

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**  
**Навчально-науковий інститут матеріалознавства**  
**та зварювання імені Є.О. Патона**  
**Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки**

До захисту допущено:  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Мирослав КАРПЕЦЬ  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р

**Дипломна робота**  
**на здобуття ступеня бакалавра**  
**за освітньо-професійною програмою “Інжиніринг та комп’ютерне**  
**моделювання в матеріалознавстві”**  
**спеціальності 132 “Матеріалознавство”**  
**на тему: “Структура та властивості поверхні сталі Ст3 з**  
**електроіскровими покриттями Cr-Al та Al-Cr”**

Виконала:

здобувач ІV курсу, групи ФМ-11

Поліщук Дарина Миколаївна \_\_\_\_\_

Керівник:

доцент, к.т.н. Лобачова Галина Геннадіївна \_\_\_\_\_

Консультант з економічно-організаційного розділу

доцент, к.е.н., доцент Нараєвський С.В. \_\_\_\_\_

Консультант з питань нормоконтролю:

ст.викл. Шаповалова Н.А. \_\_\_\_\_

Рецензент:

Зав. каф. ВТМ та ПМ, член-кор. Богомол Ю.І. \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Здобувачка ВО \_\_\_\_\_

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”  
Навчально-науковий інститут матеріалознавства  
та зварювання імені Є.О. Патона  
Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 “Матеріалознавство”

Освітньо-професійна програма “Інжиніринг та комп’ютерне моделювання в матеріалознавстві”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Мирослав КАРПЕЦЬ

“    ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

### ЗАВДАННЯ

**на дипломну роботу здобувачу ВО**

**Поліщук Дарині Миколаївні**

1. Тема роботи “Структура та властивості поверхні сталі Ст3 з електроіскровими покриттями Cr-Al та Al-Cr”, керівник роботи доцент, к.т.н., Лобачова Галина Геннадіївна, затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. № 1733-с.

2. Термін подання здобувачем ВО роботи

3. Вихідні дані до роботи: літературні дані, результати переддипломної практики, результати особистих експериментів.

4. Зміст роботи: вступ; літературний огляд; матеріали та методика досліджень; експериментальна частина; економічна частина; охорона праці; висновки; список використаних джерел.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): 1 презентація (13 слайдів)

## 6. Консультанти розділів роботи\*

| Розділ                              | Прізвище, ініціали,<br>науковий ступінь, вчене<br>звання та посада<br>консультанта | Підпис, дата      |                     |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------|
|                                     |                                                                                    | завдання<br>видав | завдання<br>прийняв |
| Організаційно<br>економічна частина | Нараєвський С.В., доцент                                                           |                   |                     |
| Охорона праці                       | Левченко О.Г., зав. каф.,<br>професор                                              |                   |                     |
| Нормоконтроль                       | Шаповалова Н.А., ст.викл.                                                          |                   |                     |

7. Дата видачі завдання 19.04.2025

## Календарний план

| №<br>з/п | Назва етапів виконання<br>дипломної роботи | Термін виконання<br>етапів роботи | Примітка |
|----------|--------------------------------------------|-----------------------------------|----------|
| 1        | Видача завдання                            | 19.04.2025                        |          |
| 2        | Огляд літератури                           | 20.04.2025                        |          |
| 3        | Освоєння методик дослідження               | 02.05.2025                        |          |
| 4        | Виконання експериментальних<br>досліджень  | 11.05.2025                        |          |
| 5        | Отримання результатів, їх аналіз           | 18.05.2025                        |          |
| 6        | Оформлення дипломної роботи                | 03.06.2025                        |          |
| 7        | Попередній захист                          | 12.06.2025                        |          |
| 8        | Захист на засідання ЕК                     | 20.06.2025                        |          |

Здобувач ВО

Дарина ПОЛІЩУК

Керівник

Галина ЛОБАЧОВА

## РЕФЕРАТ

**Дипломна робота:** 66 сторінок, 10 таблиць, 23 рисунків, 36 літературних джерел.

АЛЮМІНІЙ, АНОД, ЕЛЕКТРОІСКРОВЕ ЛЕГУВАННЯ, КІНЕТИКА ФОРМУВАННЯ, КОРОЗІЙНА СТІЙКІСТЬ, МІКРОСТРУКТУРА, МІКРОТВЕРДІСТЬ, ПОКРИТТЯ, СТАЛЬ Ст3, ХРОМ

**Об'єкт досліджень:** покриття Cr-Al та Al-Cr на сталі Ст3.

**Предмет дослідження:** структурні зміни у поверхневому шарі сталі Ст3, спричинені електроіскровим легуванням хромом та алюмінієм.

**Мета роботи:** Вивчення кінетики формування, мікроструктури, мікротвердості та корозійної стійкості поверхневих шарів сталі Ст3 після електроіскрового легування у послідовності Cr-Al та Al-Cr.

**Методи дослідження:** гравіметричний, рентгеноструктурний, мікроструктурний, електронно-мікроскопічний, мікродюрOMETричний аналіз та випробування на корозійну стійкість.

**Результати дослідження та їх новизна:** Вказана можливість створення Cr-Al та Al-Cr покриттів на сталі Ст3 шляхом послідовного нанесення хрому та алюмінію під час ЕІЛ. Встановлено вплив послідовності нанесення легувальних елементів на товщину шару, мікротвердість та корозійну стійкість легованих шарів. Cr-Al-покриття товщиною (50 – 60) мкм має більшу мікротвердість (7,62 ГПа), ніж Al-Cr-покриття товщиною 30 мкм – 5,96 ГПа. Виявлено, що обидва електроіскрових покриття є стійкими до корозії, що у 3,2 рази (ЕІЛ у послідовності Al-Cr) та у 9,62 рази (ЕІЛ у послідовності Cr-Al) більше у порівнянні зі сталеву поверхню без обробки.

**Сфера застосування:** покриття Cr-Al та Al-Cr на сталі Ст3 можуть використовуватися для подовження строку служби робочих поверхонь деталей машин, ріжучого інструменту та вузлів тертя.

## ABSTRACT

Pre-diploma practice: 66 pages, 10 tables, 23 figures, 36 literary sources.

ALUMINUM, ANODE, ELECTRO-SPARK ALLOYING, FORMING KINETICS, CORROSION RESISTANCE, MICROSTRUCTURE, MICROHARDNESS, COATING, STEEL St3, CHROME

**Object of research:** Cr-Al and Al-Cr coatings on St3 steel.

**Subject of research:** structural changes in the surface layer of St3 steel caused by electro-spark alloying with chromium and aluminum.

**Purpose of the work:** Study of the formation kinetics, microstructure, microhardness and corrosion resistance of St3 surface layers steel after electrospark alloying in the Cr-Al and Al-Cr sequence.

**Research Methods:** The study carry out with gravimetric, X-ray diffraction, microstructural, electron microscopic, and microdurometric analyses, and corrosion resistance tests.

**Research results and their novelty:** It was demonstrated that it's possible to create Cr-Al and Al-Cr coatings on Steel St3 through the sequential deposition of chromium and aluminum during electric spark alloying (ESA). The study established the influence of the deposition sequence of alloying elements on the layer thickness, microhardness, and corrosion resistance of the alloyed layers. The Cr-Al coating, with a thickness of (50 – 60)  $\mu\text{m}$ , exhibited higher microhardness (7.62 GPa) compared to the Al-Cr coating, which had a thickness of 30  $\mu\text{m}$  and a microhardness of 5.96 GPa. It was found that both electric spark coatings are corrosion resistant, with the Al-Cr sequence showing 3.2 times greater resistance and the Cr-Al sequence showing 9 times greater resistance about St3 steel without coating

**Scope of application:** Cr-Al and Al-Cr coatings on St3 steel can be used to extend the service life of the working surfaces of machine parts, cutting tools and friction nodes.

## ЗМІСТ

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                                                  | 9  |
| 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД .....                                                                   | 10 |
| 1.1 Загальні відомості про метод електроіскрового легування (ЕІЛ) .....                      | 10 |
| 1.2 Значення методу ЕІЛ.....                                                                 | 10 |
| 1.3 Виникнення модифікованих шарів на сталях під час ЕІЛ .....                               | 12 |
| 1.4 Формування електроіскрових покриттів послідовним нанесенням<br>різних металів .....      | 12 |
| 1.5 Створення багатокомпонентних покриттів методом ЕІЛ .....                                 | 13 |
| 1.6 Висновки до розділу 1 .....                                                              | 14 |
| 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ .....                                                     | 15 |
| 2.1 Матеріал дослідження.....                                                                | 15 |
| 2.2 Методика експерименту .....                                                              | 16 |
| 2.3 Методика дослідження .....                                                               | 17 |
| 2.3.1 Гравіметричний аналіз .....                                                            | 17 |
| 2.3.2 Мікроструктурний аналіз.....                                                           | 18 |
| 2.3.3 МікродюрOMETричний аналіз.....                                                         | 19 |
| 2.3.4 Рентгеноструктурний аналіз .....                                                       | 21 |
| 2.3.5 Електронномікроскопічний аналіз.....                                                   | 22 |
| 2.3.6 Випробування на корозійну стійкість.....                                               | 22 |
| 2.4 Висновки до розділу 2.....                                                               | 24 |
| 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА .....                                                             | 25 |
| 3.1 Формування електроіскрового покриття на поверхні сталі Ст3 в<br>послідовності Cr-Al..... | 25 |
| 3.2 Формування електроіскрового покриття на поверхні сталі Ст3 в<br>послідовності Al-Cr..... | 27 |
| 3.3 Рентгеноструктурний аналіз легованої поверхні сталі Ст3 .....                            | 29 |
| 3.4 Корозійна стійкість електроіскрових покриттів на сталі Ст3 .....                         | 32 |
| 3.5 Висновки до розділу 3 .....                                                              | 36 |
| 4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....                                                     | 37 |
| 4.1 Науково-технічна актуальність НДР .....                                                  | 37 |
| 4.2 Мета і завдання НДР .....                                                                | 37 |
| 4.3 Розрахунок планової собівартості проведення дослідження .....                            | 38 |

|       |                                                                                               |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3.1 | Визначення заробітної плати науково-дослідницького персоналу                                  | 39 |
| 4.3.2 | Визначення розміру єдиного соціального внеску .....                                           | 42 |
| 4.3.3 | Визначення вартості матеріалів для виконання НДР .....                                        | 42 |
| 4.3.4 | Інші прямі невраховані витрати .....                                                          | 43 |
| 4.3.5 | Розрахунок накладних витрат .....                                                             | 43 |
| 4.3.6 | Розробка планової калькуляції собівартості НДР .....                                          | 43 |
| 4.4   | Визначення очікуваних результатів НДР та розрахунок показників економічної ефективності ..... | 44 |
| 4.5   | Висновки до розділу 4 .....                                                                   | 47 |
| 5     | ОХОРОНА ПРАЦІ .....                                                                           | 48 |
| 5.1   | Аналіз роботи в приміщенні .....                                                              | 48 |
| 5.2   | Аналіз шуму та вібрації .....                                                                 | 51 |
| 5.3   | Інженерні рішення .....                                                                       | 52 |
| 5.3.1 | Освітлення .....                                                                              | 52 |
| 5.3.2 | Аналіз штучного освітлення .....                                                              | 53 |
| 5.3.3 | Електробезпека .....                                                                          | 54 |
| 5.3.4 | Вентиляція приміщення лабораторії .....                                                       | 56 |
| 5.4   | Пожежна безпека .....                                                                         | 57 |
| 5.5   | Висновки до розділу 5 .....                                                                   | 59 |
|       | ВИСНОВКИ .....                                                                                | 60 |
|       | CONCLUSIONS .....                                                                             | 61 |
|       | СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....                                                          | 62 |

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕІЛ — електроіскрове легування

$T_{\text{пл}}$  — температура плавлення

$T_{\text{кип}}$  — температура кипіння

$\lambda$  — коефіцієнта теплопровідності

ЛШ – легований шар

## ВСТУП

Одним з ефективних методів покращення властивостей сталевих поверхонь є електроіскрове легування (ЕІЛ). Суть цього процесу полягає в тому, що на поверхню деталі (катод), за допомогою короткочасних електричних розрядів, наносять легувальний матеріал (анод). В результаті чого утворюється міцне зносостійке покриття без нагріву основної частини деталі.

Для проведення ЕІЛ можна використати будь-які електропровідні матеріали, зокрема, хром (Cr) та алюміній (Al). ЕІЛ дозволяє покращити такі властивості оброблюваного матеріалу як зносостійкість, твердість, корозійна стійкість, жаростійкість та інші. Такі зміни властивостей поверхні сталі можливі завдяки структурно-фазовим перетворенням, що відбуваються при перемішуванні матеріалів аноду та катоду під впливом іскрових розрядів.

Переваги методу ЕІЛ: висока адгезія покриттів, локальність нанесення покриття, мінімальне термічне навантаження на деталь, екологічна безпека, економічна вигідність, простота здійснення технологічних операцій та малогабаритність обладнання.

Найчастіше ЕІЛ здійснюють твердосплавними анодами, які мають незначну ерозію при дії низьковольтних розрядів. В цьому сенсі достатньо вдалим є нанесення покриттів послідовним легуванням чистими металами в межах одного технологічного процесу. Даний спосіб обробки, окрім більшої ерозії металів анодів у порівнянні з твердосплавами, не потребує додаткових витрат матеріалів та часу на розробки і виготовлення компактованих легувальних електродів, що значно покращує фізико-механічні характеристики оброблюваної поверхні.

## **1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД**

### **1.1 Загальні відомості про метод електроіскрового легування (ЕІЛ)**

Вперше метод електроіскрового легування був запатентований у 50-х роках ХХ століття вченими Лазаренко Б.Р та Лазаренко Н.І. Суть методу базувалась на перенесенні матеріалу електрода(анода) на поверхню оброблюваної деталі (катода) за допомогою контрольованих електричних розрядів [1].

Імпульсне нанесення електричних розрядів дозволяє створювати міцний зчеплений поверхневий шар, в зоні якого відбувається змішування частинок катода та анода [2].

В процесі ЕІЛ виникає взаємодія аноду з катодом, а також взаємодія з компонентами міжелектродного середовища, в якому проводиться обробка. Це дає можливість для виникнення поверхневих шарів оброблених виробів з новим хімічним та фазовим складом, які визначають їх нові експлуатаційні характеристики [3 – 5].

Під час ЕІЛ металічних поверхонь надійний результат залежить від таких чинників як: інтенсивність процесу, величина енергії, яка виділяється в міжелектродному проміжку, частота надходжень імпульсів, матеріал легувального анода та оброблюваний матеріал [1, 2].

### **1.2 Значення методу ЕІЛ**

Значення методу ЕІЛ полягає в тому, що під впливом імпульсних та механічних навантажень відбувається руйнування легувального електрода, його часткове масоперенесення на оброблювану поверхню [6].

В той же час на поверхні катода відбуваються термодинамічні, дифузійні та мікрометалургійні процеси, які викликають змішування

частинок електродів при взаємодії з компонентами середовища, що сприяє виникненню високої адгезії між легованим шаром та основою [4].

ЕІЛ змінює механічні, електричні, термічні та інші властивості оброблюваних поверхонь, за рахунок зміни їх структури. Завдяки цьому відбувається підвищення міцності, твердості, зносостійкості та ін.[7].

На рисунку 1.1 показана загальна схема процесу ЕІЛ.

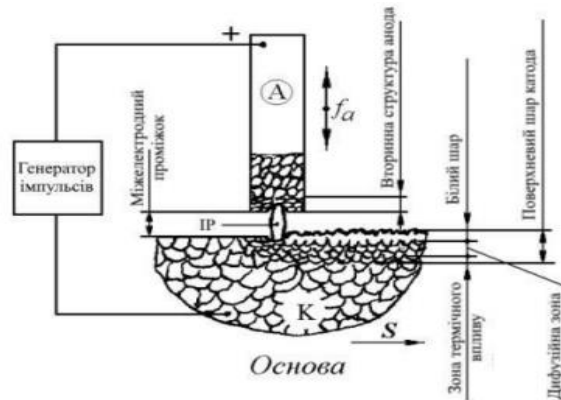


Рисунок 1.1 – Загальна схема процесу ЕІЛ [3]

Електроди (анод А та катод К, відповідно до рис. 1.1) наближаються один до одного, напруження електричного поля збільшується і виникає іскровий електричний розряд (ІР) при досягненні потрібної відстані. Виникнення електричного руйнування на поверхні катода з'являється внаслідок виникнення і розширення осередків плавлення та випаровування від ІР [3].

Ряд електронів веде до ерозії анода, як результат виділення значної кількості енергії на поверхню цього ж анода. Частинки матеріалу, що відриваються, осідають на розплавленій поверхні катода і проникають у глибину основного матеріалу, змінюючи зовнішню зону катода [4].

Отже, на катоді виникає змінений шар з новими властивостями та структурою. Застосування різних анодів дає змогу керувати процесом ЕІЛ шляхом регулювання параметрів імпульсних розрядів. Як наслідок, формуються поверхневі шари з потрібними характеристиками, які можна заздалегідь спрогнозувати [7, 8].

### **1.3 Виникнення модифікованих шарів на сталях під час ЕІЛ**

Для покращення фізичних та механічних властивостей на робочих поверхнях деталей використовують метод нанесення захисних та зміцнюючих покриттів. Метод ЕІЛ дає змогу отримувати покриття на металевих виробах за допомогою різних електропровідних матеріалів [9, 10].

Зміни у механічних, фізичних та хімічних властивостях відбуваються завдяки імпульсному розряду. Змінюються також розмір та поверхня деталі. Відбуваються фазові перетворення та виникають мікрокристалічні структури, як результат – твердість поверхні збільшується [9, 10].

Якість і товщина шару, нанесеного електроіскровим легуванням (ЕІЛ), безпосередньо залежать від енергії розряду. Для досягнення кращих результатів часто використовують кілька анодів та спеціальне легувальне середовище.

Дослідження підтверджують, що середовище, матеріал аноду впливають на формування, структуру, фазовий склад, мікротвердість та зносостійкість зміненого шару [11].

### **1.4 Формування електроіскрових покриттів послідовним нанесенням різних металів**

Для того, щоб забезпечити більш точний та контрольований вплив кожного легуючого елемента на структуру та властивості матеріалу, а також мінімізувати небажані ефекти, які можуть виникати при одночасному введенні всіх компонентів застосовують методику постадійного легування. Це технологічний процес, при якому легуючі елементи наносяться на основний матеріал не одночасно, а послідовно, на різних етапах технологічного процесу [3, 12 – 21].

Метод послідовного нанесення застосовують через те, що деякі елементи можуть реагувати між собою або розплавом з небажаними

наслідками (можуть утворюватись крихкі фази, оксиди або ж обрані матеріали мають низьку розчинність). Порядок нанесення легуючих елементів може мати вплив на фазовий склад, розмір зерна, можуть утворюватись градієнтні структури, де концентрація елемента буде змінюватись по глибині.

### **1.5 Створення багатокомпонентних покриттів методом ЕІЛ**

Зазвичай в якості електродів для ЕІЛ застосовуються компактовані аноди, які мають незначну ерозію через свою тугоплавкість, ніж чисті метали, що призводить до зниження ефективності формування покриттів. Як альтернативний, конкурентоспроможний спосіб можна розглядати послідовне нанесення декількох металів високої чистоти. В такому разі, інтенсивна взаємодія нанесених матеріалів під час ЕІЛ дозволяє утворити тверді багатокомпонентні розчини, а самі створені покриття будуть багатофункціональними [3]. Відомості про такий спосіб обробки обмежені.

Вплив послідовності нанесення Cr, C, Al в процесі електроіскрового легування на структуру та властивості поверхневих шарів сталі ХВГ вивчався в роботі [12].

В роботі [13] в якості легувальних електродів використовували Ti, Al, C, які наносили послідовно. В залежності від порядку нанесення змінювалася поверхнева мікротвердість легованих шарів.

Покращання фізико-механічних властивостей поверхні сплавів заліза можна досягти створенням багатокомпонентних електроіскрових покриттів, застосовуючи як легувальні електроди перехідні метали [14].

Зміцнення поверхні сталі Ст3 вдалося досягнути послідовним ЕІЛ міддю та хромом [15] до того ж, крім послідовності нанесення суттєвим був вплив міжелектродного середовища.

Автори роботи [16] досліджували утворення функціональних зміцнених та зносостійких покриттів на сталі 45, одержаних пошаровим

нанесенням під час ЕІЛ хрому, алюмінію, нікелю та графіту.

Створення подвійних зміцнюючих покриттів шляхом багаторазового ЕІЛ розглянуто у роботі [17], де послідовно наносили алюміній та графіт, а також у роботі [18], де послідовно наносили хром та нікель на поверхню сталі Ст3.

В роботі [19] розглянута ефективність нанесення хрому та алюмінію на сталь марки ХВГ. Окрім того, обґрунтовано вибір легувальних електродів з даних матеріалів ще й з економічної точки зору.

Створення алюмінієвих покриттів на поверхні деталей з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т насосного обладнання для АЕС методом ЕІЛ запатентовано авторами роботи [20].

Ефективність нанесення Al-покриття доведена і в роботі [21], де для процесу ЕІЛ поверхні сталі 20 застосовано анод з алюмінієвого дроту марки СвА99 при корегуванні електричних параметрів обробки.

## **1.6 Висновки до розділу 1**

На основі аналізу літературних даних, можна стверджувати, що електроіскрове легування (ЕІЛ) є дуже актуальним методом для підвищення експлуатаційних характеристик низьковуглецевих сталей. Застосування цієї технології дозволяє створювати на поверхні таких матеріалів зміцнені та зносостійкі покриття, що у свою чергу, збільшує працездатність деталей, і зменшує потребу у використанні дорожчих високолегованих сталей для виробництва аналогічних виробів, що веде до значної економії матеріалів.

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Матеріал дослідження

Для проведення дослідження було обрано низьковуглецеву сталь Ст3 завдяки її легкій зварюваності з іншими матеріалами в процесі ЕІЛ.

Хімічний склад сталі Ст3 наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад сталі Ст3 [22]

| C             | Si            | Mn            | P     | S     | Ni    | Cr    | N      |
|---------------|---------------|---------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 0,14-<br>0,22 | 0,15-<br>0,30 | 0,40-<br>0,65 | ≤0,04 | ≤0,05 | ≤0,03 | ≤0,03 | ≤0,010 |

Зразки для дослідження мали циліндричну форму діаметром 8 мм та висотою 7 мм (рис. 2.1)



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд поверхні вихідного зразка сталі Ст3

Підготовка зразків до ЕІЛ здійснювалась шліфуванням поверхні сталі на шліфувальному папері з зерном Р600.

## 2.2 Методика експерименту

Для проведення ЕІЛ була використана установка “ЕЛІТРОН-26А”. Складовими частинами цього приладу являються: корпус, електродотримач для закріплення аноду. Зовнішній вигляд показано на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 — Загальний вигляд установки “ЕЛІТРОН– 26А”

Принцип роботи установки “ЕЛІТРОН–26А” полягає в тому, що конденсатори генератора заряджаються, накопичують електричну енергію. Електродотримач (анод) при наближенні до поверхні зразка (катода) утворює електричний пробій повітряного простору. Накопичена енергія вивільняється у вигляді електроіскрового розряду. У місці цього розряду утворюється плазмовий канал, який розплавляє матеріал з анода та катода. Частинки матеріалу анода зливаються з поверхнею деталі. З декілька мікросекунд відбувається миттєве охолодження розплавленої мікрозони, тим самим на поверхні деталі утворюється леговане покриття [8].

ЕІЛ зразків зі сталі Ст3 являв собою послідовне нанесення хрому та алюмінію за двома схемами: Cr-Al та Al-Cr.

Для проведення ЕІЛ був використаний режим:  $I = 1.5 \text{ А}$ ;  $U = 60 - 70 \text{ В}$ ;  $\nu = 50 \text{ Гц}$ .

Загальний час легування становив 6 хвилин для кожного зразка (ЕІЛ хромом проводилось 3 хвилини, ЕІЛ алюмінієм – 3 хвилини).

## 2.3 Методика дослідження

### 2.3.1 Гравіметричний аналіз

Для опису кінетики формування покриттів під час ЕІЛ використовувався гравіметричний аналіз [1], який передбачає вимірювання маси досліджуваного матеріалу та електродів (хром, алюміній) до проведення обробки та після кожної стадії обробки окремим анодом.

Для зважування зразків сталі Ст3 та легуючих елементів були використані лабораторні електронні ваги «AXIS AD50» (рис.2.3). Похибка вимірювання складає 0,0005 г.



Рисунок 2.3 — Електронні лабораторні ваги «AXIS AD50»

За результатами вимірювань маси розраховані дані та побудовані графіки залежності сумарного приросту катоду та ерозії обох анодів.

Приріст маси катоду ( $\Delta m_k$ ) та ерозії анодів ( $\Delta m_a$ ) проводили за формулами:

$$\Delta m_k = m_k(t_n) - m_k(t_{n-1}), \quad (2.1)$$

$$\Delta m_a = m_a(t_n) - m_a(t_{n-1}), \quad (2.2)$$

де  $t_n$  – час n-го вимірювання маси;

$t_{n-1}$  – час попереднього вимірювання маси.

### 2.3.2 Мікроструктурний аналіз

Поперечні шліфи зразків сталі Ст3 з нанесеними покриттями були створені відрізним колом. На спеціальній установці «Simplimet 1000» вони були запресовані у бокеліт (термореактивну смолу), що забезпечило надійну фіксацію.

Шліфування здійснено на верстаті «Buehler Vector» з поступовим зменшенням розміру абразивних часток для досягнення гладкої поверхні.

Полірування шліфів проводилося на пасті на основі оксиду хрому III, а далі – на воді.

Для виявлення структури шліфів використано травник (5 % розчин азотної кислоти в етиловому спирті).

Мікроструктурний аналіз проведено на сучасному металографічному тринокулярному мікроскопі «iScope IS.1053-PLMi» [23] з цифровою камерою для фотографування поверхневих зон досліджуваних зразків сталі Ст3 з нанесеними покриттями (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Металографічний тринокулярний мікроскоп  
«iScore IS.1053-PLMi» [23]

### 2.3.3 МікродюрOMETричний аналіз

Мікротвердість шліфів вимірювалась за допомогою приладу ПМТ-3М (рис. 2.5). Вимірювання здійснювалось методом тиску стандартної алмазної піраміди з квадратною основою та двограним кутом при вершині  $136^\circ$  при навантаженні 50 г протягом 8-10 секунд [24, 25].

Мікротвердість у ГПа була визначена за величиною діагоналі за табличними даними приладу. Для розрахунку значення мікротвердості була використана така формула:

$$H_\mu = 1854 \times P \div (d_{\text{сеп}} \times 0,3), \quad (2.3)$$

де  $H_\mu$  - значення мікротвердості;

$P$  - навантаження на індентор (точність визначення маси гирі вагою 20 г складає  $\pm 0,1$  мг);

$d_{\text{сеп}}$  - середнє значення довжини діагоналі, яке розраховується за формулою :

$$d_{\text{сеп}} = (d_{i1} + d_{i2}) \div 2, \quad (2.4)$$

де  $d_{i1}$ ,  $d_{i2}$  - відповідно довжини діагоналей чотирьохкутного відбитка, мкм.



Рисунок 2.5 – Вигляд ззовні приладу ПМТ-3

Найбільша основна похибка окуляр-мікрометра на всьому діапазоні вимірювань складає  $\pm 2$  мкм у відповідності з паспортом. Похибка вимірювання середнього значення довжини діагоналей відбитка визначається за формулами:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{\text{ср}} - (d_{i1} + d_{i2})/2)^2}{n-1}}, \quad (2.5)$$

де  $n$  – кількість вимірювань, таким чином значення мікротвердості визначається за формулою:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2.6)$$

$$H_\mu = \frac{1,854 \cdot P}{(d_{\text{ср}} \pm \sigma_0)^2}, \quad (2.7)$$

де  $\sigma_0$  – довірчий інтервал.

Відносна похибка вимірювання  $\delta H_\mu$  визначається :

$$\delta H_{\mu} = \left| \frac{H_{\mu}(d_{cp}) - H_{\mu}(d_{cp} \pm \sigma_0)}{H_{\mu}(d_{cp})} \right| \times 100\% \quad (2.8)$$

Абсолютна похибка:

$$\Delta H_{\mu} = H_{\mu}(d_{cp}) - H_{\mu}(d_{cp} \pm \sigma_0). \quad (2.9)$$

### 2.3.4 Рентгеноструктурний аналіз

Рентгеноструктурний аналіз сталі Ст3 після електроіскрового легування у послідовності Cr-Al та Al-Cr було проведено за допомогою рентгенівського дифрактометра «Rigaku Ultima IV» [26]. Завдяки такому методу можна визначити період ґратки, досконалість кристалічної структури, якісний фазовий аналіз покриттів та розмір кристалітів. Для зйомки використовували мідне монохроматизоване випромінювання. Рентгеноструктурний аналіз проводили за таких електричних параметрів: напруга – 30 кВ; сила струму – 30 мА.

Зовнішній вид рентгенівського дифрактометра «Rigaku Ultima IV» показано на рисунку 2.6



Рисунок 2.6 – Загальний вид рентгенівського дифрактометра Rigaku Ultima-IV [23, 26]

### 2.3.5 Електронномікроскопічний аналіз

Аналіз структури та поверхневих модифікованих шарів, утворених внаслідок ЕІЛ, виконувався за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ-106И [23] (рис. 2.7)

Візуалізація топографії поверхні об'єктів здійснювалася за допомогою відбитих електронів. Електронний зонд діаметром (2-5) нм послідовно сканував поверхню досліджуваного зразка. Растровий електронний мікроскоп забезпечував роздільну здатність (3–5) нм. При зйомці поверхні прискорююча напруга була встановлена на рівні 200 кеВ, а збільшення мікроскопа коливалося від 2500 до 3000 разів.



Рисунок 2.7 – Загальний вид растрового електронного мікроскопа [23]

### 2.3.6 Випробування на корозійну стійкість

Випробування зразків на корозійну стійкість проводилось в агресивному середовищі водного розчину морської солі (10 %) протягом 480 годин.

Процедура підготовки зразків включала їх промивання, знежирення, повітряне сушіння та зважування перед розміщенням у скляних посудинах для випробування за кімнатної температури.

Щоб забезпечити точність експерименту, корозії піддавалися лише по одній грані кожного із зразків, рівнозначні за площею (як з покриттями, так і нелегованої сталі), тоді як інші сторони були ізольовані силіконом. Кородуюча площа складала  $0,5 \text{ см}^2$ .

Після тестування, продукти корозії знімалися, а зразки повторно зважувалися.

Ступінь корозійного руйнування зразків оцінювали якісно та кількісно.

Якісна оцінка передбачала візуальний огляд та фотографування поверхонь до та після корозійного випробування.

Кількісна оцінка надавалася за розрахунками масового показника корозії та швидкості корозії [27].

Масовий показник корозії  $K_m, \text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{год})$ , знаходили за формулою:

$$K_m = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau}, \quad (2.10)$$

де  $\Delta m$ - втрата маси зразка при випробуванні, г;

$S$  - загальна площа поверхні зразка,  $\text{см}^2$ ;

Швидкість корозії,  $\text{мм}/\text{рік}$ , знаходили згідно формули:

$$v_{\text{кор}} = 8,76 \cdot \frac{K_m}{\rho}, \quad (2.11)$$

де  $\rho$  - густина,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;

$K_m$  - швидкість корозії,  $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{год})$ .

Провівши розрахунки  $v_{\text{кор}}$  для кожного досліджуваного зразка можна дізнатися, до якої групи відносяться покриття за своєю корозійною стійкістю згідно п'ятибальної шкали Національної асоціації інженерів-корозіоністів (NACE International), зазначені у таблиці 2.2 [27].

Таблиця 2.2 - П'ятибальна шкала корозійної стійкості [27]

| Бал | Швидкість корозії,<br>мм/рік | Група стійкості    |
|-----|------------------------------|--------------------|
| 1   | < 0,1                        | Дуже стійкі        |
| 2   | 0,1 – 1,0                    | Стійкі             |
| 3   | 1,1 – 3,0                    | Зниженої стійкості |
| 4   | 3,1 – 10,0                   | Малостійкі         |
| 5   | > 10,1                       | Нестійкі           |

## 2.4 Висновки до розділу 2

Обґрунтовано вибір матеріалів для обробки та матеріалів анодів.

Обрані оптимальні параметри для послідовного нанесення Cr та Al під час електроіскрового легування сталі Ст3.

Застосована комплексна методика для дослідження поверхні сталі після легування, а саме: гравіметричний, рентгеноструктурний, мікроструктурний, електронномікроскопічний, мікродюрOMETричний аналіз та випробовування на корозійну стійкість.

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Для досягнення мети в роботі було проведено електроіскрове легування сталі Ст3 на повітрі з почерговим нанесенням хрому та алюмінію у різній послідовності за схемами: Cr-Al, Al-Cr.

#### 3.1 Формування електроіскрового покриття на поверхні сталі Ст3 в послідовності Cr-Al

Електроіскрове легування сталі Ст3 відбувалося в послідовності Cr-Al протягом 3-х хвилин кожним з анодів.

Кінетику формування покриттів вивчали за допомогою гравіметричного аналізу з подальшою побудовою графіків залежності приросту маси катоду та ерозії анодів від тривалості обробки (рис. 3.1). За даними гравіметричного аналізу під час проведення послідовного електроіскрового легування за схемою Cr-Al маса обох анодів зменшується.

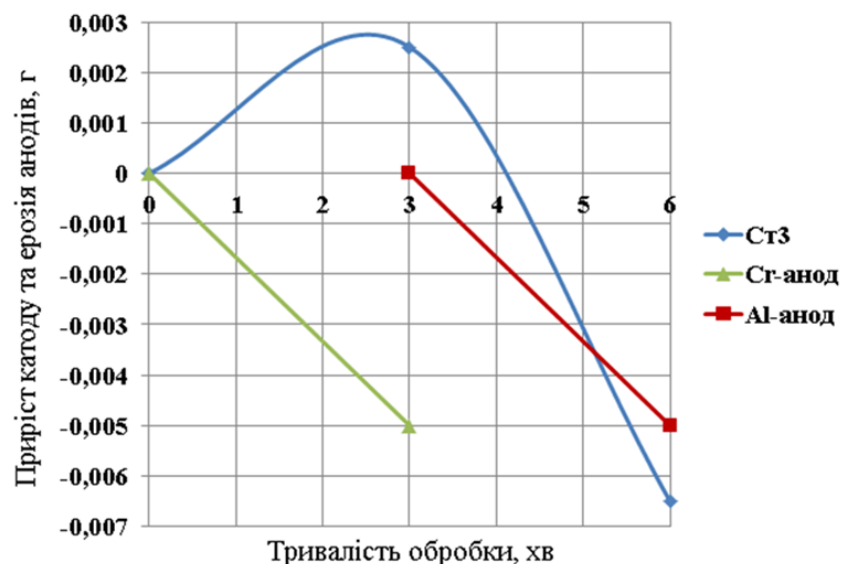


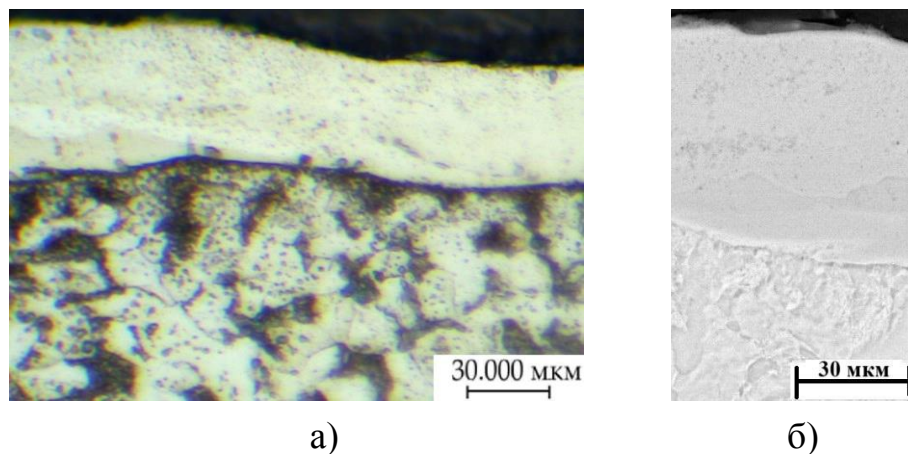
Рисунок 3.1 – Кінетичні криві масоперенесення в процесі ЕІЛ сталі Ст3 у послідовності Cr-Al

Як видно, крива приросту маси катоду під час нанесення хрому зростає, що свідчить про ефективність формування легованого шару. Це

можна пояснити взаємною необмеженою розчинністю хрому та заліза через подібність їхніх кристалічних ґраток. Внаслідок цього на поверхні досліджуваного зразка утворюється твердий розчин на основі металів обох електродів.

Під час нанесення алюмінію крива приросту маси катоду спадає, переходячи у від'ємну область системи координат. Але при цьому покриття продовжує формуватися, вплавляючись у поверхню з Fe-Cr твердим розчином, що сформувався на першій стадії процесу ЕІЛ.

За результатами мікроструктурного аналізу сталі Ст3 після ЕІЛ за схемою Cr-Al показали наявність легованого шару товщиною від (50 – 60) мкм (рис. 3.2)



а) фотографія з оптичного мікроскопу; б) фотографія з растрового мікроскопу

Рисунок 3.2 – Мікроструктура поверхневого шару сталі Ст3 після ЕІЛ в послідовності Cr-Al

На фотографії мікроструктури можна чітко розгледіти межі між легованим шаром та основним матеріалом. Легований шар має рівномірну товщину по всій площі зразка, з вираженим перехідним прошарком (зона термічного впливу), який розділяє легований шар та основу. Структура легованого шару має однорідну структуру та щільно прилягає до основного матеріалу. Тріщин, пор або місць розшарування не виявлено. Глибина зони термічного впливу складає 20 мкм і характеризується структурою з дрібними

зернами.

Мікротвердість покриття від поверхні вглиб спадає від 7,62 ГПа до 4,7 ГПа; у ЗТВ - від 4,48 ГПа до 2,9 ГПа (рис.3.3). Мікротвердість основи становить 1,5 ГПа.

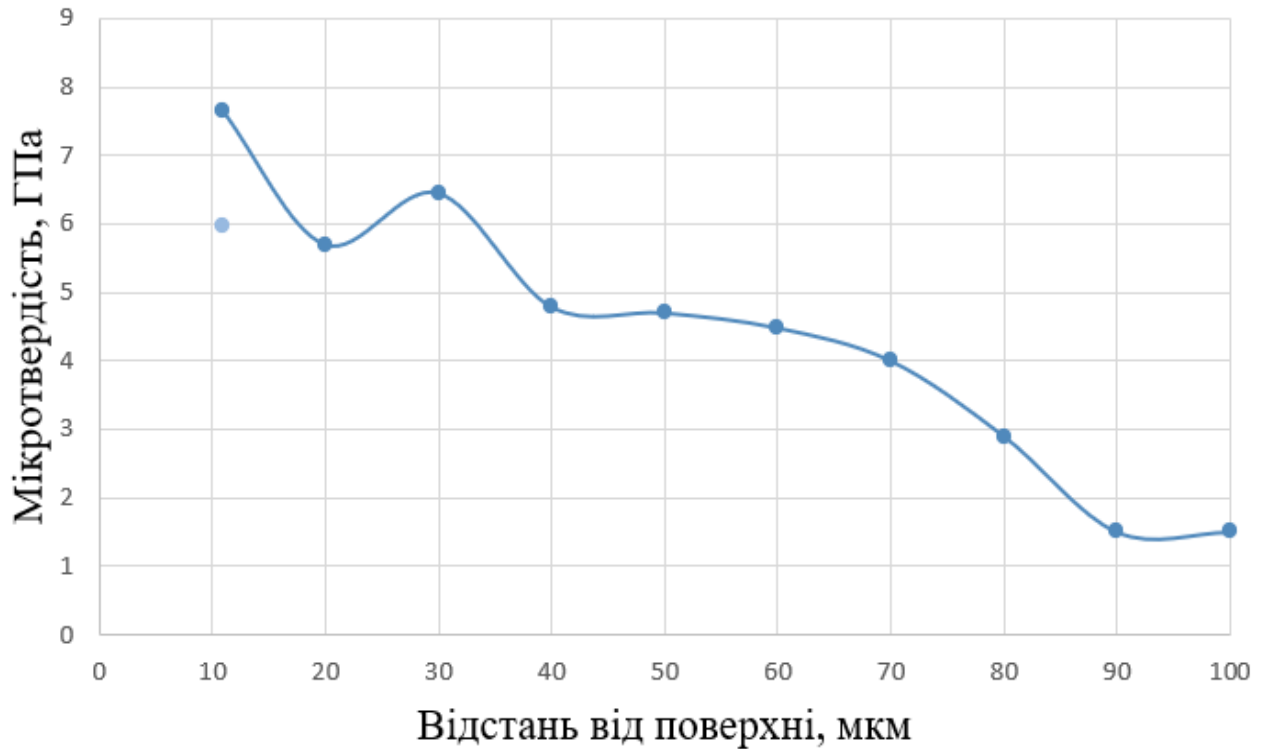


Рисунок 3.3 – Розподіл мікротвердості в поверхневому шарі сталі Ст3 після ЕІЛ в послідовності Cr-Al

### 3.2 Формування електроіскрового покриття на поверхні сталі Ст3 в послідовності Al-Cr

Гравіметричний аналіз в процесі послідовного ЕІЛ за схемою Al-Cr показав, що алюмінієвий та хромовий аноди зазнають ерозії протягом всього часу обробки, а, отже, їх маса зменшується (рис. 3.4). До того ж маса Cr-аноду зменшується більш інтенсивно в порівнянні з Al-анодом про що свідчить збільшений кут нахилу кривої ерозії.

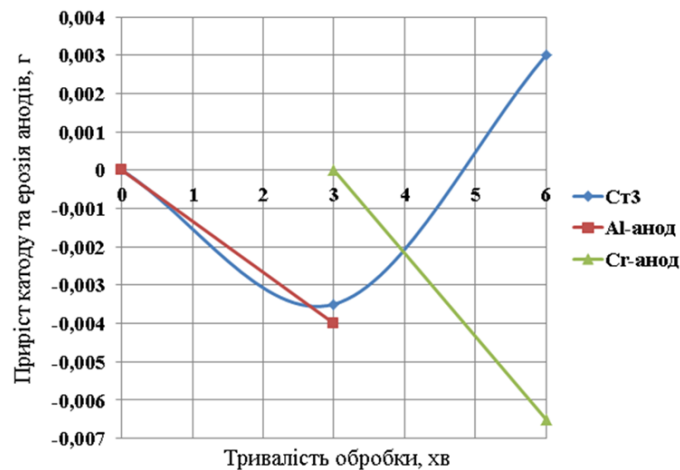
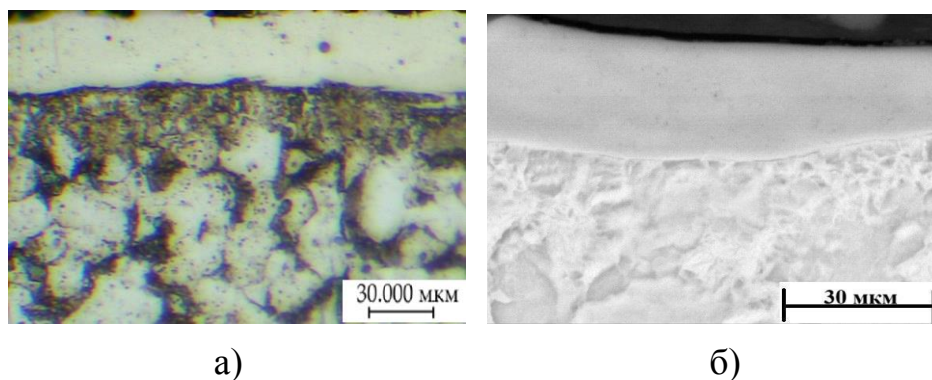


Рисунок 3.4 – Кінетичні криві масоперенесення в процесі ЕІЛ сталі Ст3 у послідовності Al-Cr

Крива приросту маси катоду на першому етапі ЕІЛ знаходиться у від'ємній області побудови графіку і лише на Другому етапі (під час нанесення хрому) переходить у додатну область. При цьому формується покриття, вплавляючись у сталеву поверхню з нанесеним шаром алюмінію.

Мікроструктурний аналіз сталі Ст3 після електроіскрового легування за схемою Al-Cr показує, що виник легований шар товщиною до 30 мкм (рис.3.5).



а) фотографія з оптичного мікроскопу; б) фотографія з растрового мікроскопу  
Рисунок 3.5 – Мікроструктура поверхневого шару сталі Ст3 після ЕІЛ в послідовності Al-Cr

На мікроструктурі чітко спостерігається легований шар, перехідна зона та основа. Структура легovanого шару відносно однорідна. Перехідний шар

не має видимих дефектів та щільно поєднує легований шар та основу. Протяжність підшару співрозмірна з товщиною покриття і складає 30 мкм. На фото мікроструктури ЗТВ виявляється дрібнозернистою та темнотравленою.

МікродюрOMETричним аналізом встановлено, мікротвердість у покритті знаходиться у межах (4,79 – 5,3) ГПа та має підйом до 6 ГПа на відстані 20 мкм від поверхні (рис.3.6)

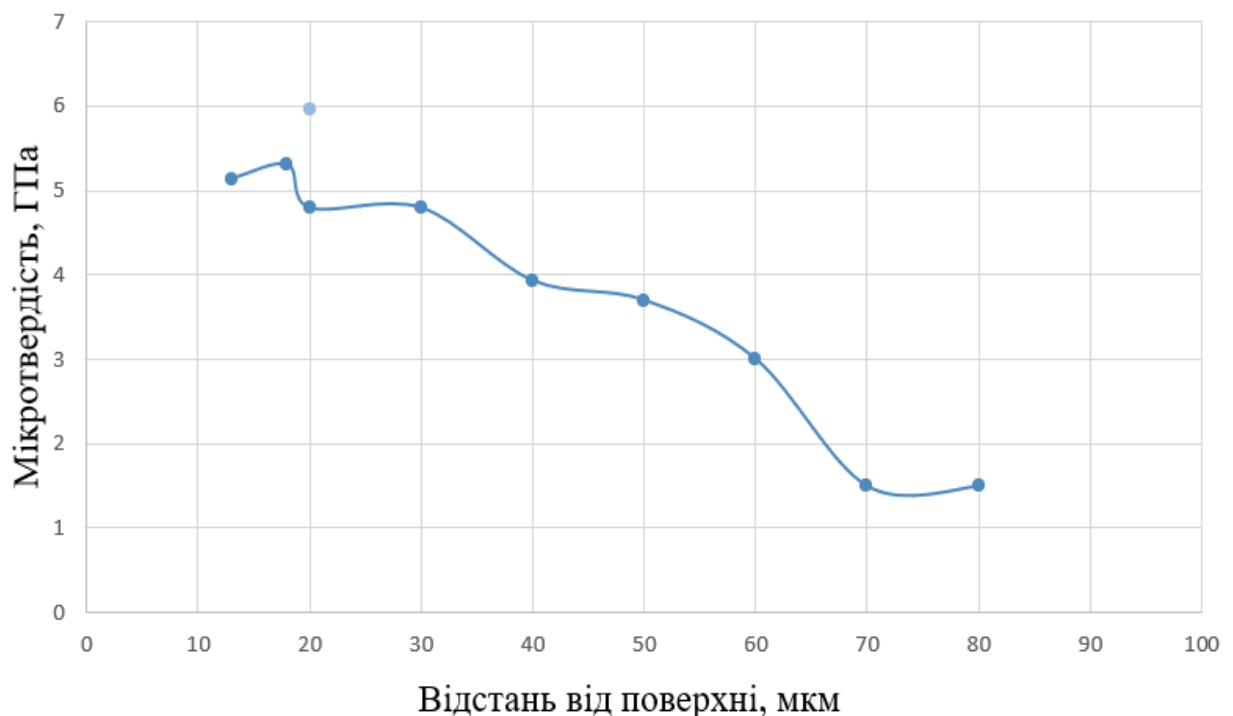


Рисунок 3.6 – Розподіл мікротвердості в поверхневому шарі сталі Ст3 після ЕІЛ в послідовності Al-Cr

### 3.3 Рентгеноструктурний аналіз легованої поверхні сталі Ст3

Фазовий склад та параметри тонкої структури покриттів після двостадійних процесів електроіскрового легування були досліджені за допомогою рентгеноструктурного аналізу. Результати для зразка з покриттям Cr-Al показано на рисунку 3.7 та таблиці 3.1.

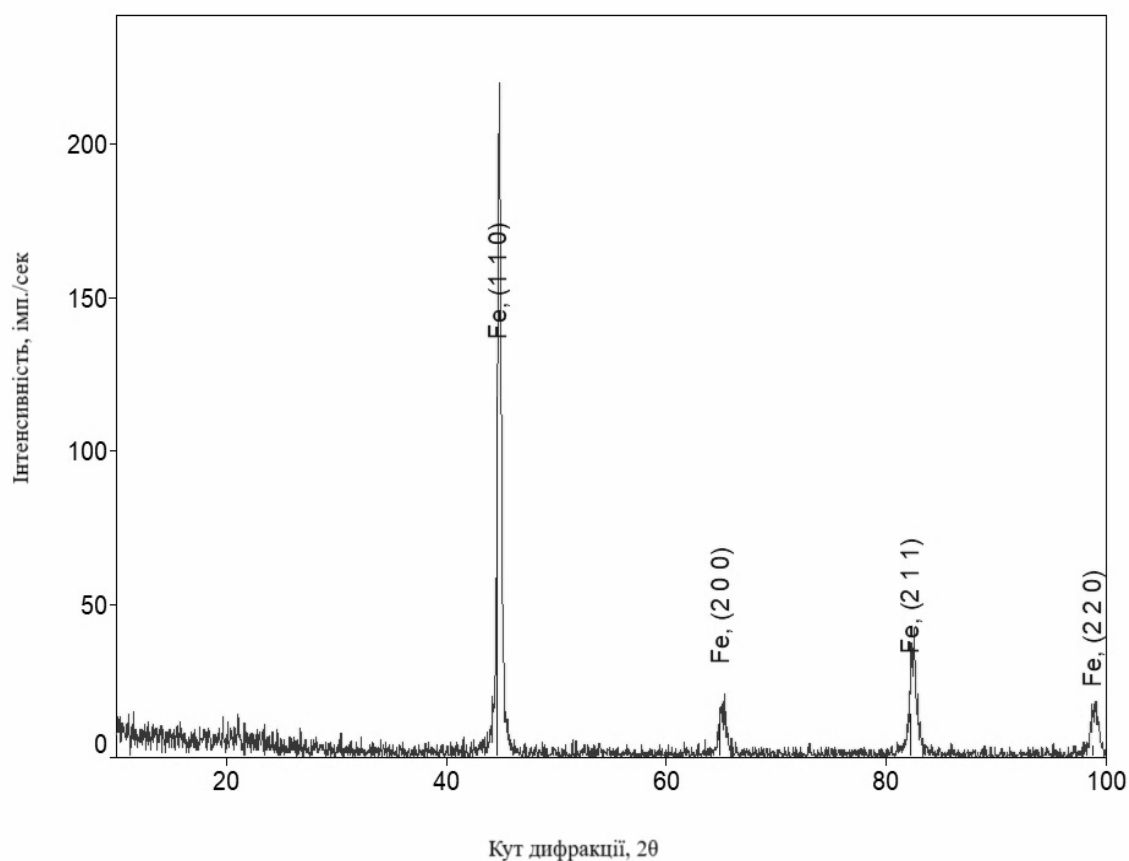


Рисунок 3.7 – Дифрактограма зразка сталі Ст3 після ЕІЛ з послідовністю Cr-Al

Таблиця 3.1 – Фазовий склад зразка сталі Ст3 після ЕІЛ з послідовністю Cr-Al

| № | Кут відбиття, град | Міжплощинна відстань, Å | Фаза               |
|---|--------------------|-------------------------|--------------------|
| 1 | 44,71              | 2,0250                  | $\alpha$ -Fe (110) |
| 2 | 65,00              | 1,4337                  | $\alpha$ -Fe (200) |
| 3 | 82,32              | 1,1703                  | $\alpha$ -Fe (211) |
| 4 | 98,91              | 1,0137                  | $\alpha$ -Fe (220) |

Результати рентгеноструктурного аналізу для зразка з покриттям Al-Cr показано на рисунку 3.8 та таблиці 3.2.

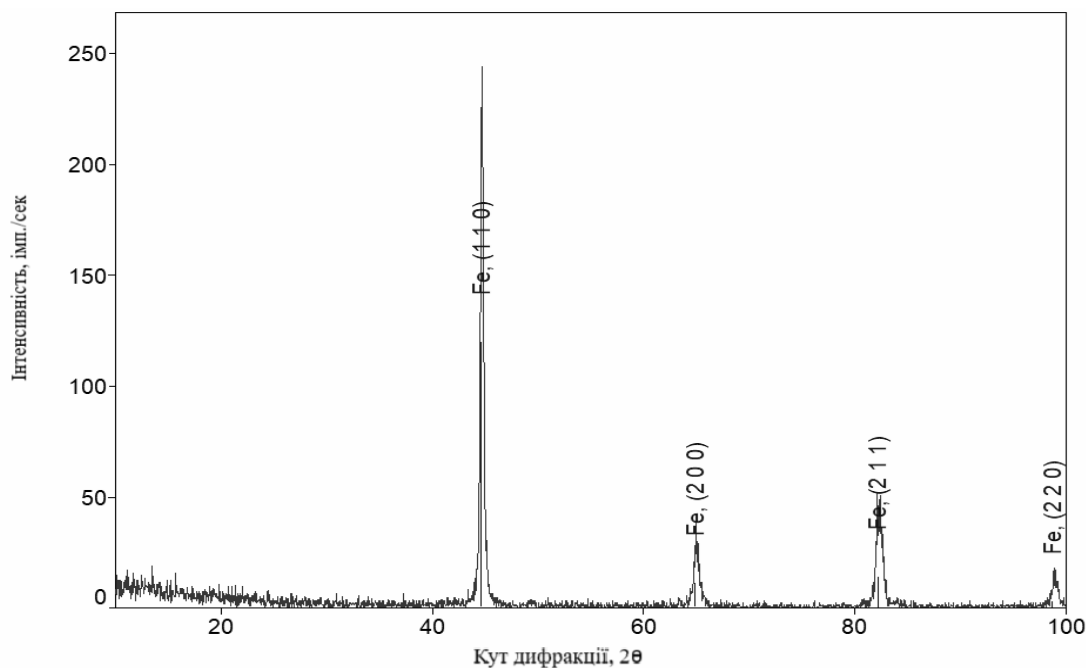


Рисунок 3.8 – Дифрактограма зразка сталі Ст3 після ЕІЛ з послідовністю Al-Cr

Таблиця 3.2 – Фазовий склад зразка сталі Ст3 після ЕІЛ з послідовністю Al-Cr

| № | Кут відбиття, град | Міжплощинна відстань, Å | Фаза               |
|---|--------------------|-------------------------|--------------------|
| 1 | 44,66              | 2,0275                  | $\alpha$ -Fe (110) |
| 2 | 64,98              | 1,4341                  | $\alpha$ -Fe (200) |
| 3 | 82,19              | 1,1719                  | $\alpha$ -Fe (211) |
| 4 | 98,87              | 1,0140                  | $\alpha$ -Fe (220) |

Як видно з рентгенограм обох проведених процесів, у поверхневому шарі зафіксовано лише лінії  $\alpha$ -Fe тільки зі збільшеним періодом кристалічної ґратки: після ЕІЛ з послідовністю Cr-Al – 2,8713 Å, а з послідовністю Al-Cr – 2,8716 Å. Оскільки одним з елементів, який наносився на поверхню був хром, то, скоріше за все, основною фазою у покриттях є твердий розчин необмеженої розчинності заліза та хрому.

Розмір областей когерентного розсіювання (ОКР) для зразка з Cr-Al

покриттям складає 200 Å, що супроводжується мікрівикривленням ґратки 0,2 %. Для зразка з покриттям Al-Cr ОКР становить 220 Å, а мікрівикривлення – 0,12 %.

Незначна кількість легкоплавкого алюмінію, який наносився на поверхню сталі Ст3 під час однієї зі стадій ЕІЛ, не дає змоги виявити фази за його участі рентгеноструктурним методом у застосованому випромінюванні.

Отже, можна зробити висновок про те, що зміна порядку нанесення хрому та алюмінію не чинить суттєвого впливу на фазовий склад та параметри тонкої структури поверхні.

### **3.4 Корозійна стійкість електроіскрових покриттів на сталі Ст3**

Як відомо, сталь Ст3 не є корозійностійкою у різних середовищах, оскільки містить значну кількість заліза та вуглецю, що робить її схильною до окислення. Ця сталь відноситься до вуглецевих, і має обмежену стійкість до корозії, особливо у вологих середовищах та при контакті з кислотами та лугами.

Для підвищення корозійної стійкості сталі Ст3 на її поверхню наносили комбіновані електроіскрові покриття з таких металів, як алюміній та хром, відомих своєю корозійною стійкістю. Особливість ЕІЛ полягала у варіюванні послідовності нанесення Al та Cr, таким чином, що верхнім шаром на поверхні зразка був один з них.

Алюміній, завдяки утворенню природної тонкої, але міцної захисної оксидної плівки ( $Al_2O_3$ ), має високу корозійну стійкість. Ця плівка захищає алюміній від подальшого окислення, особливо у вологому середовищі та кислому середовищі. Алюміній має хорошу стійкість у воді, водних розчинах та вологих газах при рН 4 – 9. Він стійкий до морської води та деяких органічних кислот.

Хромові покриття мають високу корозійну стійкість завдяки здатності утворювати на поверхні захисний шар, який перешкоджає корозійним

процесам. Особливо добре вони захищають від корозії у воді, морській воді, азотній кислоті, а також при газовій корозії до високих температур. Хромове покриття, нанесене на сталь, міцно зчіплюється з нею, що гарантує її тривалий захист.

Поєднання корозійностійких алюмінію та хрому у межах одного комбінованого покриття надає змогу очікувати захисту поверхні сталі Ст3 від корозії.

Корозійну стійкість поверхонь досліджуваних зразків оцінювали кількісно та якісно.

Кількісно хімічну корозію виявляли гравіметричним методом, порівнюючи масу зразка до і після випробування. Результати випробувань та розрахунки показників корозійної стійкості для досліджених поверхонь представлені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати випробувань на корозійну стійкість сталі Ст3 у розчині морської солі (10 %) протягом 480 годин

| Матеріал       | Маса зразка до випробування ( $m_0$ ), г | Маса зразка після випробування ( $m_k$ ), г | Втрата маси зразка ( $\Delta m$ ), г | Коефіцієнт корозійної стійкості ( $K_m$ ) $\cdot 10^{-6}$ , г/м <sup>2</sup> год. | Швидкість корозії ( $v_{кор}$ ) мм/рік | Бал (група корозійної стійкості) |
|----------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|
| Без покриття   | 2,2555                                   | 2,2505                                      | 0,0050                               | 20,73                                                                             | 2,039                                  | 3 (зниженої стійкості)           |
| Покриття Cr-Al | 2,2255                                   | 2,2250                                      | 0,0005                               | 2,073                                                                             | 0,211                                  | 2 (стійке)                       |
| Покриття Al-Cr | 2,2505                                   | 2,2490                                      | 0,0015                               | 6,22                                                                              | 0,636                                  | 2 (стійке)                       |

Коефіцієнт корозійної стійкості ( $K_m$ ) був визначений на основі співвідношення втрати маси до добутку площі на час випробувань, згідно

формули 2.10.

Швидкість корозії  $v_{\text{кор}}$  розраховували за формулою 2.11. При визначенні  $v_{\text{кор}}$  для зразків з покриттями враховано густину сплаву AlCr ( $\rho = 7,49 \text{ г/см}^3$ ); для сталі Ст3 ( $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$ ).

На основі результатів випробувань на корозійну стійкість у 10% розчині морської солі бачимо, що нанесення покриттів на сталь Ст3 значно підвищує її корозійну стійкість. Легований шар, одержаний після ЕІЛ у послідовності Cr-Al збільшує стійкість до корозії у 9,62 рази. У випадку нанесення електроіскрового покриття у зворотній послідовності (Al-Cr), корозійна стійкість сталевій поверхні зростає у 3,2 рази.

Якщо ж порівняти стійкість покриттів у розчині морської солі між собою, то показник Cr-Al покриття перевищує значення для Al-Cr у 3 рази.

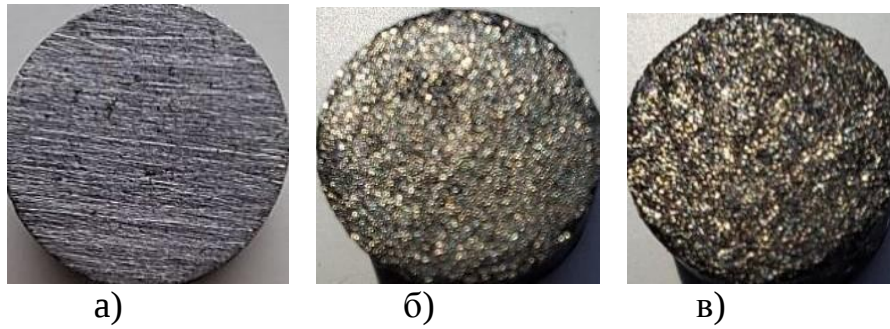
Порівняння розрахованих результатів таблиці 3.3 зі стандартною системою оцінювання корозійної стійкості (табл. 2.2), показало, що швидкість корозії обох покриттів знаходиться у межах (0,1 – 1,0) мм/рік: для Cr-Al – 0,212 мм/рік, для Al-Cr – 0,637 мм/рік. Це означає, що дані покриття на сталі Ст3 мають 2 бал корозійної стійкості, тобто є стійкими до корозії.

Зокрема, Сталь Ст3 без покриття демонструє найбільшу серед усіх зразків швидкість корозії (2,039 мм/рік), а це відповідає 3 балам шкали корозійної стійкості і оцінюється як знижена стійкість.

Якісне (візуальне) дослідження структур поверхні сталі Ст3 з легованими шарами та без них, до та після випробувань на корозійну стійкість зображено на рисунках 3.9 та 3.10.

Як видно з рисунку 3.9 а, вихідна поверхня зразка без покриття має порівняно гладку поверхню з помітними слідами шліфування.

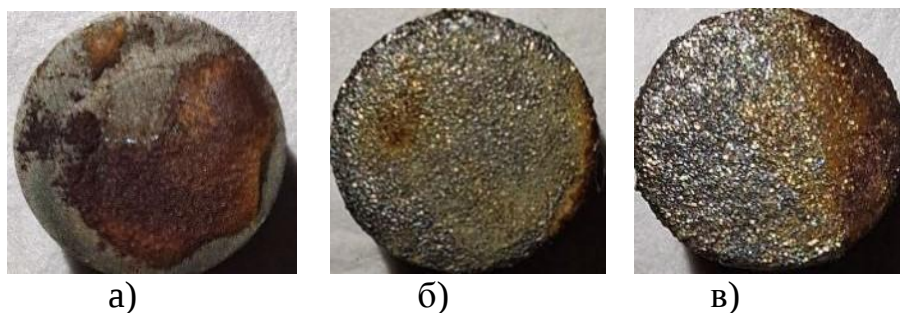
Зразки з нанесеними покриттями (рис. 3.9 б, рис. 3.9 в) мають шорсткість поверхні, що є характерною після проведення ЕІЛ, як у випадку покриття Cr-Al, так і у випадку Al-Cr.



а) без покриття, б) з покриттям Cr-Al, в) з покриттям Al-Cr  
Рисунок 3.9 – Поверхня зразків сталі Ст3 до випробувань

Після проведення корозійних випробувань протягом 480 годин зображення (рис. 3.10) чітко демонструють, що сталь без покриття (рис. 3.10 а) зазнала найбільшої корозії, судячи з нальоту іржі на її поверхні.

Зразки з нанесеними покриттями — Cr-Al (рис. 3.10 б) та Al-Cr (рис. 3.10 в) — візуально мають незначні (порівняно із зразком сталі без покриття) сліди корозії у вигляді одиничних осередків проступаючої іржі. Слід відмітити, що найменше за всі досліджувані зразки прокородувало покриття, одержане у послідовності Cr-Al. Очевидно, це відбувається через формування захисної оксидної плівки за участі алюмінію, який наносився під час легування останнім.



а) без покриття, б) з покриттям Cr-Al, в) з покриттям Al-Cr  
Рисунок 3.10 – Поверхня зразків сталі Ст3 після корозійного випробування в 10 % розчині морської солі

Це візуальне спостереження узгоджується з розрахунками кількісних параметрів (таблиця 3.3), за якими зразки можна розташувати в ряд за зменшенням корозійної стійкості таким чином: сталь Ст3 з покриттям Cr-Al – сталь Ст3 з покриттям Al-Cr – сталь Ст3 без покриття.

Отже, корозійна стійкість покриттів залежить від послідовності нанесення шарів.

### 3.5 Висновки до розділу 3

Гравіметричним аналізом встановлено, що в процесі ЕІЛ в обох послідовностях (Cr-Al та Al-Cr) на поверхні сталі Ст3 успішно формується легований шар, але приріст маси катоду зафіксовано лише на стадіях нанесення хрому.

Мікроструктурний аналіз виявив на поверхні сталі Ст3 однорідні за структурою покриття товщиною від 30 мкм (Al-Cr) до 60 мкм (Cr-Al) міцно зчеплені з основою за рахунок перехідної зони з подрібненими зернами, без виявлення видимих дефектів.

Послідовність нанесення Cr-Al під час ЕІЛ виявилася більш ефективною для досягнення максимальних значень мікротвердості поверхневого шару (7,6 ГПа), у порівнянні з оберненою послідовністю – Al-Cr (6 ГПа), що може бути пов'язано з утворенням твердого розчину Fe-Cr ще на першому етапі обробки. Зафіксована рентгеноструктурним аналізом фаза  $\alpha$ -Fe зі збільшеним періодом кристалічної ґратки (2,8713 – 2,8716) Å, швидше за все є твердим розчином  $\alpha$ -FeCr.

Корозійні випробування у 10 %-му розчині морської солі протягом 480 годин показали, що покриття Cr-Al має найменшу швидкість корозії (0,212 мм/рік) порівняно з покриттям Al-Cr (0,637 мм/рік). Обидва покриття на поверхні сталі Ст3 є корозійностійкими, що у (3,2 – 9,62) рази перевищує значення для сталевих поверхні, яка не піддавалася ЕІЛ.

## **4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА**

### **4.1 Науково-технічна актуальність НДР**

Сталь Ст3 є лідером ринку конструкційних сталей завдяки ідеальному поєднанню доступної ціни та високих якісних характеристик. Він має чудові механічні властивості, легко обробляється та добре зварюється, що робить його незамінним у будівельній та машинобудівній галузях.

Для покращення експлуатаційних показників Ст3, зокрема її твердості, зносостійкості та жаростійкості, застосовується інноваційний метод електроіскрового легування (ЕІЛ). Ця технологія дозволяє створювати на поверхні сталі зміцнені захисні покриття з хрому та алюмінію, які витримують значні механічні та термічні навантаження. Завдяки ЕІЛ можна суттєво подовжити термін служби деталей машин і ріжучого інструменту, виготовлених зі Ст3, що знижує потребу у використанні дорогих матеріалів.

ЕІЛ є екологічно чистим та економічно ефективним методом: він не потребує складного обладнання, споживає мало енергії та забезпечує міцне зчеплення покриття з основою, дозволяючи точно контролювати його товщину.

Застосування функціональних покриттів на основі Cr та Al на сталі Ст3 значно підвищує довговічність і надійність виробів, особливо тих, що експлуатуються в екстремальних умовах з обмеженим доступом до обслуговування. Дослідження у цій сфері відкривають нові горизонти для створення передових матеріалів з унікальними властивостями, що сприяє інноваційному розвитку різних секторів промисловості.

### **4.2 Мета і завдання НДР**

Мета дослідження: з'ясувати, як послідовність нанесення хрому (Cr) та алюмінію (Al) методом електроіскрового легування (ЕІЛ) впливає на

кінетику формування, структуру, фазовий склад та твердість поверхневого шару сталі Ст3.

Для досягнення цієї мети передбачається виконання таких завдань:

1. Огляд літератури: Проаналізувати поточні дослідження та технології ЕІЛ низьковуглецевих сталей.
2. Розробка методики: Створити алгоритм проведення ЕІЛ сталі Ст3 з використанням обраних анодів (Cr, Al).
3. Підготовка та обробка зразків: Виготовити зразки сталі Ст3 та провести їх ЕІЛ за розробленими схемами (Cr-Al та Al-Cr).
4. Комплексний аналіз шару: Дослідити утворений поверхневий шар шляхом:
  - гравіметрії: визначити приріст маси зразка та ерозію анодів;
  - мікродюрометрії: виміряти мікротвердість поверхні;
  - мікроструктурного аналізу: вивчити структуру та однорідність шару;
  - рентгенофазового аналізу: ідентифікувати фазовий склад покриття;
5. Встановлення взаємозв'язків: сформулювати гіпотези щодо залежності властивостей отриманого шару від характеристик легуючих елементів та послідовності їх нанесення.
6. Формування висновків: Підсумувати результати дослідження та зробити відповідні висновки.

#### **4.3 Розрахунок планової собівартості проведення дослідження**

Планова собівартість – це ключовий економічний інструмент, що дозволяє контролювати витрати на науково-дослідну роботу (НДР). Вона відображає всі матеріальні та трудові ресурси, необхідні для реалізації проекту, і її точний розрахунок є запорукою досягнення бажаних результатів з мінімальними фінансовими затратами.

Розрахунок планової собівартості НДР охоплює такі основні категорії витрат:

- Оплата праці персоналу: Зарплата науковців та інших фахівців, залучених до виконання НДР.
- Соціальні відрахування: Єдиний соціальний внесок, нарахований на заробітну плату.
- Вартість матеріалів: Закупівля сировини, комплектуючих та інших матеріалів, необхідних для дослідження.
- Витрати на спеціалізоване обладнання: Придбання або оренда унікального устаткування для експериментів.
- Відрядження: Кошти на службові поїздки персоналу, пов'язані з НДР.
- Інші прямі витрати: Додаткові витрати, що безпосередньо стосуються проекту, але не включені до попередніх пунктів.
- Накладні витрати: Загальні операційні витрати, які неможливо прямо віднести до конкретного проекту (наприклад, адміністративні витрати, комунальні послуги).

#### **4.3.1 Визначення заробітної плати науково-дослідницького персоналу**

Методика розрахунку заробітної плати науково-дослідного персоналу для даної НДР спирається на два ключові параметри: загальну трудомісткість проекту та індивідуальну денну ставку кожного фахівця. До складу виконавчої групи входять провідний науковий співробітник, старший науковий співробітник та інженер-дослідник.

Згідно з внутрішніми нормативами КПІ ім. Ігоря Сікорського, їхні місячні посадові оклади становлять:

- провідного наукового співробітника - 13916 грн;
- старшого наукового співробітника - 11384 грн;
- інженера-дослідника - 10010 грн.

Для визначення денної заробітної плати використовується показник середньої кількості робочих днів у місяці – 21, враховуючи стандартний п'ятиденний робочий тиждень.

$$\text{Денна заробітна плата} = \frac{\text{Місячна заробітна плата}}{21}, \quad (4.1)$$

Тому денна заробітна плата виконавців НДР становить:

- провідного наукового співробітника –  $\frac{13916}{21} = 662,66$
- старшого наукового співробітника –  $\frac{11384}{21} = 542,09$
- інженера-дослідника –  $\frac{10010}{21} = 476,66$

Для зручності планування, трудомісткість кожного етапу НДР викладено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Трудомісткість окремого етапу виконання НДР

| Етапи НДР                                          | Трудомісткість, люд.-дні    |                           |                   |
|----------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------|
|                                                    | Провідний науковий керівник | Старший науковий керівник | Інженер-дослідник |
| 1.Аналіз наукових джерел за темою                  | 7                           | 3                         | 0                 |
| 2.Актуальність та цільові напрямки дослідження     | 4                           | 4                         | 0                 |
| 3.Визначення порядку виконання дослідницьких робіт | 6                           | 5                         | 2                 |

продовження таблиці 4.3

| Етапи НДР                     |                                         | Трудовісткість, люд.-дні    |                           |                   |
|-------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------|
|                               |                                         | Провідний науковий керівник | Старший науковий керівник | Інженер-дослідник |
| 4.Виконання експерименту      | Формування іскрового проміжку           | 5                           | 10                        | 2                 |
|                               | Утворення плазми                        |                             |                           |                   |
|                               | Переміщення частинок до поверхні зразка | 1                           |                           |                   |
|                               | Розплавлення поверхні зразка            |                             |                           |                   |
|                               | Створення однорідного покриття          |                             |                           |                   |
|                               | Затвердіння покриття                    |                             |                           |                   |
| 5.Обговорення результатів НДР |                                         | 6                           | 8                         | 1                 |
| <b>Всього</b>                 |                                         | <b>28</b>                   | <b>30</b>                 | <b>5</b>          |

Заробітна плата (ЗП) виконавців розраховується як сума добутків трудовісткості та денної оплати праці:

$$\text{ЗП} = 28 \cdot 662,66 + 30 \cdot 542,09 + 5 \cdot 476,66 = 37200,48 \text{ грн}$$

### 4.3.2 Визначення розміру єдиного соціального внеску

Згідно з чинним законодавством, норма відрахувань становить 22 % від заробітної плати.

$$\begin{aligned} BC &= 0,22 \cdot 3П, \\ BC &= 0,22 \cdot 37200,48 = 8184,1 \text{ грн} \end{aligned} \quad (4.2)$$

### 4.3.3 Визначення вартості матеріалів для виконання НДР

Для досягнення мети НДР потрібні матеріали, перелік яких наведено в табл 4.2

Таблиця 4.2 – Вартість основних матеріалів

| Назва матеріалу | Одиниця вимірювання | Кількість | Ціна за одиницю | Загальна вартість |
|-----------------|---------------------|-----------|-----------------|-------------------|
| Сталь Ст3       | кг                  | 0,5       | 120 грн/кг      | 60 грн            |
| Cr-Al           | кг                  | 0,5       | 1800 грн/кг     | 900 грн           |
| Al-Cr           | кг                  | 0,5       | 100 грн/кг      | 50 грн            |
| Разом           |                     |           |                 | 1010 грн          |

Розмір транспортних витрат ( $V_{\text{ТР}}$ ) визначається як 10 % від повної вартості всіх матеріалів:

$$V_{\text{ТР}} = 0,1 \cdot 1010 = 101 \text{ грн}$$

Тоді повна сума витрат на матеріал буде становити:

$$V_{\text{М}} = 1010 + 101 = 1111 \text{ грн}$$

#### 4.3.4 Інші прямі невраховані витрати

Інші прямі невраховані витрати ( $C_{\text{НВ}}$ ) дорівнюють 10 % від суми заробітної плати, відрахувань до єдиного соціального внеску та витрат на матеріали:

$$C_{\text{НВ}} = 0,1 \cdot (ЗП + ВС + В_{\text{М}}), \quad (4.3)$$

$$C_{\text{НВ}} = 0,1 \cdot (37228,78 + 8190,33 + 1111) = 4649,558 \text{ грн}$$

#### 4.3.5 Розрахунок накладних витрат

Накладні витрати включають оплату праці персоналу (з ЄСВ), витрати на охорону праці, допоміжні виробництва, техніку безпеки, екологію та інші. Для КПП ім. Ігоря Сікорського норматив відрахування ( $H_{\text{В}}$ ) на ці витрати становить 20% від загальної суми прямих витрат на НДР. Отже, сума накладних витрат для даної НДР:

$$H_{\text{В}} = 0,2 \cdot (ЗП + ВС + В_{\text{М}} + C_{\text{НВ}}), \quad (4.4)$$

$$H_{\text{В}} = 0,2 \cdot (37228,78 + 8190,33 + 1111 + 4653,01) = 10229,03 \text{ грн}$$

#### 4.3.6 Розробка планової калькуляції собівартості НДР

Сума витрат, необхідних для виконання НДР, становить її планову собівартість. Детальні результати калькуляції представлені в таблиці 4.3

Таблиця 4.3 – Калькуляція планової собівартості НДР за темою

| Найменування<br>калькуляційних статей | Позначення | Сума     |       |
|---------------------------------------|------------|----------|-------|
|                                       |            | грн      | %     |
| Заробітна плата виконавців<br>теми    | ЗП         | 37200,48 | 60,61 |

продовження таблиці 4.3

| Найменування<br>калькуляційних статей         | Позначення | Сума      |       |
|-----------------------------------------------|------------|-----------|-------|
|                                               |            | грн       | %     |
| Відрахування до єдиного<br>соціального внеску | BC         | 8184,1    | 13,36 |
| Витратні матеріали                            | $B_M$      | 1111      | 1,8   |
| Інші прямі витрати                            | $C_{HB}$   | 4649,558  | 7,57  |
| Накладні витрати                              | $H_B$      | 10229,03  | 16,66 |
| Всього                                        |            | 61374,168 | 100   |

Відповідно до даних з табл. 4.3 загальна планова собівартість НДР становить:  $V_{НДР} = 61374,168$  грн.

#### **4.4 Визначення очікуваних результатів НДР та розрахунок показників економічної ефективності**

У цій роботі проведено пошуково-теоретичне дослідження. Оскільки повні дані щодо сфери застосування отриманих результатів відсутні, прямий розрахунок очікуваного річного економічного ефекту ускладнений.

Замість прямого розрахунку використовується бальна система оцінки економічної ефективності, що базується на таких критеріях:

а) важливість розробки: оцінюється за її місцем у програмах та співробітництві: самостійна робота, що не входить до комплексних програм чи завдань директивних органів:

- Робота за угодою про науково-технічне співробітництво.
- Частина відомчої програми.

- Частина міжнародної комплексної програми.

б) можливість використання результатів: оцінюється за широтою їх потенційного застосування:

- Результати для використання лише в даному підрозділі.
- Результати для використання однією організацією.
- Результати для використання багатьма організаціями.
- Результати для використання споживачами в межах однієї галузі.
- Результати для використання споживачами у різних галузях.

в) новизна дослідження та його теоретичне значення: оцінюється за рівнем отриманої інформації:

- Аналіз, узагальнення або класифікація існуючої інформації.
- Отримання нової інформації, що доповнює поточні уявлення про процеси.
- Отримання нової інформації, що частково змінює уявлення про природу процесів.
- Формулювання нових теорій, методик тощо.
- Отримання унікальної інформації, яка принципово змінює уявлення про досліджувані процеси.

г) складність розробки: оцінюється за кількістю залучених підрозділів та обсягом витрат:

- Робота, виконана одним підрозділом з витратами до 20 тис. грн.
- Робота, виконана одним підрозділом з витратами від 20 тис. грн до 1 тис. грн.
- Робота, виконана одним підрозділом з витратами від 1 тис. грн до 2 тис. грн.
- Робота, виконана багатьма підрозділами з витратами від 2 тис. грн до 1 млн. грн.
- Робота, виконана багатьма організаціями з витратами понад 1 млн. грн.

Кожен із цих показників має відповідний коефіцієнт ( $K_1, K_2, K_3, K_4$ ). Ці коефіцієнти використовуються для обчислення сумарного річного економічного ефекту.

Загальна оцінка (O) розраховується як добуток усіх цих коефіцієнтів:

$$O = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4, \quad (4.5)$$

де  $K_1$ - коефіцієнт важливості розробки;

$K_2$ - коефіцієнт можливості використання результатів;

$K_3$ - коефіцієнт теоретичної значущості та рівня новини;  $K_4$ - коефіцієнт складності розробки. Результати бальної оцінки річної економічної ефективності НДР представлені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Бальна оцінка річної економічної ефективності НДР

| Позначення показник ефективності НДР | Сутність показників                    | Бальна оцінка ефективності | Характеристика НДР                                                                                        |
|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| K1                                   | Важливість                             | 5                          | Дана робота є частиною відомчої програми                                                                  |
| K2                                   | Можливість використання результатів    | 8                          | Результати розробки придатні для використання в межах цієї галузі.                                        |
| K3                                   | Теоретична значущість та рівень новини | 5                          | У ході роботи було отримано нову інформацію, що коригує існуючі погляди на природу досліджуваних процесів |
| K4                                   | Складність розробки                    | 3                          | Це завдання виконує один підрозділ, при цьому витрати коливаються від 20 тис. до 100 тис. грн             |

Згідно з даними, що містяться в таблиці 4.4, величина О становить:

$$O = 5 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 3 = 600$$

Умовний річний економічний ефект ( $E_{\text{НДР}}$ ) науково-дослідницької роботи визначається на основі розрахованої загальної оцінки (О), використовуючи встановлену для цього методику або коефіцієнт перерахунку балів в грошовий еквівалент:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot O - E_{\text{Н}} \cdot B_{\text{НДР}}, \quad (4.6)$$

де 500 - умовна вартість одного балу, грн.;

$E_{\text{Н}}$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності ( $E_{\text{Н}} = 0,2 \dots 2,0$  для нашого розрахунку обираємо  $E_{\text{Н}} = 0,2$ );

$B_{\text{НДР}}$  – витрати на виконання НДР (планова річна собівартість виконання НДР, у зазначених вище розрахунках  $B_{\text{НДР}} = 61374,168$  грн.

Скориставшись формулою (4.6), отримуємо:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 600 - 0,2 \cdot 61374,168 = 287725,17$$

Коефіцієнт економічної ефективності:

$$E_e = \frac{E_{\text{Н}}}{B_{\text{НДР}}}, \quad (4.7)$$

$$E_e = \frac{287725,17}{61374,168} = 4,68$$

Розрахований коефіцієнт свідчить про доцільність проведення НДР.

#### 4.5 Висновки до розділу 4

Наведена науково-технічна актуальність цієї НДР обґрунтована. Планова кошторисна собівартість проєкту була визначена з урахуванням усіх необхідних ресурсів. Розрахунок економічної ефективності підтверджує доцільність реалізації даної роботи.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Метою цього розділу є виявлення та аналіз потенційно небезпечних і шкідливих факторів, які можуть негативно вплинути на стан здоров'я людини або спричинити травмування під час проведення електроіскрового легування сталі Ст3 з використанням електродів на основі хрому та вольфраму. Окрему увагу приділено розробці заходів, спрямованих на попередження або усунення дії таких факторів.

У цьому розділі детально розглядаються питання безпеки праці під час експериментальних досліджень, що проводились у лабораторії кафедри фізики металів із застосуванням установки типу «ЕЛІТРОН-26».

Для обґрунтованої оцінки умов праці в рамках виконання дипломної роботи необхідно врахувати дію наступних чинників:

- параметри мікроклімату;
- склад повітря в робочій зоні;
- рівень шумового навантаження;
- наявність вібрацій;
- освітленість робочого місця;
- ризик ураження електричним струмом;
- електромагнітні й оптичні випромінювання, зокрема від електроіскрових розрядів і комп'ютерної техніки.

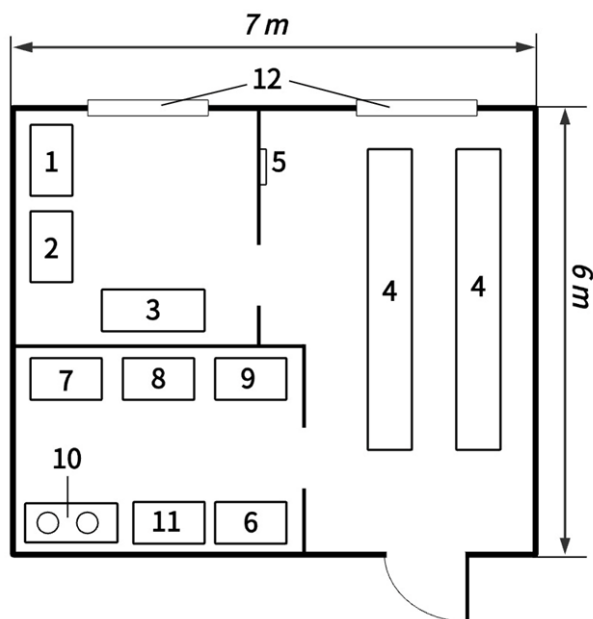
### 5.1 Аналіз роботи в приміщенні

Науково-дослідна робота була проведена в лабораторії кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки НН ІМЗ ім. Є.О. Патона КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Схематичне зображення приміщення наведено на рисунку 5.1.

У приміщенні було здійснено вимірювання аудиторії та вікон, результати яких наведено нижче (рис. 5.1):

- габарити аудиторії: ширина – 6 м, довжина – 7 м, висота – 3,8 м;
- розміри вікон: ширина – 2,7 м, висота – 2,5 м.



- 1 – твердомір ПМТ-3, 2 – тумба, 3 – комп'ютер, 4 – робочі столи,  
 5 – дошка, 6 – шкаф, 7 – стіл для шліфування, 8 – прилад для  
 вимірювання зносостійкості, 9 – прилад «Елитрон – 26А»,  
 10 – полірувальні круги, 11 – стіл, 12 – вікон.

Рисунок 5.1 – Схема лабораторного приміщення , в якому  
 виконувалася науково-дослідницька робота

Аудиторія, в якій одночасно працює п'ятеро осіб, має площу  $42 \text{ м}^2$  та об'єм  $156,9 \text{ м}^3$ . Відповідно, на одну людину припадає  $8,4 \text{ м}^2$  площі та приблизно  $31,4 \text{ м}^3$  об'єму. Таким чином, умови приміщення за площею та об'ємом на одну особу відповідають вимогам ДБН В.2.2-28-2010, згідно з якими на одного працівника має припадати не менше  $6 \text{ м}^2$  площі та  $20 \text{ м}^3$  об'єму [32].

Нормальні умови праці передбачають наявність чистого повітря з відповідним хімічним складом, а також оптимальні показники температури, вологості та швидкості руху повітря. У зв'язку з цим під час виконання науково-дослідної роботи було проведено оцінку мікроклімату в лабораторному приміщенні. Основними параметрами, які враховуються при дослідженні мікроклімату, є температура, швидкість руху повітря в робочій

зоні, а також співвідношення отриманих результатів із нормативними значеннями [32]. Крім того, згідно з чинною класифікацією, роботи поділяють за ступенем важкості: Легка Іа, Легка Іб, Середньої важкості Іа, Середньої важкості Іб, Важка ІІІ.

Відповідно до [32], дана діяльність відноситься до категорії важкості робіт – Іб, яка охоплює легкі фізичні навантаження з енерговитратами до 150 ккал/год. Показники мікроклімату в робочій зоні лабораторії порівнювались із нормативними та представлені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату в робочій зоні лабораторного приміщення

| Період року | Температура повітря, °С |           | Відносна вологість, % |                | Швидкість руху повітря, м/с |           |
|-------------|-------------------------|-----------|-----------------------|----------------|-----------------------------|-----------|
|             | Виміряна                | Допустима | Виміряна              | Допустима      | Виміряна                    | Допустима |
| Холодний    | 20                      | 17...25   | 70                    | <75            | 0,1                         | <0,2      |
| Теплий      | 23                      | 19...30   | 55                    | <60, при 27 °С | 0,2                         | 0,1...0,3 |

У приміщенні лабораторії діє система водяного опалення, а вентиляція здійснюється природним способом.

Можна зробити висновок, що мікроклімат у приміщенні відповідає вимогам санітарних норм.

Чистота повітря в лабораторному приміщенні визначається на основі вмісту шкідливих речовин та пилу. Концентрації таких речовин у робочій зоні не повинні перевищувати гранично допустимих значень, передбачених для проєктування виробничих будівель, технологічних процесів,

вентиляційних систем та обладнання. Згідно з Гігієнічного регламенту хімічних речовин у повітрі робочої зони, N 741/35024 від 03.08.2020 р. [33], встановлено граничні концентрації шкідливих речовин у повітрі робочих приміщень, які вважаються безпечними.

Наявність шкідливих речовин у повітрі залежить від характеру технологічного процесу, а також від типу використовуваної сировини. У межах даної лабораторії, де робота ведеться виключно з твердими матеріалами, не проводяться операції полірування, шліфування або травлення. Крім того, приміщення регулярно прибирається вологим способом. З огляду на це, рівень забруднення повітря та запиленості не перевищує допустимих нормативів.

## **5.2 Аналіз шуму та вібрації**

Шум являє собою механічні коливання частинок пружного середовища (газу, рідини або твердого тіла), які виникають під дією зовнішніх сил [34]. Під час виконання науково-дослідної роботи на установці «Елітрон-26А» утворювався певний рівень шуму та вібрації.

Навіть при помірних рівнях звукового тиску (50–60 дБА) шум може негативно впливати на нервову систему людини, що особливо помітно під час інтелектуальної діяльності. Він сприяє підвищенню артеріального тиску, викликає головний біль, дратівливість, втому. Доведено, що тривалий вплив шуму пов'язаний із розвитком низки захворювань, зокрема гіпертонії, неврозів, хвороб шлунково-кишкового тракту та шкіри. За рівня шуму 90 дБА та більше можливе зниження слуху, а в несприятливих умовах виробництва – навіть професійне захворювання (сенсоневральна приглухуватість). Дуже високі рівні шуму (понад 145 дБА) здатні спричинити пошкодження барабанної перетинки [34].

Гранично допустимі рівні шуму в робочій зоні визначені нормативом ДСН 3.3.6.037-99. У цьому документі наведено значення, які враховують тип

приміщення та характер виконуваних робіт [35].

У ході виконання дипломної роботи було зафіксовано імпульсний шум, однак зважаючи на епізодичний характер роботи установки, що його створює, небезпека була мінімальною. Для захисту від впливу шуму застосовувались засоби індивідуального захисту – протишумові вкладиші, які розміщуються у слухових проходах.

### **5.3 Інженерні рішення**

#### **5.3.1 Освітлення**

Рационально організоване освітлення створює належні умови для ефективного та безпечного виконання виробничих завдань. Існує три основні типи освітлення: природне, штучне та комбіноване. Природне, своєю чергою, поділяється на бічне, верхнє та комбіноване, а штучне – на загальне та локальне [36].

Недостатній рівень освітлення у виробничій зоні може призвести до зниження якості виконання робіт. Це, зокрема, спричиняє зростання кількості технічних дефектів, таких як розриви, витоки пального, потрапляння сторонніх домішок, що своєю чергою негативно впливає на безпеку праці. Неналежне освітлення може також стати причиною серйозних нещасних випадків, включно з травмами від рухомих механізмів.

Правильний розрахунок і розміщення освітлювальних пристроїв у виробничих приміщеннях сприяє тому, що працівники тривалий час здатні чітко розрізняти предмети та інструменти без перевантаження органів зору. Такі умови допомагають зменшити ризик виробничих травм та захворювань очей.

До переваг природного освітлення належить його позитивний вплив на зір і загальний стан здоров'я. Недоліками є залежність від часу доби, року, а також можливе утворення нерівномірного освітлення, яке ускладнює розрізнення об'єктів на фоні.

У досліджуваному приміщенні реалізовано бічне природне освітлення через вікна, розташовані з південного боку. Відстань від джерела природного світла до зони основної роботи становить 1,5 м. Лабораторне освітлення поєднує природні та штучні джерела. Для локального освітлення використовуються лампи розжарювання, а для загального – люмінесцентні світильники типу ЛБ-40 (20 одиниць у приміщенні). Рівень освітленості відповідає нормативу – 200 лк згідно з ДБН В.2.5-28:2006 [36].

### 5.3.2 Аналіз штучного освітлення

У системах штучного освітлення нормативним показником є абсолютне значення освітленості, яке залежить від характеру візуальних робіт і типу освітлювальної установки (загальної або комбінованої).

Розрахунок освітлювальної системи може здійснюватися різними способами, серед яких найпоширенішими є методи розрахунку за світловим потоком або за точками. У проєктній практиці перевагу зазвичай надають методу утилізації світлового потоку, який дає змогу визначити сумарний світловий потік джерел світла, необхідний для створення нормованої рівномірної освітленості горизонтальної площини. Цей метод враховує як прямий, так і відбитий світловий потік (від стін, стелі, підлоги) [35].

У цій роботі застосовується саме метод світлового потоку. Базова формула для розрахунку має вигляд:

$$F = \frac{(E \times S \times K \times Z)}{(N \times n \times \eta)} \quad (5.1)$$

де  $F$  – світловий потік одного джерела світла, лм;

$E$  – нормована освітленість, лк;

$S$  – площа, яку необхідно освітити, м<sup>2</sup>;

$K$  – коефіцієнт запасу, який враховує зниження освітленості через запилення та старіння ламп;

$Z$  – коефіцієнт нерівномірності освітлення;

$N$  – кількість світильників;

$n$  – кількість ламп у кожному світильнику;

$\eta$  – коефіцієнт використання світлового потоку.

Коефіцієнт використання потоку  $\eta$  визначається за світлотехнічними таблицями і залежить від показника приміщення  $i$ , який обчислюється за формулою:

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a+b)} = \frac{6 \cdot 6}{2.4 \cdot (6+6)} = 1.25 \quad (5.2)$$

де  $a, b$  – ширина і довжина приміщення, м;

$h$  – висота підвісу світильників над робочою поверхнею, м.

Користуючись даними світловідбивної здатності:  $\rho_{стел} = 80\%$ ,

$\rho_{стін} = 50\%$ , за таблицею визначається  $\eta = 48\% = 0.48$

Підставляючи значення у формулу (5.3), отримаємо:

$$E = \frac{F \cdot N \cdot n \cdot \eta}{h \cdot S \cdot Z} = \frac{3200 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 0.48}{1.5 \cdot 36 \cdot 1.1} = 571 \text{ лк} \quad (5.3)$$

де  $F = 3200$  лм (для ламп ЛБ);

$K = 1.5$ ;

$Z = 1.1$  (для люмінесцентних ламп);

$N = 10, n = 2, S = 36, \eta = 0.48$ .

Згідно з ДБН В.2.5-28-2006, мінімально допустима освітленість для приміщення цього типу становить 200 лк. Розрахункове значення  $E = 517$  лк перевищує норматив, отже, штучне освітлення у лабораторії є достатнім [36].

### 5.3.3 Електробезпека

Аудиторія, у якій проводилось науково-дослідне випробування, класифікується як приміщення без підвищеного електричного ризику [32]. Усі електроприлади (зокрема комп'ютери й обладнання) живляться від мережі з напругою 220 В змінного струму частотою 50 Гц.

Основними причинами ураження електричним струмом є:

- пошкодження ізоляції та, як наслідок, відкритий доступ до

струмопровідних елементів обладнання;

- поява напруги на відключених елементах через неправильний запуск обладнання;
- недотримання або неправильне виконання правил електробезпеки, неуважність під час роботи.

Серед типових випадків ураження електричним струмом під час роботи з електрообладнанням вирізняють:

1. випадковий дотик до струмопровідних частин в умовах відсутності засобів захисту або неналежного ставлення персоналу до безпеки;
2. контакт із неізольованими елементами через механічні пошкодження або зношеність ізоляції;
3. потрапляння під напругу під час проведення ремонтів унаслідок помилкового вмикання обладнання.

Максимально допустиме значення струму, що може пройти через людину у нормальних умовах, не повинно перевищувати 0,3 мА для змінного струму та 1 мА для постійного [34].

На ступінь небезпеки ураження струмом впливають такі чинники:

- стан шкіряного покриву: наявність порізів, вологість, пітливість, забруднення – знижують опір і підвищують ризик ураження;
- параметри електричного струму: вид (постійний чи змінний), сила, напруга, тривалість впливу. Чим довше триває дія струму, тим нижчий опір організму, що може призвести до судом або зупинки серця. Реактивні домішки в повітрі також знижують ізоляцію, сприяючи виникненню коротких замикань;
- підвищена вологість і запиленість – полегшують перехід напруги до відкритих частин і збільшують ризик ураження.

Потік струму крізь організм – це складний біофізичний процес, який супроводжується рядом хімічних і біологічних реакцій:

- теплова дія – перетворення електричної енергії в тепло;
- електролітична дія – розщеплення рідин у тканинах;

- механічна дія – наприклад, мимовільні м'язові скорочення;
- біологічна дія – вплив струму на нервову систему та внутрішні біоелектричні процеси, які відбуваються при подразненні живих тканин [32].

У лабораторії дотримано всіх заходів захисту: передбачено заземлення корпусів електрообладнання, а робочі місця сплановані таким чином, щоб уникнути можливості одночасного контакту з потенційно небезпечними елементами [33].

#### 5.3.4 Вентиляція приміщення лабораторії

Примусова вентиляція, яка реалізується за допомогою механічних засобів, передбачає використання спеціального обладнання для переміщення повітряного потоку в межах системи (рис. 5.2). Такі пристрої називаються вентиляторами, а їх вибір здійснюється на підставі розрахунку необхідної інтенсивності вентиляції з урахуванням механічного впливу [34].

У лабораторному приміщенні рекомендована температура становить 23 °С, а відносна вологість повітря має не перевищувати 60 %.



Рисунок 5.2 – Витяжна вентиляція марки С4.65-3.0

При роботі витяжної системи чисте повітря потрапляє в приміщення через нещільності в огороджуючих конструкціях. Ця обставина є суттєвим недоліком, так як неорганізований приток холодного повітря (протяги) можуть викликати простудні захворювання.

Отже, у холодний період року виникає потреба у додатковому теплопостачанні (рис. 5.3).

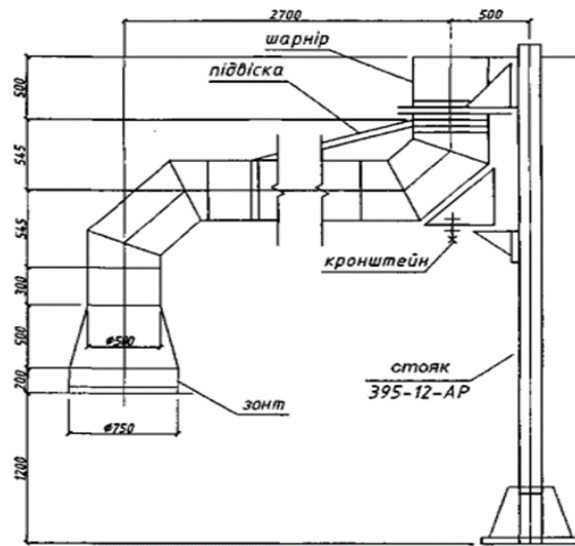


Рисунок 5.3 – Конструкція витяжної вентиляції марки С4.65-3.0

#### 5.4 Пожежна безпека

Об'єкт пожежної безпеки – це стан об'єкта, який з регульованою ймовірністю виключає виникнення та розвиток пожежі та вплив на людей її небезпечних факторів, а також забезпечує захист матеріальних цінностей.

Основними напрямками пожежної безпеки є ліквідація умов пожежі та мінімізація її наслідків [36].

Проаналізуємо ймовірність виникнення пожежі в приміщенні та засобів його попередження.

Відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36: 2016, приміщення аудиторія за пожежонебезпекою належить до категорії “В” (в лабораторії є легкозаймисті та легкозаймисті рідини, також тверді легкозаймисті та горючі речовини). Приміщення, в яких вони знаходяться, не належать до категорії А або В).

Найнебезпечніше місце в приміщенні – це місце, де знаходиться комп'ютерна техніка, місце, де прокладається електропроводка. Запалювання може статися через коротке замикання в електропроводці [36]. Кімната з водою із загальної мережі водопостачання, порошкові вогнегасники, обладнані для гасіння пожежі. План евакуації у разі пожежі показаний на

рисунку 5.4

Вогнегасники ОУВ-2 (двоокис вуглецю-брометил) доступні в лабораторії. Умови експлуатації задовольняють обмеження щодо використання вогнегасників цих типів (напруга електроприладів не більше 1000 В). Пожежна сигналізація та сигналізація – це автоматичні пожежні сигнали типу ДПТ, які реагують на підвищення температури. У разі виникнення живого електричного вогню полум'я, яке утворюється, не гасне водою, але використовується вогнегасник гасіння діоксиду вуглецю або вуглекислого газу.

Основними заходами пожежної безпеки є регулярна перевірка ефективності вогнегасників та пожежної сигналізації; перевірка електропроводки; щорічне випробування на опір ізоляції високою напругою близько 500 В; обережність з легкоплавкими речовинами.

Внутрішнє службове спілкування – це засіб сповіщення працівників про пожежу. У разі пожежі існує план евакуації будівельників (рис. 5.4).

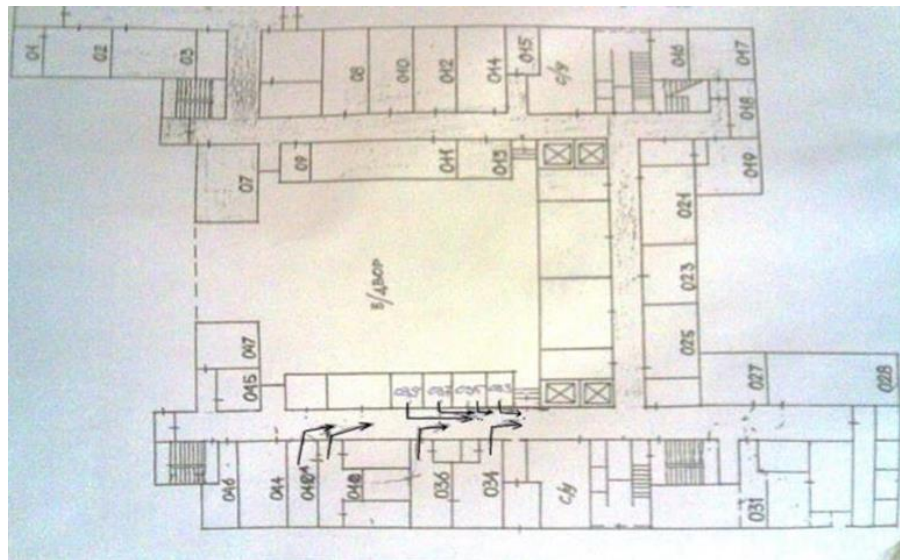


Рисунок 5.4 – План евакуації

Для запобігання займання одягу та його пошкодження потрібно використовувати спеціальний одяг що не піддається горінню (рис. 5.5)



Рисунок 5.5 – Спеціальний вогнетривкий одяг DELTA PLUS SAMVES-SUMPAN GR

### **5.5 Висновки до розділу 5**

Дослідницька діяльність, що проводилася в межах цієї роботи згідно з планом, не створює загрози для забруднення навколишнього середовища.

У процесі аналізу шкідливих і небезпечних факторів були враховані умови, за яких може виникнути ризик негативного впливу на організм людини.

Параметри мікроклімату, організація робочого простору, рівень освітлення в лабораторії відповідають встановленим санітарним вимогам. Рівні шуму, вібрацій і випромінювання не перевищують допустимих значень.

## ВИСНОВКИ

1. Виявлено, що послідовність нанесення хрому та алюмінію під час електроіскрового легування сталі Ст3 впливає на товщину, мікротвердість та корозійну стійкість сформованих покриттів, але не здійснює впливу на їхній фазовий склад.

2. Встановлено, що в процесі ЕІЛ за схемою Cr-Al на поверхні сталі Ст3 формується легований шар, товщина якого (60 мкм) у 2 рази більше, ніж покриття Al-Cr (30 мкм). Цьому сприяє утворення твердого розчину необмеженої розчинності заліза з хромом на першій стадії обробки, коли фіксується найбільший приріст маси зразка.

3. В залежності від послідовності нанесення матеріалів анодів змінюється максимальна мікротвердість поверхневих шарів: після ЕІЛ за схемою Cr-Al – 7,62 ГПа, після ЕІЛ за схемою Al-Cr – 5,96 ГПа.

4. Випробування у 10 %-му розчині морської солі протягом 480 годин показали, що корозійна стійкість електроіскрового покриття Cr-Al на сталі Ст3 у 3 рази більша, ніж для покриття Al-Cr. При цьому стійкість до корозії зразків з легованими шарами у 3,2 рази (Al-Cr) та у 9,62 рази (Cr-Al) вища у порівнянні із сталлю Ст3 без покриття.

5. Розрахунок економічної ефективності свідчить про доцільність реалізації даної роботи.

6. Всі аспекти лабораторного середовища, включаючи мікроклімат, організацію робочих місць та освітлення, відповідають санітарним вимогам, а рівні шуму, вібрацій та випромінювання перебувають у межах допустимих норм.

## CONCLUSIONS

1. It was found that the sequence of chromium and aluminum deposition during electrospark alloying of St3 steel affects the thickness, microhardness, and corrosion resistance of the formed coatings, but does not affect their phase composition.

2. It has been established that in the process of ESA according to the Cr-Al scheme, an alloyed layer is formed on the surface of St3 steel, the thickness of which (60  $\mu\text{m}$ ) is 2 times greater than the Al-Cr coating (30  $\mu\text{m}$ ). This is facilitated by the formation of a solid solution of unlimited solubility of iron with chromium at the first stage of processing, when the largest increase in the mass of the sample is recorded.

3. Depending on the sequence of application of anode materials, the maximum microhardness of the surface layers changes: after ESA according to the Cr-Al scheme – 7.62 GPa, after ESA according to the Al-Cr scheme – 5.96 GPa.

4. Tests in a 10% sea salt solution for 480 hours showed that the corrosion resistance of the Cr-Al electrospark coating on St3 steel is 3 times higher than for the Al-Cr coating. At the same time, the corrosion resistance of samples with alloyed layers is 3.2 times (Al-Cr) and 9.62 times (Cr-Al) higher compared to St3 steel without coating.

5. The calculation of economic efficiency indicates the feasibility of implementing this work.

6. All aspects of the laboratory environment, including microclimate, workplace organization, and lighting, meet sanitary requirements, and noise, vibration, and radiation levels are within acceptable limits.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електроіскрове легування металевих поверхонь / Лазаренко Б.Р [та ін.]. – Київ : Наук. думка, 1986 - 276 с.
2. K.P.Rajurkar, “A Report on Technology Assessment of Electrical Discharge and Electro-Chemical machine Tools”, / Jaykumar Narasimhan, // Association for Manufacturing Technology, CNMR, University of Nebraska-Lincoln, USA, –2003. - 105 p.
3. Лобачова Г.Г. Поверхневе зміцнення сплавів заліза електроіскровим легуванням цирконієм, титаном, хромом та хімікотермічною обробкою / Г.Г. Лобачова // Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.01 – металознавство та термічна обробка металів. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, Київ, 2012. – 200 с.
4. Sharifov Z.Z., The anode material selection for electrospark alloying (ESA) and mass transition phenomena / Zahid Ziyadkhan Sharifov, Farid Gurbanov // The international journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation / Azerbaijan State Marine Academy, Baku, 2017 – Volume 11 – № 4 – pages 623–626.
5. Іващенко Є.В. Вплив послідовності нанесення Cr, C, Al в процесі електроіскрового легування на структуру та властивості поверхневих шарів сталі ХВГ / Є.В. Іващенко [та ін.] // Збірник тез доповідей Міжнародної наукової конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 12, 15 – 16 грудня 2022 р, м. Київ, Україна. – С. 30.
6. Герук С.М. Підвищення зносостійкості робочих поверхонь технологічної оснастки методом електроіскрового легування С.М. Герук, Ю.М. Држевецький, П.П. Федірко Тези доповідей студентів та магістрантів на II Всеукраїнській студентській науково-практичній конференції “Підвищення надійності машин і обладнання” 10 квітня 2008 року.– Кіровоград: КДТУ, - 2008.– С.38-41.

7. Mihailov V. Synthesis of multicomponent coatings by electrospark alloying with powder materials / V.Mihailov, N. Kazak, S. Ivashcu, E. Ovchinnikov, C. Baciuc, A.Ianachevici, R. Rukuiza, A.Zunda // *Coatings*. –2023. – 13(3). – P. 651.
8. Zhengchuan Z. A review of the electro-spark deposition technology / Z. Zhengchuan, L.Guanjun, I.Konoplianchenko, V. B.Tarellyk, G.Zhiqin, D. Xin // *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*. – 2022.- 44.- P. 45-53.
9. Ковришкін М. О. Методи формування покриттів на різальному інструменті / М. О. Ковришкін, О. В. Шевченко, С. О. Довжук // *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація* / Кіровоградський національний технічний університет, 2010 – Вип. 23. – С. 344–351.
10. Биченко М. М., Перспективи застосування електроіскрового легування для підвищення якості робочих поверхонь деталей машин. Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали та програма VI Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 16–19 квітня 2019 р.). Суми : Сумський державний університет, 2019. С. 108– 109.
11. Vitureanu P. Advanced Electro-Spark Deposition Process on Metallic Alloys / Petrică Vitureanu, Manuela-Cristina Perju, Dragoș-Cristian Achiței // *Advanced Surface Engineering Research*. – 2018. – 3. Url: <https://www.intechopen.com/chapters/62514>.
12. Іващенко Є.В. Вплив послідовності нанесення Cr, C, Al в процесі електроіскрового легування на структуру та властивості поверхневих шарів сталі ХВГ / Є.В. Іващенко [та ін.] // *Збірник тез доповідей Міжнародної наукової конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 12, 15 – 16 грудня 2022 р, м. Київ, Україна*. – С. 30.
13. Балахонова Н.О. Формування покриттів на сталі Ст.3 електроіскровим легуванням титаном, алюмінієм та графітом / Н.О. Балахонова [та ін.] // *Збірник тез доповідей Міжнародної наукової*

конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 12, 15 – 16 грудня 2022 р, м. Київ, Україна. – С. 2.

14. Лобачова Г.Г. Створення багатокомпонентних покриттів на сплавах заліза пошаровим електроіскровим легуванням перехідними металами / Г.Г. Лобачова, Є.В. Іващенко, О.В. Бовсунівський // Матеріали VII науковотехнічної конференції молодих вчених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології», 22 – 24 травня 2013 г., Київ Україна. – С. – 109.

15. Іващенко Є.В. Формування зносостійких зміцнених покриттів на поверхні сталі Ст. 3 послідовним електроіскровим легуванням хромом та міддю в інертному середовищі та на повітрі / Є.В. Іващенко, Г.Г. Лобачова, О. В. Вознюк // Проблеми тертя та зношування. - 2018. - № 2. - С. 72-77. - Режим доступу:[http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ptz\\_2018\\_2\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ptz_2018_2_10).

16. Іващенко Є.В. Формування функціональних покриттів на сталі 45, одержаних пошаровим електроіскровим легуванням хромом, нікелем, алюмінієм та графітом / Є.В. Іващенко [та ін.] // Збірник тез доповідей V Міжнародної наукової конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 5». 3 -5 грудня 2015 р., м. Київ, Україна. – С. 140.

17. Лобачова Г.Г. Формування покриттів на залізі багаторазовим електроіскровим легуванням алюмінієм та графітом / Г.Г. Лобачова, Ю.М. Сікорський // Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів: Зб. тез доп. Восьмої міжнар. конф. студентів, аспірантів та молодих вчен., Київ, 23–24 квіт. 2015 р. – С. 79.

18. Лобачова Г.Г. Функціональні характеристики поверхні сталі Ст.3 після послідовного багатостадійного електроіскрового легування хромом та нікелем / Г.Г. Лобачова [та ін.] // Збірка тез доповідей Дев'ятої міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів», 14 – 15 квітня 2016 р., Київ, Україна. – С. 27.

19. Глущенко О.О. Обґрунтування використання Cr та Al для електроіскрового легування сталі ХВГ / О.О. Глущенко, Є.В. Іващенко // XVII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», 07-08 грудня 2021 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна .-С.-73-76.

20. Тарельник Н.В., Спосіб нанесення покриття на поверхні деталей з нержавіючої сталі насосного обладнання АЕС / Н.В. Тарельник, О.П. Гапонова // Патент України на корисну модель №UA 159072 U

21. Gaponova O. P., Aluminizing of Metal Surfaces by Electric Spark Alloying, Progress in Physics of Metals, / O. P. Gaponova, N. V. Tarelnyk, and O. M. Myslyvchenko // 24, No. 2: 282-318 (2023); <https://doi.org/10.15407/ufm.24.02.282>].

22. Характеристика матеріалу Ст3 [Електронний ресурс] // Марочник стали и сплавов. - Режим доступу: [http://www.splavkharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=348](http://www.splavkharkov.com/mat_start.php?name_id=348).

23. Центр колективного користування науковим обладнанням «Матеріалознавство тугоплавких сполук та композитів» [Електронний ресурс] - Режим доступу <https://imz.kpi.ua/uk/32-katehoriia-uk-ua/nauka/114-materialoznavstvo-tugoplavkikh-spoluk-ta-kompozitiv.html>.

24. ДСТУ ISO 6507-1:2007 Матеріали металеві. Визначення твердості за Вікерсом. Частина 1. Метод випробування (ISO 6507-1:2005, IDT).

25. Холявко В.В. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів / В.В. Холявко, І.А. Владимирський, О.О. Жабинська. – К. : Центр учбової літератури, 2016. – 156 с.

26. Сучасні експериментальні методи аналізу низькорозмірних структур: лабораторний практикум [текст] : навч. посіб. для студ. Спеціальності 132 «Матеріалознавство», освітньої програми «Інжиніринг та комп'ютерне моделювання в матеріалознавстві» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: М.В. Карпець, С.І. Сидоренко, А.П. Бурмак. – 2021.

27. Корозія та захист металів від корозії : метод. вказ. до виконання лаб. робіт для студ. напрямів підг. 6.051701 – Харчові технології та інженерія; 6.050502 – Інженерна механіка; 6.050503 – Машинобудування / уклад.: І. А. Костенко, В. М. Челябієва. – Чернігів : ЧНТУ, 2014. – 50 с.

28. Охорона праці та цивільний захист [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальностей 132 «Матеріалознавство» та 136 «Металургія» / О. Г. Левченко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 26,1 Кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 337 с.

29. Розділ з охорони праці в дипломних роботах: Рекомендації до виконання [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра спеціальностей 132 «Матеріалознавство» та 136 «Металургія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О.Г. Левченко, Г.В. Демчук. – Електронні текстові дані (1 файл: 90,9 Кбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 16 с.

30. Гігієнічні регламенти хімічних речовин у повітрі робочої зони, N 741/35024 від 03.08.2020 р.

31. Червінський Л.С. Електричне освітлення та опромінення: методичні вказівки до виконання курсової роботи для студентів факультету енергетики та автоматики / Л. С. Червінський, Others. – К. : Вид. центр НУБіП України, 2014. – 59 с

32. Громадський Ю.С. ДБН В.2.5–28–2006 – Природне і штучне освітлення.

33. 4.ДБН В.2.5–28–2006 – Природне і штучне освітлення

34. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці / В.Ц. Жидецький, В.С. Джигирей, О.В. Мельников. – Львів : Афіша, 2000. – 348 с.

35. ТУ Б В.1.1–36:2016 – Визначення категорій приміщень, будинків, установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

36. ПУЕ–86 – Правила улаштування електроустановок.