигун);
- електрообладнання під'ємно транспортних засобів;
- високочастотні і освітлювальні установки і т.д.

Небезпека ураження електричним струмом пов'язана з недоліками в конструкції, монтажі обладнання, порушенням правил його експлуатації, незадовільною організацією робочих місць, недостатнім інструктажем і т. ін.

Для запобігання ураження електричним струмом необхідно застосовувати схеми занулення.

Основними видами ураження є: так званий удар при доторканні до струмоведучих частин; розрив тканин. Велику небезпеку мають також місцеві підвищення температури на ділянках малої провідності електричних ланцюгів і спалахів, котрі можуть викликати пожежу або вибух.

Все устаткування для нанесення покриттів працює з напругою 220 чи 380 В. Тому небезпека завжди актуальна, і виникає при торканні людиною незахищених струмоведучих частин трансформаторів, випрямлячів, електропроводів і іншого устаткування під напругою. Все електроустаткування відповідає ГОСТ 12.2.007.0... 14-75 "Вироби електротехнічні. Вимоги безпеки". Також виникає небезпека і при торканні частин устаткування, що не знаходиться під напругою, але випадково у результаті порушення чи ушкодження ізоляції, знаходиться під ним. Опір ізоляції окремої ділянки мережі не менш ніж 0,5 Ом.

Для захисту від ураження електричним струмом корпус установки газодинамічного наплення заземлено. Окремі елементи зварювального ланцюга, відрізки зварювальних: кабелів при нарощуванні з'єднано роз'ємними з'єднувальними муфтами. Струмоведачі кабелі зварювального ланцюга ізолювані по всій довжині і захищені від механічних пошкоджень. Заборонено залишати увімкнену установку для наплення. Прийнято рішення приєднання і від'єднання від мережі електрозварювальних установок, перевімкнення зварювального струму, рукоятками, розміщених всередині установки не маючої блокування, а також спостереження за налагодженим станом установок в процесі експлуатування проводити електротехнічним, персоналом. Персонал, обслуговуючи електрозварювальні установки, періодично проходить інструктаж по небезпеці електричного струму і методах надання першої допомоги.

Перелік засобів безпеки:

1. Для обслуговуючого персоналу, а також для всіх робітників, пов'язаних з експлуатуванням випрямляча, обов'язковим є дотримання правил технічного експлуатування електроустановок, техніки безпеки при експлуатації електроустановок.

2. Допуск до експлуатування випрямляча дозволений людям відповідної кваліфікації.

3. Напруга в мережі являється небезпечною, тому :

1) корпус випрямляча надійно заземлений. Для цієї мети випрямляч оснащений болтом заземлення із знаком „Земля”, розміщеним на задній стінці випрямляча.

2). Заборонено робота випрямляча без кожуха, з відкритими боковими стінками і переміщення випрямляча без відключення його від мережі.

6.2.5 Електробезпека

Широке використання в промисловості електричної енергії зобов'язує приділити увагу профілактиці електротравматизму. Неправильне експлуатування електрообладнання або його несправність призводить до ураження електричним струмом. При протіканні електричного струму через тіло

людини може виникнути небезпека ураження його окремих органів або організму в цілому. Основними видами ураження є: опік електричною дугою; так званий удар при доторканні до струмоведучих частин; розрив тканин та ін. Велику небезпеку мають також місцеві підвищення температури на ділянках малої провідності електричних ланцюгів і спалахів, котрі можуть викликати пожежу або вибух.

Все устаткування для нанесення покриттів працює з напругою 220 чи 380 В. Тому небезпека завжди актуальна, і виникає при торканні людиною незахищених струмоведучих частин трансформаторів, випрямлячів, електропроводів і іншого устаткування під напругою. Все електроустаткування повинно відповідати ДСТУ 7239:2011 "Вироби електротехнічні. Вимоги безпеки". Також виникає небезпека і при торканні частин устаткування, що не знаходиться під напругою, але випадково у результаті порушення чи ушкодження ізоляції знаходиться під ним. Опір ізоляції окремої ділянки мережі не менш ніж 0,5 МОм.

Для захисту від ураження електричним струмом корпус будь-якої електрозварювальної установки необхідно заземляти. Послідовне включення в заземлюючий провідник декілька апаратів заборонено.

Окремі елементи зварювального ланцюга, відрізки зварювальних кабелів при нарощуванні потрібно з'єднувати роз'ємними з'єднувальними муфтами. Струмоведучі кабелі зварювального ланцюга повинні бути ізольовані по всій довжині і захищені від механічних пошкоджень. Забороняється залишати на робочому місці зварювальний інструмент, який знаходиться під напругою.

Приєднання і від'єднання від мережі електрозварювальних установок, перевірки зварювального струму, рукоятками, розміщених всередині установки, що не мають блокування, а також спостереження за налагодженим станом установок в процесі експлуатування повинно проводитись електротехнічним персоналом. Персонал, обслуговуючи електрозварювальні

установки, повинен періодично проходити інструктаж по небезпеці електричного струму і методах надання першої допомоги.

Перелік засобів безпеки:

1. Для обслуговуючого персоналу, а також для всіх робітників, пов'язаних з експлуатуванням випрямляча, обов'язковим є дотримання правил технічного експлуатування електроустановок, техніки безпеки при експлуатуванні електроустановок.

2. Допуск до експлуатування випрямляча повинен бути дозволений людям відповідної кваліфікації.

3. Напруга в мережі є небезпечною, тому :

1) корпус випрямляча повинен бути надійно заземлений. Для цієї мети випрямляч оснащено болтом заземлення із знаком „Земля”, розміщеним на задній стінці випрямляча.

2) один із вихідних зажимів випрямляча, до якого під'єднується дріт, що іде до виробу (зворотній дріт), і зварювальний стіл також повинні бути надійно заземлені.

4. Забороняється робота випрямляча без кожуха, з відкритими боковими стінками і переміщення випрямляча без відключення його від мережі.

6.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

Для проведення напилення металів виділили окреме приміщення. Допоміжні операції для наплавлення (механічна обробка, очищення, приготування порошків тощо) проводяться за межами основних ділянок. Пристрої місцевої витяжної вентиляції блокуються з технологічним обладнанням.

Для усунення можливості ураження електричним струмом разом з загальними засобами електробезпеки прийнято рішення перевіряти роботу кнопових пристроїв дистанційного вмикання і вимикання установки з метою запобігання випадковому пуску обладнання та блокуючих пристроїв, що

забезпечують автоматичне відключення електроживлення у разі зупинки, а також блокування кожуха, що закриває струмопідвідні частини осцилятора і відключає електроживлення при зніманні кожуха.

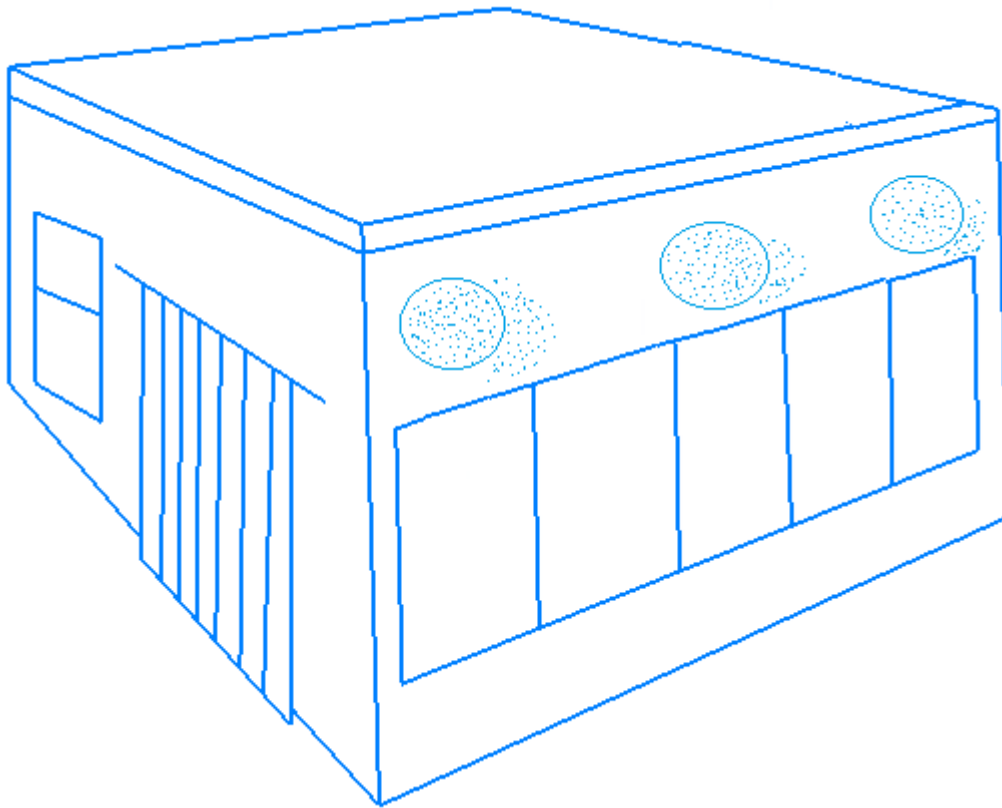


Рисунок. 6.1 Загальнообмінна механічна вентиляція

При значних об'ємах виробничих приміщень, невеликій кількості працюючих та наявності постійних робочих місць технічно обґрунтовано та економічно доцільно створювати необхідні метеорологічні умови та чистоту повітря безпосередньо на робочих місцях місцевими способами вентиляції – витяжною (локалізована) чи припливною (душування) та ін

Кількість повітря, яку належить видалити або подати вентиляційною установкою визначається різними методами в залежності від конкретних умов: за інтенсивністю виділення шкідливих речовин в повітря приміщення, за заданою швидкістю всмоктування повітря біля джерела утворення аерозолі та газів, за емпіричними формулами або повітрообміном, що рекомендується.

6.4 Пожежна безпека

Пожежна безпека при електрозварювальних роботах забезпечена регламентацією виконання, застосування і режиму експлуатації електрозварювальних установок та іншого обладнання, матеріалів і виробів, які можуть стати джерелами підпалення горючої середи. При веденні робіт по зварюванні в небезпечних зонах ставлять спеціальні пожежні пости. По закінченні зміни зварювальник повинен перевірити робочу зону і не залишати відкритого вогню. Слід бути обережним при переміщенні зварювальних проводів, оскільки особливу небезпеку викликає іскріння їх в місцях, віддалених від зварювальника. При виникненні полум'я в середині корпусу машини необхідно негайно залишити машину, виключити рубильник, відкрити двері машини і гасити полум'я сухим вогнегасником або сухим піском.

Крім того пожежна безпека(ДСТУ 3855-99) забезпечується:

- використання вогнегасників типу УО,ОП-10А – 2 шт.;
- застосуванням пожежної сигналізації з датчиком ИДФ-1;
- ретельним оглядом робочого місця (для усунення при наявності горючих сторонніх предметів) перед початком зміни.

Ступінь вогнестійкості будівель – мінімально припустиме обмеження вогнестійкості – 2,5 год.

Згідно ГОСТ 12.1.004-91 попередження утворення горючого середовища може забезпечуватись наступними загальними заходами або їх комбінаціями:

- максимально можливе використання негорючих та важкогорючих матеріалів замість горючих;
- максимально можливе за умови технології та будівництва обмеження маси та об'єму горючих речовин, матеріалів та найбільш безпечні способи їх розміщення;
- ізоляція горючого середовища (використання ізольованих відсіків, камер, кабін тощо);
- підтримання безпечної концентрації середовища відповідно до норм і правил безпеки;
- максимальна механізація та автоматизація технологічних процесів, пов'язаних з обертанням та використанням горючих речовин;

- установка та розміщення пожежобезпечного устаткування в ізольованих приміщеннях або відкритих майданчиках;
- застосування пристроїв захисту устаткування з горючими речовинами від пошкоджень та аварій, встановлення пристроїв, що відключають, відсікають, тощо;
- видаленням пожежонебезпечних відходів виробництва;

7. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

«ФОРМУВАННЯ ТА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ СИСТЕМИ $\text{AlN-TiB}_2\text{-Si}_2$ НА СПЛАВАХ АЛЮМІНІЮ»

7.1 Опис ідеї проекту

Розглянувши в попередніх розділах виготовлення покриттів, було розроблено технологію, що може використовуватися в різних напрямках виробництва. В цьому розділі буде проведено аналіз стартап-проекту, який визначить вигоди які може отримати користувач.

Таблиця 7.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення більш продуктивного обладнання для формування покриттів	Застосування у зварювальному виробництві	Дозволить виробництву не залежити від постачальників матеріалу для зварної конструкції

Проведено аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

— визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

Визначено перелік наступних конкурентів:

Конкурент 1— ООО «Крафт» м. Коростень;

Конкурент 2— ООО «Центррезервуарсервис» Дніпропетровська область;

Конкурент 3— ООО «ИННОВА ГРУПП.» м. Київ.

Таблиця 7.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/ п	Техніко- економічні характеристи ки ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів Технологія зварювання				W (слабк а сторон а)	N (нейтраль на сторона)	S (сильн а сторон а)
		Мій прое кт	Конк у- ретн 1	Конк у- рент 2	Конк у- рент 3			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Використання та компанування нестандартног о обладнання	+	-	-	-			+
2.	Розробка креслень	+	-	+	+			+
3.	Продуктивніс ть	+	-	-	-			+

Після порівняння характеристик проекту з конкурентами був визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик.

7.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту. Визначено технологічну здійсненність ідеї проекту, яка передбачає аналіз таких складових в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту.

№ п/ п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Створення більш продуктив- ного обладнання для складання та зварювання листів обичайки	Інженерні та конструкторські рішення	Наявна, але потребує наявності спеціального оснащення для стенду	Доступні

2	Використання більшої кількості оснащення у порівнянні з виробниками- конкурентами	Спеціальне устаткування	Наявні	Доступні
---	---	----------------------------	--------	----------

Проаналізувавши таблицю можна зробити висновок, що даний проект можна реалізувати.

7.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначаємо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації. Це дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку, які наведені у таблиці 7.4

Таблиця 7.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту.

№ п/ п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	100
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Наявність креслень, представлення результатів проектування
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Не змінна
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	45%

За попереднім оцінюванням ринок має зростаючу динаміку і хороший попит на запропонований нами продукт, тому робимо висновок, що ринок є привабливим для входження.

Далі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 7.5)

Таблиця 7.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту.

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	2	3	4	5
1	Зносостійкість	Ювілірні лавки	- точність встановлення зварювального оснащення	- проходження конструкції контролю якості;
2	Корозійна стійкість	Ювілірні лавки	- зварювання завдяки матеріалам, які підвищують корозійну стійкість	- оперативність налаштування виробництва.

При застосуванні даної технології існують певні загрози. Для попередження таких ситуацій необхідно якісне обладнання, а також виконувати роботи мають лише високо кваліфіковані робітники. Також, повинно бути своєчасне технічне обслуговування даного продукту (таблиця 7.6).

Таблиця 7.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Наявність більш дешевих технологій	Зацікавити потенційних клієнтів високою швидкістю виконання замовлення
2	Ризик браку інвестиційного капіталу	Тісно пов'язаний з попереднім ризиком і супроводжується загрозою виходу за кошторис фінансування проекту	Прорахувати додаткові варіанти обходу браку
3	Ризики персоналу	аспекти пов'язані з нестачею кваліфікованих	Підвищення заробітної плати за для зацікавлення

		працівників, порушення трудової і виконавської дисципліни, відсутністю лояльності співробітників до корпоративної культури	більш кваліфікованих працівників
--	--	--	-------------------------------------

В таблиці 7.6 ми визначили фактор загрози яка перешкоджає ринковому впровадженню нашого проекту, а також можливу реакцію на фактор щоб звести до мінімуму його вплив.

Але поряд із колом загроз існують і певні можливості (таблиця 7.7).

Таблиця 7.7.Фактори можливостей.

№ п/ п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	2	3	4
1	Попит	Потреба покриттів для більшості підприємств	Збільшення виробничих мощностей
2	Отримання нових замовлень на продукт	Оптимальна та розумна технологія складання та зварювання	Спробувати використовувати інші технологічні рішення для порівняння результатів
3	Корисність	Використання покриттів на кожних підприємствах	Пропонувати технологію на підприємства, які зацікавлені в оновенні проектування

В таблиці 7.7 ми визначили фактори можливостей які сприяють ринковому впровадженню нашого продукту, а вигоди які компанія може отримати відповідно від реакції на той чи інший фактор.

Таблиця 7.8.Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1	2	3
1. Тип конкуренції - олігополія	Характеризується невеликою кількістю фірм (від 2 до 10), обгороджених бар'єрами, які перешкоджають вступу в галузь нових фірм, мають контроль над цінами, але при змові з іншими олігополістами. Головною рисою олігополії є те, що кількість фірм така мала відносно розмірів ринку, що кожна з фірм-олігополістів визнає тісний взаємозв'язок одна з одною	Пропонувати технологію по найнижчим можливим цінам, замінити обладнання на аналогічне дешевше, спробувати домовитись з фірмами олігополістами про співпрацю.
2. За рівнем конкурентної боротьби- національний	Характеризується ринком збуту. Національний – на рівні країни в межах якої ведеться конкурентна боротьба.	Робити презентації з готовими рішеннями для підприємств, що займаються металоконструкціями, висвітлювати плюси своєї технології, брати участь у різноманітних технічних виставках.
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Галузева конкуренція передбачає суперництво окремих підприємств-продавців товарів та послуг у задоволенні потреб споживачів	Пропонувати адаптацію технології до різних виробничих потреб,
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-родова	Характеризується <i>товарами одного виду</i>	Пропонувати можливості розробки автоматизованої технології
5. За характером конкурентних переваг - нецінова	Проводиться головним чином за допомогою вдосконалення якості продукції, технології виробництва, інновацій та	Застосовувати більш досконале обладнання в своїх технологічних рішеннях

	нанотехнологій, патентування і брендування.	
6. За інтенсивністю - не марочна	Роль торгової марки незначна, хоча самі марки можуть бути присутніми на ринку	Відповідально підходити до роботи з клієнтами, якісно виконувати свою роботу і таким чином здобути визнання на ринку

В даній таблиці ми проаналізували ринок збуту нашого продукту і визначили загальні риси конкуренції на ньому.

Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі.

Таблиця 7.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером.

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари - заміники
Складові аналізу	ООО «ИННОВА ГРУПП.» ООО «Центррезервуарсервис» ООО «Крафт»	ООО «ДЗМ» ООО «ПРМК»	Росія Китай	Компанії з продажу нафтопродуктів	Технології побудовані за допомогою інших методів
Висновки:	Інтенсивність конкурентної боротьби з боку прямих конкурентів – є значною	- є можливість входу в ринок - є потенційні конкуренти	Постачальники диктують умови роботи на ринку: - відповідно оновлені технології; - дають високі гарантії.	Клієнти диктують умови роботи на ринку: - Відповідне наповнення технологічних та маршрутих карт;	Обмеження для роботи на ринку через товари заміники

Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Поки проект не впроваджено в життя, це важко зробити точно, можна дати лише попередню оцінку конкурентоспроможності.

Таблиця 7.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності.

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Висока технологічність	Використання великої кількості автоматизованих комплексів
2	Висока якість	За рахунок високого рівня автоматизації
3	Висока продуктивність	Можливість одночасно розробляти замовлення на різних етапах виробництва

В таблиці 7.10 на основі аналізу проведеного в таблиці 7.9 визначили та обґрунтували фактори конкурентоспроможності нашого проекту.

Таблиця 7.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Стенд з обладнанням для складання та зварювання листів обичайки».

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з нашою технологією						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Висока технологічність	1						+	
2	Висока якість	1						+	
3	Висока продуктивність	0						+	

Таблиця 7.12. SWOT- аналіз стартап-проекту.

Сильні сторони: - висока швидкість виконання замовлення; - відповідність конструкції всім нормативним вимогам; - продуктивність;	Слабкі сторони: - висока вартість автоматизованих комплексів та допоміжного обладнання - досить великі витрати часу для облаштування обладнання на конструкцію - висока вартість ремонту у випадку поломки
Можливості: - попит;	Загрози: - ризик браку інвестиційного капіталу

- отримання нових замовлень на продукт - корисність;	- конкуренція - ризики персоналу
---	-------------------------------------

В таблиці 7.12 проводимо перелік сильних та слабких сторін. А також ринкових загроз та ринкових можливостей який складаємо на основі факторів загроз і можливостей який ми складали раніше. Ринкові загрози та можливості на відміну від факторів ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів.

Таблиця 7.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту.

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	75%	1 рік
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	40%	1 рік

Проводимо аналіз розроблених нами альтернатив ринкового впровадження і з зазначених альтернатив обираємо ту яка має найбільшу ймовірність отримання ресурсів, а також є найшвидшою в реалізації. Отже обираємо стратегію нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу наявними ринковими можливостями.

7.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 7.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів.

№ п/ п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів в сприйнятті продукту	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Ювелірна фабрика	60%	80%	90%	10%

За результатами аналізу потенційних груп споживачів ми обрали цільові групи, для яких будемо пропонувати свою програму для оптимізації робочих центрів та визначили стратегію охоплення ринку: стратегію концентрованого маркетингу.

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку.

Таблиця 7.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/ п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
	Стратегія спеціалізації	Стратегія спеціалізації	Передбачає концентрацію на потребах одного цільового сегменту, без прагнення охопити увесь ринок. Мета тут полягає в задоволенні потреб вибраного цільового сегменту краще, ніж конкуренти	Стратегія спеціалізації

За базову стратегію розвитку було взято стратегію спеціалізації, що передбачає концентрацію на потребах одного цільового сегменту, без прагнення охопити увесь ринок.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 7.16).

Таблиця 7.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки.

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
	Ні	Так	Так - креслення оснащення - методи та засоби	Стратегія заняття конкурентної ніші

Таблиця 7.17. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Продуктивність	Стратегія спеціалізації	Застосування в наукових цілях	- Позиціонування за співвідношенням "ціна – якість" - Позиціонування за сферою застосування - Стратегія позиціонування за однією ознакою

Компанія за стратегію розвитку обрала спеціалізацію, і за цільові групи було обрано ювелірну фабрику, хоча у них вже є постачальники, але за рахунок нової технології компанія буде забирати клієнтів у конкурентів, і проводити підтримку та реалізовувати розвиток своєї конкурентної переваги.

7.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 7.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 7.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару.

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	2	3	4
1	Технологічність	Роботизація виробництва	Комплекс є повністю автоматизованим
2	Продуктивність	Використання установки в 2 зміни	Швидкість виконання замовлення

За рахунок ключових переваг товару і стратегії диференціації, що передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей за такою ж ціною як і у конкурентів буде розроблено маркетингову програму стартап-проекту.

Таблиця 7.19. Опис трьох рівнів моделі товару.

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Створення технологічного процесу
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики
	I=1 А E=00.8 Дж
III. Товар із підкріпленням	До продажу: доставка, налаштування.
	Після продажу: обслуговування

В таблиці 7.19 створено три - рівневу модель нашого товару, що включає задум товару та його вигоди, основі характеристики готового товару, спосіб його пакування та захисту від копіювання та плагіату.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 7.20).

Таблиця 7.20. Визначення меж встановлення ціни.

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової споживачів групи	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	900000 грн	1300000грн	2000000грн	1000000-1300000 грн

В таблиці проаналізовано ринкові ціни на товари аналоги та замінники, а також середній рівень доходів споживачів. За отриманими даними буде встановлена верхня та нижня межа на нашу програму.

Таблиця 7.21. Формування системи збуту.

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Звична купівля з деяким змінами, або модифікована закупівля. Вона передбачає придбання дещо змінених товарів (послуг), або зміну ціни на товар (послугу), або зміну кількості постачання).	Доставка товару покупцю, його налагодження та запуск у виробництво.	Канал нульового рівня	Власна система збуту. Виробник безпосередньо продає товар клієнту, продаж через інтернет.

Спираючись на специфіку закупівельної поведінки цільових клієнтів було обрано власну систему збуту, коли виробник безпосередньо продає товар клієнту через торгівлю в магазинах, посилками чи в роздріб.

Таблиця 7.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Бути на зв'язку	- електронна пошта - моб. телефон	Проектування технологічних процесів	Зацікавлення	«Наша технологія це перемога»

Висновки до розділу

Виходячи з отриманих результатів аналізу ринку, ціну на продукцію, її конкурентоспроможності, продуктивність роботи можемо зробити висновки, що впровадження даної технології є вигідним економічним кроком у розвитку власного бізнесу. З урахуванням того, що в подальшому можливо встановлення нових ділових зв'язків та вихід на нові ринки збуту, і подальше удосконалення запропонованої технології, це дозволить розширити бізнес и вийти компанії на новий рівень.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Обрані і розроблені склади композиційних електродних матеріалів на основі AlN і встановлені особливості ЕІЛ цими матеріалами Al-сплавів, які полягають у взаємозв'язку структуроутворення в покритті зі зволоженням продуктів електроерозії алюмінієм і в освіті в міжелектродному проміжку (МЕП) непровідящих фаз, що забезпечують екранування поверхні Al-катода від впливу іскрового розряду.

2. На підставі комплексу досліджень структури, фазового складу покриттів і електродних матеріалів (металографія, РФА, МРСА, СЕМ), кінетики електромасопереноса і змочування вперше встановлено такі закономірності формування ЕІЛ-покриття на Al-сплавах:

- фазовий склад покриття, що відрізняється від такого матеріалу легуючого електрода, з ростом часу обробки не змінюється;

- кінетика масопереносу при ЕІЛ алюмінієвих сплавів (коефіцієнт масопереносу становить 20 ... 60%) має трьохстадійний характер, типовий для тугоплавких сплавів. Встановлено залежність електроерозійної стійкості легуючого електрода від матеріалу катода, що визначається впливом зворотного масопереносу;

- ЕІЛ-покриття являє матрицю на основі алюмінію системи Al-O-N-B, армовану тугоплавких сполук.

- встановлено наявність одних і тих же оксидних фаз в складі покриття і окалини на поверхні електрода, а також схожість мікроструктури і спектрів МРСА покриття і окалини. Зроблено припущення, що ці фази є найбільш ймовірними компонентів вторинних плівок, що утворюються в зоні трібоконтакта і грають роль твердого змащення при сухому терті ковзання.

- структура покриття визначається змочуванням продуктів електроерозії електрода Al-сплавом. Глобулярна дискретна структура формується в разі селективного змочування легуючих компонентів алюмінієвим сплавом і реалізується при ЕІЛ матеріалами на основі AlN. Гомогенна суцільна структура формується за відсутності селективності змочування легуючих компонентів при

близьких до нуля контактних кутах і реалізується при ЕІЛ матеріалами з великим вмістом бору (ЦЛАБ-1, LaB6, B6Si).

3. Покриття характеризуються градієнтним розподілом фазових складових по товщині: кількість Al зростає в напрямку до основи з утворенням на кордоні плівки оксиду алюмінію (товщиною 5 ... 10 мкм), що зумовлює плавне зменшення мікротвердості H_m в тому ж напрямку. H_m покриттів (4 ... 10 ГПа) в 3 ... 8 разів перевищує H_m сплаву АЛ9 ($H_m = 1,2$ ГПа).

4. Інтенсивність зношування (I) покриттів системи LaB6-ZrB2 в 2 ... 3 рази менше в порівнянні зі сплавом АЛ25 при сухому терті і зменшується з ростом тривалості ЕІЛ і при подальшій лазерній обробці. Покриття силіциду бору на сплаві АЛ25 характеризується зменшенням коефіцієнта тертя (f) від 0,24 до 0,16 с ростом швидкості ковзання в діапазоні $1 \leq V \leq 7$ м / с. Результати обговорені з позицій формування в зоні трібоконтакта поліоксидних вторинних плівок за участю Al_2O_3 , La_2O_3 , ZrO_2 , твердих розчинів на основі ZrO_2 та оксиду бору, що грає роль рідкого мастила до температури 650 оС.

5. Величина I покриття на основі AlN в широкому діапазоні швидкостей (0,2...1,4 м/с) і навантажень (0,5...3 МПа) зменшується з зростанням навантаження-швидкосних параметрів. В отличие от покрытия ТБСАН/АЛ9, интенсивность изнашивания покрытия ЦБСАН/АЛ9 приближается к таковой материала электрода ЦБСАН, что объясняется тепловой защитой алюминиевого сплава диоксидом циркония, многоуровневой глобулярной микроструктурой легированного слоя и свидетельствует о близости состава вторичных структур для покрытия и электрода.

6. Сформульовано вимоги до матеріалу електрода і фізико-хімічна модель ЕІЛ алюмінієвих сплавів компактным електродом, засновані на виборі і співвідношенні структурних складових матеріалу електрода, що забезпечують освіту в МЕП екрануючого "хмари" з діелектричних компонентів продуктів електроерозії, і на змочуванні алюмінієвим сплавом легуючих компонентів, відповідальному за структурообразование легованого шару. Кількість фаз в матеріалі електрода, відповідальних за освіту непроводящих продуктів електроерозії електрода (AlN , Al_2O_3 , B_2O_3), має бути ≥ 50 мас.%;

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Абрамчук А.П. Разработка и оптимизация процесса поверхностного упрочнения алюминия и его сплавов методом электроискрового легирования компактными и порошковыми материалами: Дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук. – Кишинев, 1988. – 255 с.
2. Исследование взаимодействий на поверхности раздела покрытий металл-металл и металл-керамика, полученных напылением с помощью плазменной и высокоскоростной кислородной горелок. Study of interface interactions for metal- metal and metal-ceramic coating obtained by plasma and HVOF spraying / Guilemany J.M., Llorca-Isern N., Nunez M.D. et al. / Sci. met et mater. – 1994. – V.31. – № 8. – P. 1121-1126. – англ.
3. Ткаченко Ю. Г., Юрченко Д.З., Дубовик Т.В., Павликов В.Н., Юльогин В.К., Май А.В. Высокотемпературное трение и окисление керамики на основе нитрида алюминия. // Порошковая металлургия. – 1985. – №4. – С. 88-90.
4. Подчерняева И.А., Панасюк А.Д., Лавренко В.А., Андриевский Р.А., Тепленко М.А., Костенко А.Д. Структура и свойства композиционных электроискровых, лазерных и магнетронных покрытий из материала AlN-TiB₂ // Порошковая металлургия. – 2001. – №9/10. – С. 69-77.
5. Подчерняева И.А., Панасюк А.Д., Лавренко В.А., Уманский А.П., Король А.А., Тимофеева И.И., Юга А.И. Электроискровое легирование конструкционных сплавов композиционным материалом на основе TiCN-AlN // Порошковая металлургия. – 2000. – №5/6. – С. 21-29.
6. Подчерняева И.А., Щепетов В.В., Панасюк А.Д., Громенко В.Ю., Юречко Д.В., Каташинский В.П. Структура и свойства износостойких детонационных покрытий на основе карбонитрида титана. // Порошковая металлургия. – 2003. – №9/10. – С. 71-77.
15. Подчерняева И.А., Панасюк А.Д., Евдокименко Ю.И., Кисель В.М., Каташинский В.П., Король А.А., Фролов Г.А., Юга А.И. Износо- и окалиностойкие покрытия на основе TiCN // Порошковая металлургия. – 2001. – №5/6. – С. 57-68.

7. Романенко В.И., Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Панич Г.Г. Повышение трибологических характеристик алюминиевых сплавов лазерным легированием // Трение и износ. – 1995. – т. 16. – № 3. – С. 555-562.
8. Зусин В.Я., Глозман Л.А., Лозовская А.В. Особенности структуры жаропрочного алюминиевого сплава, наплавленного порошковой проволокой // Автоматическая сварка. – 1991. – № 3. – С. 18-20.
9. Зусин В.Я., Редчиц В.В. Повышение плотности наплавленного металла при наплавке алюминиевых сплавов порошковой проволокой // Автоматическая сварка. – 1991. – № 5. – С. 49-50.
10. Воропай Н.М., Лесных В.В., Мишенков В.А. Комбинированный процесс дуговой сварки и наплавки неплавящимся и плавящимся электродами // Автоматическая сварка. – 1994. – № 4. – С. 56-57.
11. Воропай Н.М., Лесных В.В., Мишенков В.А. Двухдуговая наплавка алюминиевых поршней комбинированным – неплавящимся и плавящимся электродами // Автоматическая сварка. – 1996. – № 6. – С. 21-25.
12. Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л. и др. Газотермические покрытия из порошковых материалов // Киев: Наук. Думка. – 1987. – 544 с.
13. Борисов Ю.С., Рябов В.Р., Кулик В.Н., Мурашов А.П. Получение композиционного материала на алюминиевой основе газотермическим напылением // Автоматическая сварка. – 1996. – № 7 – С. 53-54.
14. Дубовицкая Н.В., Ларигов Л.Н. Влияние режимов ионно-плазменного нанесения алюминидов на структуру и твердость подложек из алюминия и дюрала // Автоматическая сварка. – 1999. – № 2. – С. 21-24.
15. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Радченко В.Г., Егоров Ф.Ф. Особенности ЭИЛ быстрорежущей стали твердыми сплавами методом ЛЕН // Порошковая металлургия. – 1987. – №3. – С. 30-36.
16. Фурсов С.П., Парамонов А.М., Добында И.В., Семенчук А.В. Источники питания для ЭИЛ // Издательство "Штиинца". – 1983. – 140 с.
17. Абрамчук А.П., Бовкун Г.А., Михайлов В.В., Ткаченко Ю.Г. Износостойкость покрытий на алюминии, полученных электроискровым

легированием порошковыми смесями // Электронная обработка материалов. – 1987. – № 3. – С. 25-29.

18. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей // М.: Машиностроение. – 1976. – 44 с.

19. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Прядко Л.Ф., Егоров Ф.Ф. Электродные материалы для электроискрового легирования // М.: Наука. – 1988. – 224 с.

20. Ляшенко Б.А. и др. Электроискровое легирование алюминиевых сплавов АЛ25 и АК4М // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 1983. вып. 8, – С. 5-6.

21. Михайлов В.В., Абрамчук А.П. Особенности электроискрового легирования алюминия и его сплавов // Электронная обработка материалов. – 1986. – № 2. – С. 36-41.

22. Михайлов В.В., Абрамчук А.П., Перетятку П.В. Электроискровое легирование некоторых легкоплавких конструкционных металлов и сплавов // Тез. докл. всесоюз. совещ. «Современные тенденции развития электрофизических методов обработки». – Ереван, 23-24 сентября 1983.

23. Мартынов Е.П. Инициирование электрического вакуумного промежутка при переносе между электродами проводящих частиц // ЖТФ, 1971. – 61. – вып. 8. – С. 1731-1757.

24. Олендзкая Н.Ф. Пробой вакуумного промежутка при переносе между электродами проводящих частиц // Радиотехника и электроника. – 1963. – 8. – №3. – С. 479-486.

25. Ткаченко Ю.Г., Парканский Н.Я., Юрченко Д.З. и др. Электроискровое формирование покрытий из порошковых смесей и их некоторые эксплуатационные свойства // Электронная обработка материалов. – 1986. – №2. – С. 36-41.

26. Царев Г.Л., Челышев А.П., Волочко А.Т. и др. Свойства горячедеформированного алюминиво-графитового сплава // Порошковая металлургия. – 1986. – №1. – С. 40-43.

27. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А. Классификация видов электроискрового легирования // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 1983. – №3. – С. 3-5.

28. Верхотуров А.Д., Рогозинская А.А., Тимофеева И.И. Формирование упрочненного слоя при электроискровом легировании сталей и титановых сплавов. – Киев: Изд-во о-ва «Знание», 1979. – 28 с.

29. Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д., Бовкун Г.А., Сычев В.С. Электроискровое легирование металлических поверхностей. – Киев: Наук. думка, 1975. – 220 с.

30. Вишневский А.Н. Исследование износостойкости деталей машин и инструментов, восстановленных и упрочненных методом электроискрового легирования (ЭИЛ) // Сборник научных трудов молодых ученых Дальневосточного региона России. Хабаровск: Хабаровский центр ДВО РИА. – 2001. – С. 5-11.

33. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Горбунов Ю.А., Егоров Ф.Ф. Выбор материала электрода и массоперенос при электроискровом легировании // Порошковая металлургия. – 1985. – №2. – С. 36-39.

31. Верхотуров А.Д. Обобщенная модель процесса электроискрового легирования // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 1983. – №1. – С. 3-6.

32. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.

34. Подчерняева И.А., Панасюк А.Д., Каташинский В.П., Тепленко М.А. Формирование, структура и свойства покрытий на основе TiB_2-AlN , полученных электроискровым и лазерным методами // Порошковая металлургия. – 2000. – №11/12. – С. 39-45.

35. Тепленко М.А., Подчерняева И.А., Панасюк А.Д. и др. Структура и износостойкость покрытий на титановом сплаве и сталях, полученных при электроискровом легировании материалом $AlN-ZrB_2$ // Порошковая металлургия. – 2002. – №3/4. – С. 48-57.

36. Ким В.А., Коротаев Д.Н., Голик А.В. Влияние условий электроискровой обработки на эрозионный процесс // Физика и химия обработки материалов. – 2001. – №1. – С. 78-81.
37. Верхотуров А.Д. Физико-химические основы процесса электроискрового легирования металлических поверхностей. – Владивосток: Дальнаука, 1992. – 176 с.
38. Верхотуров А.Д., Муха И.М. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. – Киев: Техника, 1994. – 181 с.
39. Тепленко М.А. Структурообразование композиционных градиентных покрытий с повышенной износо- и коррозионной стойкостью при электроискровом массопереносе керамики системы Al-Ti(Zr)-N-B // Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев, ИПМ НАНУ, 2003. – 23 с.
40. Подчерняева И.А., Панасюк А.Д., Тепленко М.А. и др. Триботехнические свойства тонкодисперсных покрытий при ЭИЛ материалами системы Ti-Al-N // Порошковая металлургия. – 2002. – № 11/12. – С. 49-60.
41. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Егоров Ф.Ф. Электродные материалы для электроискрового легирования. – М.: Наука, 1988. – 200 с.
42. Богомолова Н.А. Практическая металлография. – М.: Высш. Школа, 1978. – 272 с.
43. Панасюк А.Д., Кюбарсеп Я.П., Дзыкович И.Я., Вальдма Л.Э. Контактное взаимодействие карбида титана со сплавами на основе железа // Порошковая металлургия. – 1981. – №4. – С. 66-72.
44. Баринов С.М., Шевченко В.Я. Прочность технической керамики. – М.: Наука, 1996. – 159 с.
45. Evans A.G. Fracture mechanics determination // Fract. Mech. Ceram. – 1974. – V. 1. – P. 17-48.
46. Галанов Б.А., Григорьев О.Н., Мильман Ю.В. и др. Определение твердости и модуля Юнга по глубине внедрения пирамидального индентора // Проблемы прочности. – 1983. – №11. – С. 93-96.

47. Григорьев О.Н., Подчерняева И.А., Панасюк А.Д., Юречко Д.В., Варюхно В.В. Жаро- и износостойкие композиционные материалы и покрытия на основе AlN-TiB₂ // Новые огнеупоры. – 2004. – № 7. – С. 68-74.

48. Schneider S.V., Desmaison-Brut M., Gogotsi Yu.G., Desmaison J. Oxidation behavior of a hot isostatically pressed TiB₂-AlN composite // Key Eng. Mater. – 1996. – 113. – P. 49-58.

49. Пугач Э.А., Головкин Э.И., Дворина Л.А. Высокотемпературное окисление сплавов TiB₂-TiSi₂ // Порошковая металлургия. – 1977. – №2. – С. 34-37.

50. Подчерняева И.А., Юречко Д.В. Кинетика электроискрового массопереноса с использованием композиционной керамики систем AlN-Ti(Zr)B₂-Ti(Zr)Si₂ и LaB₆-ZrB₂ // Материалы Международная конференция «Электрические контакты и электроды» (ЭК - 2003), Украина/Крым/ Кацивели, 15-21 сентября 2003. – С. 158-167.

51. Юречко Д.В., Подчерняева И.А., Панасюк А.Д., Григорьев О.Н. Физико-химическая модель формирования износостойких покрытий на алюминиевых сплавах при электроискровом массопереносе композиционной керамики // Порошковая металлургия. – 2006. – №1/2. – С. 51-58.

52. Мосина Т.В., Панасюк А.Д., Григорьев О.Н., Юга А.И. Фрикционные свойства композиционных материалов систем TiN-AlN. II. Влияние оксидных пленок на процесс трения и изнашивания системы керамический материал-сталь // Порошковая металлургия. – 1996. –

53. Ткаченко Ю.Г., Варченко В.Т., Бритун В.Ф., Юрченко Д.З. Влияние состава и структуры керамики B₄C-Al₂O₃ на триботехнические характеристики при трении по стали // Порошковая металлургия. – 2005. – №5/6. – С. 49-59.

ДОДАТКИ