

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет
(повне найменування інституту, факультету)

Обладнання і технологія зварювального виробництва
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему «Дослідження роботи напилених графітованих електродів для руднотермічних печей з проектування ділянки для напилення»

Виконав: студент(ка) 6 курсу, групи ІФ-310м

Спеціальності 131 Прикладна механіка
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
Технологія та устаткування зварювання

Кідун Р. А.
(прізвище та ініціали)

Керівник Биковський О.Р.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Гнатенко М.О.
(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет ФТІ, ІФФ
 Кафедра ОТЗВ
 Ступінь вищої освіти магістр
 Спеціальність 131 «Прикладна механіка»
(код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Технологія та устаткування зварювання
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри **ОТЗВ**
проф. Овчинников О. В.
 « 9 » листопада 2021 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА
Кідун Роман Андрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Аналіз роботи захисного покриття графітованих електродів для руднотермічних печей з проектуванням дільниці»

керівник проєкту (роботи) Биковський Олег Григорович, д.т.н., проф.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 7 » листопада 2021 року № 499

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) _____

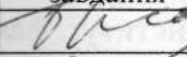
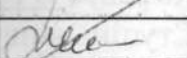
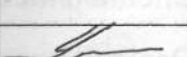
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Технологія нанесення захисного покриття методом плазмового напилення графітованих електродів марки ЕГ

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ; 1 Призначення, конструкція та принцип дії печей виробництва електрокорунду; 2 Умови роботи електродів, причини виходу їх з ладу; 3 Способи підвищення працездатності електродів; 4 Аналіз захисних властивостей покриття АК-5; 5 Технічні умови на напилення; 6 Технологія та техніка напилення; 7 Дослідження роботи захисного покриття; 8 Техніко-економічні розрахунки; 9 Охорона праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях; Висновки; Перелік посилань

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

1) Схема ПІП на умови роботи зварівки, електрод; 2) Технологія нанесення покриття на електрод; 3) Перелік технічних умов з покриттям на електрод; 4) Розрахунок витрати з електроду в залежності від параметрів; 5) Креслення аналітичного зварівки електроду в залежності від параметрів; 6) Замовлення зварівки, умови, від часу та параметрів; 7) Схема умов роботи на електроді; 8) Планування, зварівки, умови, від часу та параметрів; 9) Схема умов роботи на електроді.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
5;6	Биковський О.Г., д.т.н., професор	26.09.21	
8	Круглікова В.В., к.е.н., доцент	26.09.21	
9	Нестеров О.В., к.т.н., доцент	26.09.21	

7. Дата видачі завдання « 26 » вересня 2021 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вступ	10.09.21	Виконав
2	Призначення, конструкція та принцип дії печей виробництва електрокорунду	22.09.21	Виконав
3	Умови роботи електродів, причини виходу їх з ладу	05.10.21	Виконав
4	Способи підвищення працездатності електродів	18.10.21	Виконав
5	Аналіз захисних властивостей покриття АК-5	25.10.21	Виконав
6	Технічні умови на напилення	01.11.21	Виконав
7	Технологія та техніка напилення	05.11.21	Виконав
8	Дослідження роботи захисного покриття	15.11.21	Виконав
9	Техніко-економічні розрахунки	20.11.21	Виконав
10	Охорона праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях	25.11.21	Виконав
11	Висновок	29.11.21	Виконав
12	Перелік посилань	30.11.21	Виконав

Студент

(підпис)

Кідун Р.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Биковський О.Г.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт містить: 111 с., 42 рис., 26 табл., 2 додатки, 52 джерела.

ГРАФІТ, ЗМОЧУВАННЯ, ПЛАЗМОВЕ НАПИЛЕННЯ, ПОРИ, ПРОСОЧЕННЯ, ОКСИД АЛЮМІНІЮ, АК-5, ГРАФІТОВАНИЙ ЕЛЕКТРОД, ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНА КОРОЗІЯ, ЗАХИСТ.

Об'єкт дослідження – нанесення захисного покриття на поверхню графітованого електроду методом плазмового напилення.

Предмет дослідження – робота захисного покриття в межі температурного інтервалу електроду.

Мета дослідження – аналіз видів та способів нанесення захисних покриттів на графітований електрод, визначення їх стійкості до високотемпературної корозії, зміну фазового стану та можливості просочення до порового простору графіту.

Методи дослідження – аналіз можливості просочення захисного покриття до порового простору графіту шляхом використання дослідницьких даних згідно вибраної теми; моделювання процесу при використанні програм типу САЕ та математичного методу; проведення експериментальних робіт за для перевірки теоретичного розрахунку; обробка та аналізування здобутих результатів.

Обрано оптимальний спосіб нанесення захисного покриття на графітований електрод методом плазмового нанесення струмоведучим дротом марки АК-5, визначено параметри режиму напилення.

Теоретично змодельований процес розтікання та просочення захисного покриття (Al_2O_3) до порового простору графіту. Експериментально визначений

крайовий кут змочування оксиду алюмінії на графітованій підкладці, а також глибину його залягання.

Розроблено план ділянки для нанесення захисного покриття на електроди. Визначено задовільні економічні показники обраного способу захисту електродів.

ABSTRACT

Thesis project contains: 111 pages, 42 figures, 26 tables, 2 appendices, 52 references.

GRAPHITE, WETTING, PLASMA SPRAYING, PORES, IMPREGNATION, ALUMINUM OXIDE, AK-5, GRAPHITE ELECTRODE, HIGHLIGHT.

The object of research is the application of a protective coating on the surface of the graphitized electrode by plasma spraying.

The subject of research is the work of the protective coating within the temperature range of the electrode.

The purpose of the study is to analyze the types and methods of applying protective coatings on the graphite electrode, determining their resistance to high temperature corrosion, phase change and the possibility of impregnation to the pore space of graphite.

Research methods - analysis of the possibility of impregnation of the protective coating to the pore space of graphite through the use of research data according to the selected topic; process modeling using CAE type programs and mathematical method; conducting experimental work to verify the theoretical calculation; processing and analysis of the obtained results.

The optimal method of applying a protective coating on the graphite electrode by the method of plasma application with a current-carrying wire of the AK-5 brand is selected, the parameters of the sputtering mode are determined.

The process of spreading and impregnation of the protective coating (Al_2O_3) to the pore space of graphite is theoretically modeled. The edge wetting angle of alumina on a graphite substrate, as well as the depth of its occurrence have been experimentally determined.

A site plan for applying a protective coating on the electrodes has been developed. Satisfactory economic indicators of the chosen method of electrode protection are determined.

ЗМІСТ

Вступ.....	10
1 Призначення, конструкція та принцип дії печей для виробництва електрокорунду	11
2 Умови роботи електродів, причини виходу їх з ладу.....	14
3 Способи підвищення працездатності електродів	20
3.1 Нанесення покриття тиском в автоклаві	22
3.2 Нанесення покриття осадження в вакуумній камері.....	23
3.3 Плазмове нанесення покриттів.....	25
3.4 Вибір способу нанесення покриття.....	27
4 Аналіз захисних властивостей АК-5	29
5 Технічні умови на напилення	33
5.1 Технічні умови до вихідної заготовки.....	33
5.2 Технічні умови до дроту	34
5.3 Технічні умови до плазмоутворюючого газу.....	34
5.4 Технічні умови до транспортуючого газу	35
6 Технологія та техніка напилення.....	36
6.1 Вибір параметрів режиму плазмового напилення.....	36
6.2 Технологія та техніка нанесення захисного покриття	37
6.3 Контроль якості захисного покриття	38
7 Дослідження роботи захисного покриття.....	40
7.1 Дослідження температурного поля електроду.....	40
7.2 Дослідження графітової пластини в якості електрода.....	42
7.3 Порівняльний аналіз пластин з покриттям і без нього	45
7.4 Дослідження роботи алюміній-мідного покриття.....	48
7.5 Досліджування змочування графіту оксидом алюмінію	50
7.6 Аналіз просочення рідкої фази Al_2O_3 в поровий простір електроду	53

8 Техніко-економічні розрахунки.....	59
8.1 Технічне нормування операцій.....	63
8.1.1 Розрахунок кількості обладнання, площі ділянки	66
8.1.2 Розрахунок чисельності персоналу ділянки	68
8.2 Планування витрат на виробництво.....	70
8.2.1 Матеріальні витрати	70
8.2.2 Вартість основних засобів.....	71
8.2.3 Розрахунок фонду оплати праці	73
8.2.4 Собівартість виробу.....	75
8.2.4.1 Прямі витрати.....	75
8.2.4.2 Непрямі витрати.....	77
8.3 Економічне обґрунтування запропонованих розробок.....	82
8.3.1 Розрахунок економічного ефекту.....	82
8.3.2 Ефективність та результативність.....	83
8.4 Висновки по розділу техніко-економічні розрахунки	85
9 Охорона праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях	86
9.1 Аналіз потенційних небезпек	86
9.2 Заходи забезпечення безпеки.....	88
9.3 Заходи забезпечення виробничої санітарії.....	92
9.4 Заходи безпеки під час надзвичайних ситуацій.....	98
Висновки	100
Перелік джерел посилання.....	103
Додаток А.....	109
Додаток Б	111

ВСТУП

Графітовані електроди знаходять своє широке застосування в галузях промисловості зі складними технологічними процесами, пов'язаними з підвищеними температурами. Найчастіше їх використовують при виплавці сталей, спеціальних сплавів, феросплавів, керамік з використанням руднотермічних, сталеплавильних, рафінувальних та інших електродугових печей.

У процесі виплавки сировини, електроди поступово зношуються внаслідок високотемпературної корозії. Вигорання графіту провокує зміну поперечного перерізу електроду, що в свою чергу збільшує споживання електроенергії для підтримання струмового навантаження режиму виплавки. Витрати на закупку нових електродів сягають третину від загальної вартості матеріалів. Тому дослідження способів зменшення впливу окислення графітованих електродів першочергово ставить на меті збереження суцільного перерізу, що призводить до підвищення строку експлуатації, чистоти сировини; зменшення виробничої собівартості готової продукції.

Сутність даної роботи полягає в пропозиції способу нанесення захисного покриття для графітованого електроду технологією плазмового напилення струмоведучим дротом. Аналіз його роботи при впливі високотемпературної корозії, здатності стримувати окислення та розрахунок економічного ефекту від застосування обраної технології.

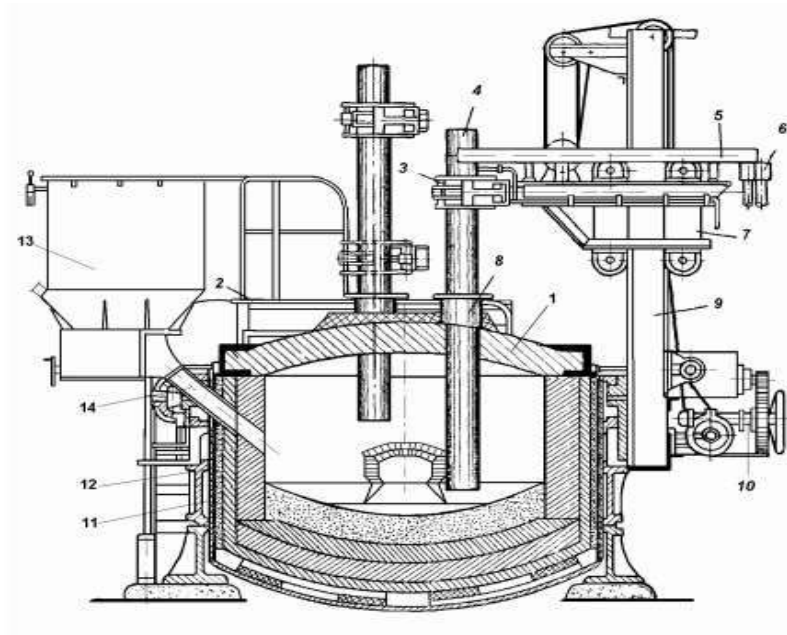
1 ПРИЗНАЧЕННЯ, КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРИНЦИП ДІЇ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОКОРУНДУ

Електрокорунд – штучний абразивний матеріал, до складу якого входить переважно закристалізований глинозем (Al_2O_3) в формі α -фази (корунду), а також оксиди кремнію, титану, кальцію та заліза. Щільність електрокорунду від $3,9 \text{ г / см}^3$, мікротвердість від 19 ГН / м^2 до 24 ГН / м^2 .

Залежно від змісту глинозему і особливостей технології плавки розрізняють, відповідно до ГОСТ 28818-90, кілька різновидів електрокорунду [1]:

- Електрокорунд нормальний (12А, 13А, 14А, 15А):
 - Щільність – від $3,85 \text{ г / см}^3$ до $3,95 \text{ г / см}^3$. Мікротвердість – від 18,9 ГПа до 19,6 ГПа;
- Електрокорунд білий (22А, 23А, 24А, 25А):
 - Щільність – від $3,90 \text{ г / см}^3$ до $3,95 \text{ г / см}^3$. Мікротвердість – від 19,6 ГПа до 20,9 ГПа;
- Електрокорунд хром-титановий (95А);
- Електрокорунд цирконієвий (38А):
 - Щільність – від $4,05 \text{ г / см}^3$ до $4,15 \text{ г / см}^3$. Мікротвердість – від 22,6 ГПа до 23,5 ГПа.

Отримують плавкою глиноземомістної сировини безперервним способом в дугових печах (в залежності від того, які вимоги висувають до матеріалу, корунд плавлять або в руднотермічній печі (рисунок. 1.1), або в перекидній) з подальшою кристалізацією розплаву при температурі не менше $2050 \text{ }^\circ\text{C}$. Так як електрокорунд отримують в електродугових печах, то в зв'язку зі способом отримання цього корундового матеріалу з залученням електроенергії, а саме – теплового ефекту електричної дуги в процесі плавки, в назві штучного корунду присутня добавка «електро» [2].



1 – звід; 2 – майданчик для обслуговування електродів; 3 – електродотримачі;
 4 – електрод; 5 – струмопідвід; 6 – башмаки гнучкою частини струмопідводу;
 7 – каретка; 8 – ущільнююче кільце; 9 – стійка; 10 – привід переміщення
 електрода з тросовою передачею; 11 – кожух печі; 12 – футерування;
 13 – бункер; 14 – тічка

Рисунок 1.1 – Конструкція руднотермічної печі

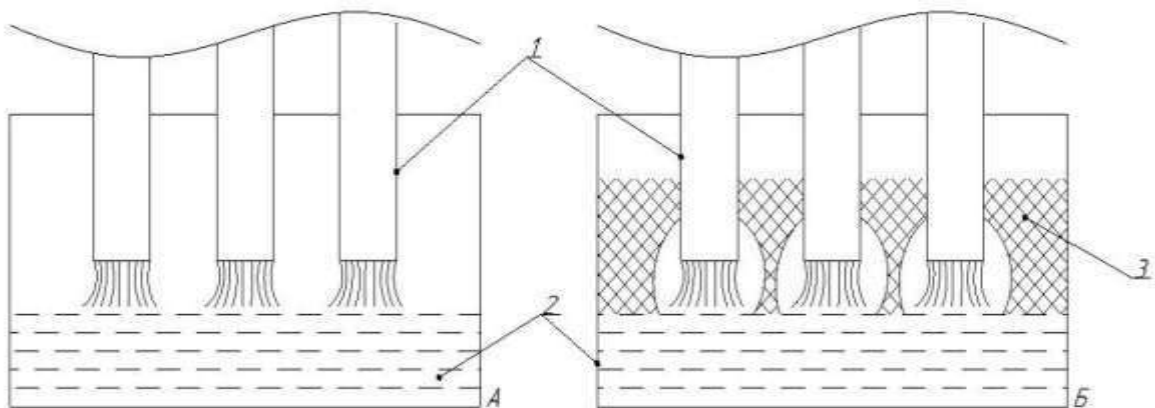
РТП працює за наступним принципом: в ході завантаження печі, звід 1 знімається і шихту засипають всередину; електрод 3 в цей час знаходиться в крайньому піднятому положенні; далі відбувається закриття печі і опускання електрода в робоче положення; пуск відбувається через закорочення шихти; елементи управління електродом знаходяться на стійці 9, на якій розташовані: каретка 8, яка піднімає і опускає електрод, струмопідвід 5, який проводить струм і привід переміщення 10; подальшу підсіпку шихти здійснюють через тічку 14, яка знаходиться в бункері 13.

Споживання енергії, при плавлі нормального електрокорунду становить – 2800 кВт год / т.

Перетворення електро- енергії в теплову в РТП відбувається не тільки в дуговому проміжку, але й за рахунок проходження струму через

електропровідний шар шихти або електропровідний розплав. Водночас варто зазначити, що конструкція РТП наближена до конструкції дугових печей, в зв'язку з чим їх зручно розглядати як дугові установки [3].

Рудотермічні установки можна розділити на печі з відкритою дугою (рисунок. 1.2 а), печі із закритою дугою (рисунок. 1.2 б) та печі опору. Автором [3] було запропоновано позначати частку електроенергії, що поглинається контактним проміжком між електродом і шихтою (розплавом) – p . Частку енергії, що поглинається шлаком (розплавом) або шихтою – q . Таким чином робота виключно в дуговому режимі може бути описана як $q \approx 0, p \approx 1$. Нагрівання опором – $q \approx 1, p \approx 0$. Змішаний тип нагріву $q \neq 0, p \neq 0$. Процеси з відкритою дугою – $q \approx 0, p \approx 1$, характеризуються розвиненим дуговим розрядом, палаючим між електродом і розплавом металу. Частка енергії, що виділяється на опір розплавленого металу мізерно мала.



1 – електрод;

2 – розплавлений метал;

3 – шихта

а – з відкритою дугою;

б – з закритою дугою

Рисунок 1.2 – Режим роботи електрода

2 УМОВИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДІВ, ПРИЧИНИ ВИХОДУ ЇХ З ЛАДУ

Графітовані електроди для дугових печей призначені (рисунок. 2.1) для кондукційного підведення електричного струму до дуг. Залежно від величини питомого електричного опору ρ , сировини та захисних властивостей розрізняють графітові електроди марок:

- ЕГ – виробляється на основі нафтового коксу та зв'язуючого пеку;
- ЕГП – додатково просочуються пеком;
- ЕГС – виробляється на основі голчастого коксу;
- ЕГСП – на базі голчастого коксу та з посиленням просоченням пеку.

Сорт з літерою «А» виготовляють із застосуванням хімічно активних речовин, що впливають на процес графітизації, що дозволяє збільшити допустиму середню щільність струму на 15 %.



Рисунок 2.1 – Графітовані електроди

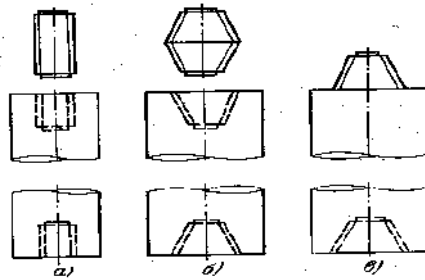
Таблиця 2.1 – Основні властивості графітованих електродів [4]

Характеристика	Показники
Об'ємна маса, кг / м ³	від 1550 до 1600
Щільність, кг / м ³	2200
Межа міцності на стиск, Н / м ²	від 21 · 10 ⁶ до 28 · 10 ⁶
Межа міцності на розтяг, Н / м ²	від 5 · 10 ⁶ до 8,5 · 10 ⁶
Коефіцієнт теплопровідності, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{C}^{-1}}$: При 20 °С При 1000 °С	150 115
Початок окислення на повітрі, °С	427
Електричний питомий опір, 10 ⁻⁵ Ом · м	від 8 до 13
Середня теплоємність, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$	1,6
Середні витрати на 1000 кВт · год в ДСП, кг	від 7 до 10
Коефіцієнт теплового лінійного розширення, $\alpha \cdot 10^{-6}$, (1 / °К) [5]	8

Основною перевагою графітованих електродів є їх менший питомий електричний опір, d_e – від 75 мм до 600 мм, ρ_e – від $10 \cdot 10^{-6}$ Ом · м до $13 \cdot 10^{-6}$ Ом · м з щільністю струму від 34 А / см² до 15 А / см². Це дозволяє застосовувати електроди меншого діаметра в порівнянні з вугільними та самоспеченими, що полегшує конструкцію стійок, кареток і електродотримачів, зменшує електричні втрати в електродах.

Сучасні безперервно нарощувані електроди мають круглий перетин і оброблені на верстатах торці, в яких по осі електроду зроблені отвори з різьбленням. В отвори на половину довжини вгвинчують ніпелі, зазвичай виготовлені з того ж матеріалу, що і електроди. Ніпелі і отвори для них можуть

бути циліндричними (рисунок. 2.2 а), та біконічними (рисунок. 2.2 б) з трикутної або трапецеїдальною різьбою.



а – циліндричні ніпелі; б – біконічні ніпелі; в – конічні ніпелі

Рисунок 2.2 – Секція безперервно нарощуваних електродів з ніпелями [3]

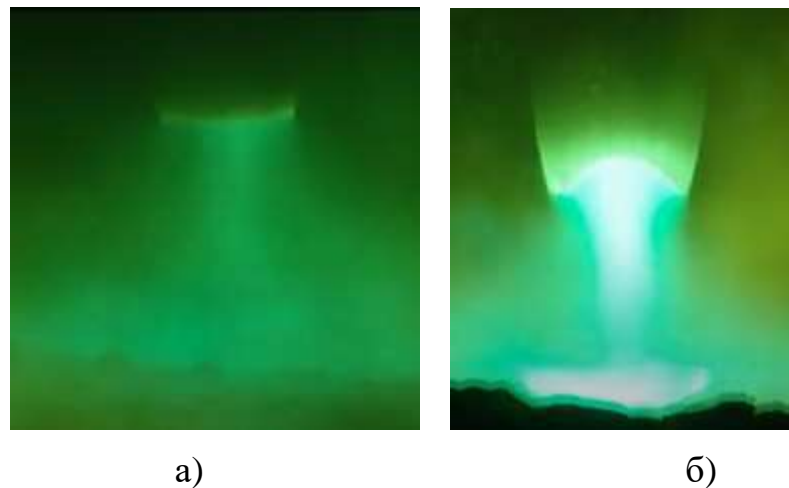
На виступаючу, з торця електрода, половину ніпеля нагвинчують наступний, так, що обидва складають один цілnozвинчений електрод або «електродну свічку».

Для зручності транспортування та експлуатації електроди виготовляють довжиною від 1000 мм до 2400 мм; якщо потужність печі потребує більшу довжину, то працюючий електрод складається з двох або трьох секцій, з'єднаних ніпелями.

У міру обгорання нижньої частині електрода, електродотримачі опускається все нижче і коли він перебуває поблизу свого нижнього положення у склепінні, проводять його нарощування і перепуск. На печах малої потужності ця операція може здійснюватися на самій печі. Недоліком методу нарощування електродів на печі являються важкі умови роботи і легкість поломки ніпеля. Тому на печах великої потужності, в зв'язку зі збільшенням маси та ваги, нарощування і перепуск електроду ведуть шляхом заміни використаного електроду на новий. Після охолодження старого електроду, на спеціальній стійці, проходить його нарощування. Недоліками цього методу є трохи більше окислення електродів в період їх остигання в стійці завдяки вільному доступу до них повітря і необхідність в більшій висоті підйомного крюка крана. В даний час для нарощування електродів великих діаметрів

розроблена механізована стійка, в якій затискання, переміщення і загвинчування електродів здійснюється за допомогою гідравлічного і електромеханічного приводів.

Крім описаних електродів суцільного перетину в ряду випадків доцільно застосування трубчастих (порожнистих) електродів (рисунок 2.3), які підвищують стійкість горіння дуги, послаблюють її видування з-під торця електроду, що в кінцевому рахунку покращує теплову роботу футерування. Раціональне співвідношення між діаметрами отвору і електроду складає від 0,2 до 0,25 [4].

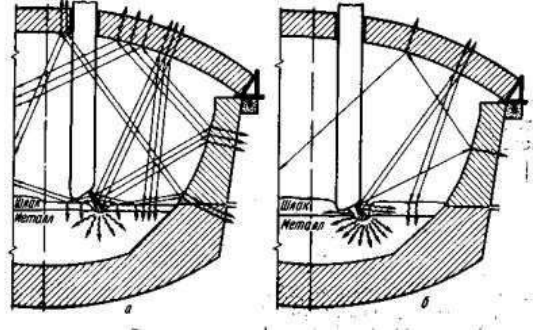


а – в суцільному електроді; б – в трубчастому електроді

Рисунок 2.3 – Робота дуги в електроді

Виходячи з вище означених факторів, рудотермічні печі в більшості працюють за змішаним типом. При цьому співвідношення між частками q і p може змінюватися в рамках одного процесу в різні періоди плавки. Наприклад, при плавці електрокорунду на «блок» в піч постійно закидається шихта, яка обволікає електроди (рисунок 2.3). Розплавлений Al_2O_3 кристалізується на дні печі і постійно збільшується в розмірі, до тих пір, поки не заповнить основну її частину. При виплавці корунду на випуск, розплавлену сировину зливають через лютку і до кінця плавки між електродом і рештою розплавом встановлюється електрична дуга.

Розподіл температури по довжині робочого електроду складає від 4000 °С до 4500 °С, в катодній області від 2000 °С до 4000 °С внаслідок замкнутого простору печі та направленою непрямого (рисунок 2.4 а) та прямого (рисунок 2.4 б) радіаційного теплообміну.



а – непрямий теплообмін; б – прямий теплообмін

Рисунок 2.4 – Види радіаційного теплообміну [4]

Дані види теплообміну залежать від вибору довжини дуги. Так непрямий направлений теплообмін характеризується наявністю довгої дуги, малою кількістю шлаку та екрануванню теплоти від дзеркала розплавленого металу. При непрямому теплообміну довжина дуги завжди коротка, а електрод частково занурений в шлак, даний теплообмін характеризується меншим зношенням футерування [4].

В зоні від струмопідводу до колосника печі температура складатиме від 120 °С до 2000 °С, рисунок 2.5 [6].

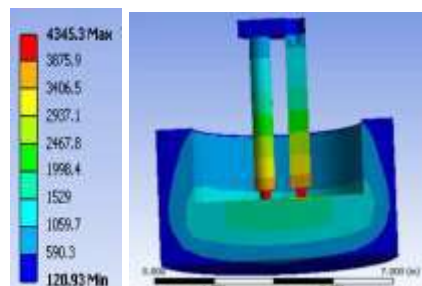


Рисунок 2.5 – Розподіл температурного поля робочого електроду [6]

Згідно ДСТУ 4494:2005 [7] виділяється два основних види зношування:

- безперервно рівномірні витрати в результаті торцевого і бічного зношування електродів
- стрибкоподібне збільшення витрат в результаті втрат від механічного руйнування.

Механічні поломки переважно пов'язані з обваленням шихти і наявністю під електродами погано струмопровідних шматків шихти при розплаві.

Термічні руйнування електродів обумовлене перевищенням струмових навантажень щодо рекомендованих (допустимих).

Бічне зношування обумовлене окисленням поверхні електроду при високій температурі.

Таблиця 2.2 – Основні види втрат графітованих електродів [8]

Вид втрат	Звичайні ДСП, %	Надпотужні ДСП, %
Ерозія торців електродів	15 – 30	50
Окислення з бічної поверхні	55 – 75	40
Поломки електродів і огарки	10 – 20	10

На основі отриманих даних з таблиці 2.2 маємо, що основним зношування графітованих електродів є окислення бічної поверхні, на яке приходить від 55 % до 75 % для звичайних ДСП та 40 % для надпотужних ДСП. Вищий відсоток втрат від окислення у звичайних ДСП обумовлений використанням стандартних електроді ЕГ, в яких відсутнє додаткове просочення пеком.

3 СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЕЛЕКТРОДІВ

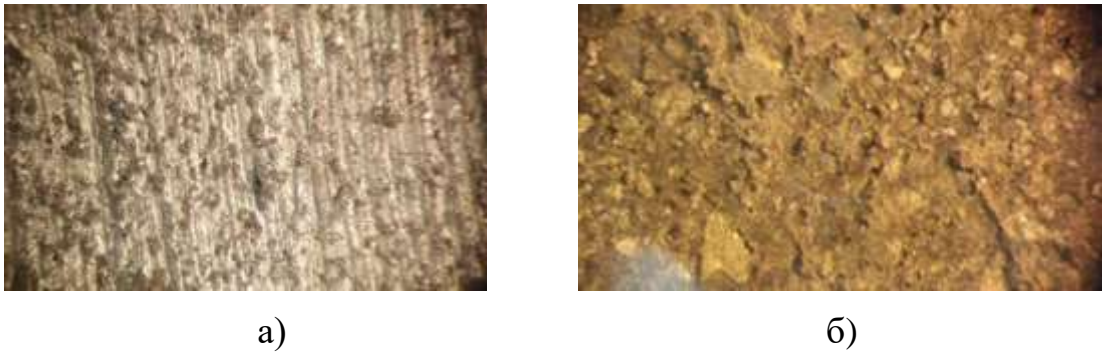
Основною причиною виходу електродів з ладу є їх бічне зношування, пов'язане з пористістю штучних графітів. Воно має аномальні швидкості окислення при взаємодії з газами при високих температурах. Початок окислення на повітрі починається при температурі 427 °С. Дане явище обумовлене не тільки окисненням вуглецю, а й втратою зв'язуючого. Максимальна швидкість окислення досягає при 1300 °С, мінімальна при 2200 °С з подальшим різким зростанням. При температурі 2200 °С виявляється ефект дифузії вуглецю з об'єму твердого тіла до поверхні – графітизація [9].

Таблиця 3.1 – Коефіцієнт самодифузії до вуглецю в залежності від температури твердого тіла дорівнює [9]:

T, °С	2600	2800	2900	3000
$K \cdot 10^{-7}, \text{м}^2 / \text{с}$	2,24	4,54	6,78	8,0

Однак при досягненні 2400 °С параметри тіла частково відновлюються. Це пов'язано з дифузією вуглецю, так як переходячи до бічної поверхні, вуглець злегка відновлює свою геометрію. У дослідах [10] відзначено, що середній радіус пор графіту марки ГМЗ при просочуванні, відпалі до 1000 °С і подальшої графітизації змінюється в інтервалі 3,7 нм – 4,2 нм – 3,7 нм.

Подальше збільшення швидкість окислення при температурі пов'язана зі збільшенням радіуса пор графіту. Так готовий електрод має радіус пор від 2,3 мкм до 5,6 мкм (рисунок 3.1 а), а при температурі 900 °С пори збільшуються до 150 мкм (рисунок 3.1 б).



а – невідпалений; б – відпалений

Рисунок 3.1 – Поверхня графіту, х 50

Також при окислюванні, графіт втрачає масу, це підтверджується дослідженнями [11], при температурі в 400 °С, часу витримки 50 год втрачається не більше 0,2 мг / см². При підвищенні температури до 600 °С істотно збільшується окислюваність яка становить від 5 мг / см² до 45 мг / см². Підвищення до 800 °С призводить до значної втрати маси (рисунок 3.2). Виходячи з отриманих даних, видно, що найбільше до втрати маси схильні до графіти з дрібною зернистістю (графіт марки МПГ і АРВ).

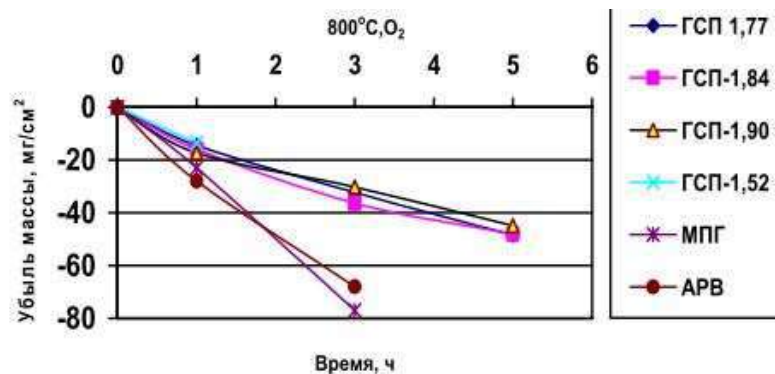
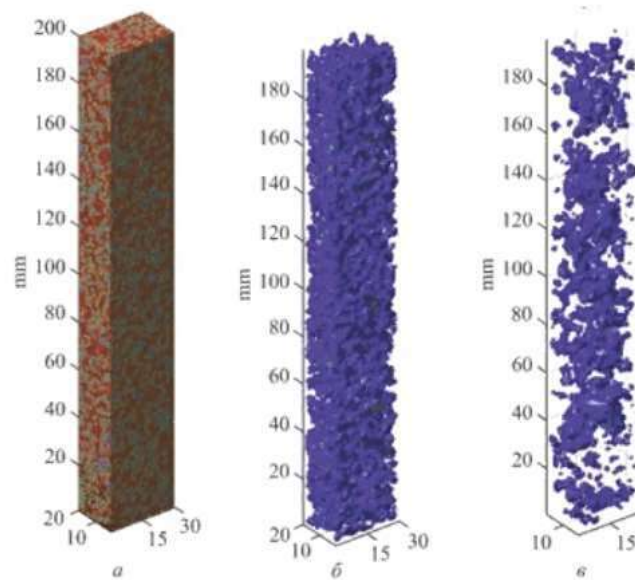


Рисунок 3.2 – Кінетика окиснення графіту в кисні при 800 °С протягом 10 годин [11]

Також варто доповнити, що при втраті маси відбувається порушення геометричних показників, які при досяганні критичних значень можуть втратити свої експлуатаційні характеристики. Так в роботі [12] (рисунок. 3.3) розраховано моделювання окислення графіту марки ГМЗ (графіт малозольний)

при температурі 560 °С та концентрацією O_2 в 10 %. Дослідження показали, що в першу чергу до окислення більш схильний кам'яний пек виступаючий в ролі зв'язуючого.



а – початкові умови; б – через 20 діб; в – через 30 діб

Рисунок 3.3 – Окислення зразку графіта ГМЗ при температурі 560 °С та концентрації кисню 10 % [12]

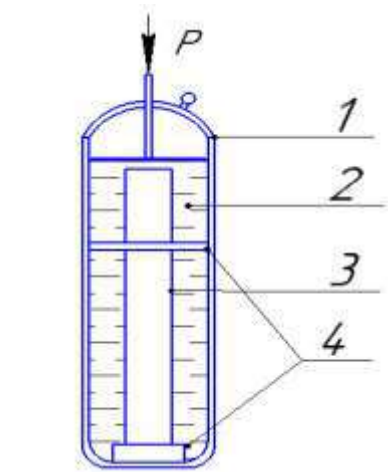
Отже, головним завданням для запобігання окислювальних процесів є формування захисного покриття, яке буде перешкоджати взаємодії кисню з графітом, шляхом закупорювання пор і неможливістю проникнення O_2 в більш глибокі шари. Таким чином електрод зберігає поперечний переріз, що сприяє збереженню заданої щільності струму.

3.1 Нанесення покриття тиском в автоклаві

Основним методом формування захисного покриття є обробка тиском [13-15]. Суть даного способу полягає в зануренні електроду в металевий

розплав і навантаженням його тиском в автоклаві або вакуумі, рисунок 3.4. Для підвищення захисних властивостей застосовують термообробку готового виробу. З переваг слід відзначити: більш глибоке просочення, що в свою чергу збільшує зчеплення з виробом; недопущення окислення матеріалу просочення, так як оксиди MeO є більш тугоплавким в порівнянні з чистими Me ; рівний шар покриття, який забезпечує монолітну структуру.

Головним недоліком даної технології є її багатоступеневість. Так для отримання захисного покриття потрібно: приготувати розплав, завантажити електроди в спеціальних стійках, отримати тиск в автоклаві та додатково нагріти для видалення надлишку Me в відновлювальному середовищі. Це потребує серйозних витрат електроенергії, часу і додаткового обладнання [13].



1 – автоклав; 2 – металевий розплав; 3 – електрод; 4 – стійки для електрода

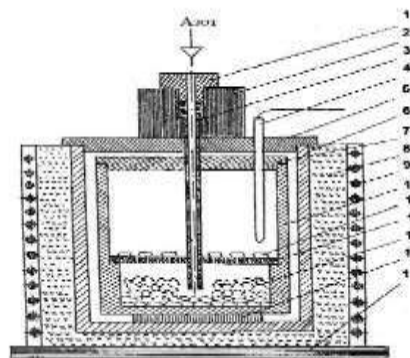
Рисунок 3.4 – Схема просочення електродів в автоклаві

3.2 Нанесення покриття осадженням в вакуумній камері

Даний спосіб активно використовується для силіціювання графітованих виробів. Отримують матеріал обробкою різних марок пористого графіту розплавом кремнію або його парами [16], рисунок 3.5. При цьому відбувається

інфільтрація атомів кремнію всередину пор заготовки. При температурі вище 1600 °С відбувається хімічна реакція, в результаті якої утворюється карбід SiC, але певна кількість вуглецю і не прореагованого кремнію зберігається в чистому вигляді. По завершенні процесу виходить високотверда корозійно і ерозійностійка кераміка щільністю від 2,1 г / см³ до 3 г / см³. Карбід кремнію дає жароміцність і жаростійкість, а графіт – стійкість до багаторазових перепадів температури.

Для просочення використовують камери вакуумного або індукційного нагріву, що вимагає додаткових витрат по ресурсам. Так само слід зазначити недостатню можливість опору температурі, так SiO₂ починає плавиться при 1700 °С, а випаруються при 2230 °С, а SiC має $t_{\text{розклад}}$ 2730 °С, що не дає можливості використання даного типу покриття при використанні їх в сталеливарній промисловості в повному обсязі.



- 1 – заглибка; 2 – свічка; 3 – газохід; 4 – термопара; 5 – кришка тигля;
 6 – тигель; 7 – кришка контейнера; 8 – футерування; 9 – індуктор;
 10 – контейнер; 11 – зразки; 12 – решітка; 13 – кремній; 14 – підставка;
 15 – плита

Рисунок 3.5 - Схема виробництва силіційованого графіту [16]

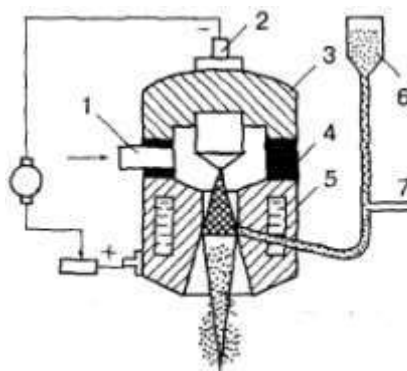
Силіційований графіт отримують за наступною схемою: з тигля 6 знімається кришка 5 і решітка 12; на підставку 15 кладеться кремній 13; далі встановлюється решітка, на неї викладаються зразки 11; після установки кришки

на місце йде відкачка газу і нагрів печі в ході якої кремній починає випарюються і проникати в пори графіту.

3.3 Плазмове нанесення покриттів

Плазмове напилення є одним із способів газотермічного нанесення покриттів. В основі цього процесу лежить нагрівання напилюваного матеріалу до рідкого або пластичного стану, перенесення його вискотемпературним плазмовим струменем до підкладки з подальшим утворенням шару покриття. Розрізняють два основні способи нанесення плазмового напилення: порошком (рисунок 3.6) і дротом (рисунок 3.7).

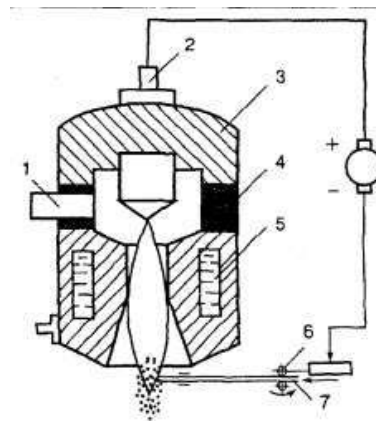
При плазмовому напиленні порошком в плазмотроні, що складається з водоохолоджуваного катодного (катод 2, корпус 3) і анодного вузла 5 за допомогою джерела живлення збуджується плазмова дуга, яка стабілізується стінками каналу сопла і плазмоутворюючим газом, що підводиться через підвід 1. Порошок подають з порошкового живильника 6 за допомогою газу, який надходить з підводу 7.



1 – підвід плазмоутворюючого газу; 2 – катод плазмотрону; 3 – корпус катоду; 4 – ізолятор; 5 – корпус аноду; 6 – порошковий живильник; 7 – підвід транспортуючого газу

Рисунок 3.6 - Схема плазмового напилення порошком [17]

Плазмове напилення з розпиленням дроту здійснюється двома способами: нейтральним дротом і дротом-анодом (струмоведучим). У першому випадку нагрів, плавлення і розпилення нейтрального дроту здійснюють плазмовим струменем, а в другому - на дріт-анод подають позитивний потенціал джерела живлення дуги, а нагрівання і плавлення дроту 7 відбуваються переважно за рахунок виділення теплоти в анодному плямі 5. Плазмовий струмінь, в основному, виконує функції розпилення.



1 – підвід плазмоутворюючого газу; 2 – катод плазмотрону; 3 – корпус катоду; 4 – ізолятор; 5 – корпус аноду; 6 – механізм подачі дроту; 7 – суцільний або порошковий дріт

Рисунок 3.7 – Схема плазмового напилення струмоведучим дротом [17]

Використання струмоведучого дроту має перевагу у вигляді підвищення к.к.д., точності напилення, кращої роботи когезії. Крім того, отримані графітові електроди мають низьку собівартість, так як використання дроту виключає необхідність застосування дозуючих пристроїв, спрощує введення напилюваного матеріалу в плазмовий струмінь, підвищує коефіцієнт використання матеріалу (від 70 % до 85 %), що знижує витрати на виробництво. Витрати знижуються також за рахунок відносно низької вартості дроту. Також слід зазначити краще зчеплення з поверхнею, в порівнянні з порошковим напиленням; швидка швидкість нанесення (швидкість охолодження частинок від 10^{-5} °C / с до 10^{-6} °C / с, обумовлює дуже швидку кристалізацію), яка не

вимагає подальшої обробки виробу; витрат на додаткове обладнання та вузькоспеціалізованого персоналу [17]

3.4 Вибір способу нанесення покриття

Графітовані електроди працюють при високих температурах, до 3500 °С (сублімація графіту), що негативно позначається на їх працездатності (рисунок 3.7). Основна причина втрати якості є окислення на повітрі, в результаті чого поперечний переріз електроду змінює свою форму, що призводить до зменшення сили струму і підвищенню його температури внаслідок збільшення опору. Це обумовлено природою отримання штучних графітів, так електроди марки ЕГ (електрод графітований) отримують на основі нафтового коксу і кам'яного пеку. В ході спікання утворюється поровий простір, який негативно позначається на корозійній стійкості графітованого виробу, що веде до зменшення критерію якості та струмового навантаження, рисунок 3.8.

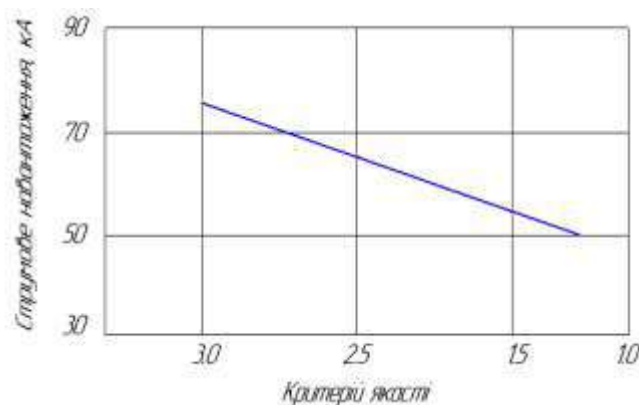


Рисунок 3.8 – Залежність струмового навантаження від критерію якості

[8]

К – критерій якості, відносна одиниця яка обчислюється [8]:

$$K = \frac{\sigma_{\text{виг.н}}}{\rho_p * \alpha_n} \quad (3.1)$$

де $\sigma_{\text{виг.н}}$ – середнє значення межї мццностї на вигин нїпелїв;

ρ_e – питомий електроопїр електродїв;

α_n – температурний коефїцієнт лїнійного розширення нїпелїв.

На вїдмїну вїд електродїв марки ЕГП і ЕГСП, електроди ЕГ не мають антикорозїйних властивостей, завдяки чому розробка спеціальних захисних покриттїв є важливим завданням для пїдвищення термїну служби та якостї виробленого матерїалу.

Основнї вимоги, що пред'являються до покриття на графїтї являються: висока адгезїя; електропровїднїсть; висока стїйкїсть проти окислення; низька пористїсть; простота виготовлення; вїдносно низька вартїсть матерїалїв. Виходячи з цих показникїв, найоптимальнїшим способом нанесення захисного покриття є плазмове напилення. Даний метод дозволяє швидко і якїсно нанести покриття, яке не потребує додаткової обробки і електроди можна використовувати вїдразу ж в роботї.

За основу вибраний спосїб [18] плазмового напилення струмоведучим дротом марки АК-5 який буде дослїджений в наступних роздїлах.

4 АНАЛІЗ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТТЯ АК-5

Використання алюмінію в захисному покритті регламентовано появою тугоплавких оксидів на його поверхні. Так згідно з дослідженнями [19] температура дуги розповсюджується по електроду приблизно на 10 мм, то Al_2O_3 з $t_{\text{плав.}}$ 2050 °С і $t_{\text{дис.}}$ 3500 °С по температурній стійкості наблизений до графіту.

Також не мало важливою властивістю оксидів алюмінію є їх щільна будова, яка не дає окислятися подальшим шарам. Розрізняють основні модифікації Al_2O_3 :

– Аморфний Al_2O_3 утворюється при кімнатній температурі і його товщина не перевищує від 0,001 мкм до 0,003 мкм. Характеризується миттєвою реакцією окислення, на початковому етапі зростання температури не впливає на швидкість росту товщини плівки.

– При підвищенні температури вище від 500 °С відбувається упорядкування кристалічної структури в гексагональну і виникнення $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, який характеризується щільною оксидною плівкою і окислення набуває вигляду дифузійного. Понад 700 °С відбувається (рисунок 4.1) різке підвищення товщини плівки, це пов'язано з розтріскуванням шару Al_2O_3 , проте система стабілізується і подальше окислення сповільнюється. Має сірий колір.

– З підвищенням температури вище 1200 °С $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ переходить в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Даний оксид має ромбодричну кристалічну решітку, відрізняється більшою щільністю і меншою адсорбційною здатністю до водяної пари. Це тягне до вкрай повільної швидкості окислення, так само слід зазначити, що перехід до α -фази має тривалий ефект і закінчується при температурах ~ 1400 °С. Має яскраво виражений білий колір [20].

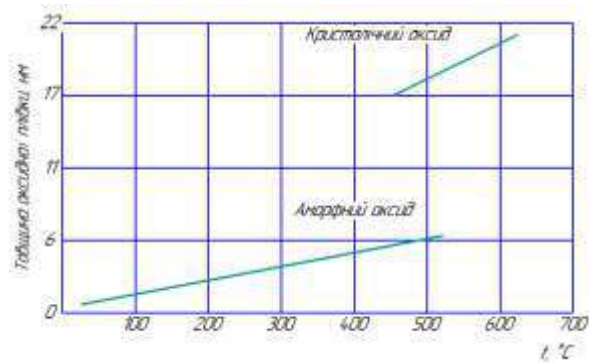


Рисунок 4.1 – Залежність товщини оксидної плівки від температури на твердому алюмінії [21]

Підводячи підсумки вище зазначених фактів, можна сказати, що оксидна плівка, яка буде утворюватись, на поверхні покриття АК-5 надійно захищатиме електрод від високотемпературної корозії аж до температури сублимації графіту.

Кремній є легуючою добавкою в дроті АК-5 і відіграє значну роль в початковому етапі нанесення захисного покриття на графітові електроди, так автором [22] проведено дослідження, де вказані такі властивості кремнію:

– добавка кремнію в алюмінієвому сплаві знижує його поверхневий натяг (рисунок 4.2). Дане явище обумовлено тим, що кремній є поверхнево активною добавкою і конденсується на поверхні краплі металевого розплаву, що в свою чергу знижує його натяг.

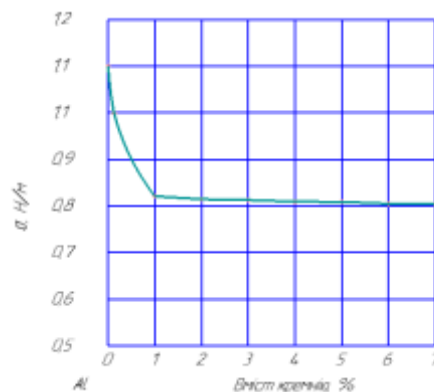


Рисунок 4.2 – Вплив кремнію на поверхневий натяг системи алюміній-кремній [22]

– Зниження в'язкості алюмінієвого сплаву. На рисунку 4.3 зображено, що найменшою в'язкістю володіють сплави евтектичної структури, на це впливає атомний обсяг металів і значення їх ентропій як енергетичний фактор.

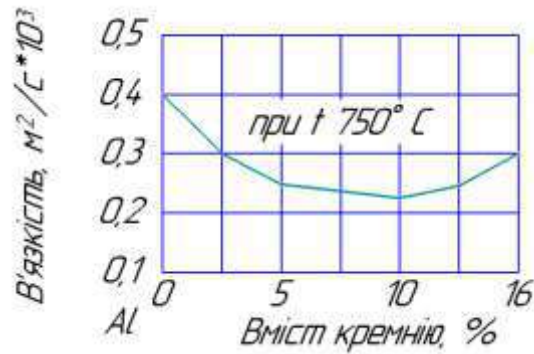


Рисунок 4.3 – Вплив кремнію на в'язкість алюмінієвого сплаву [22]

– Зниження рідкоплинності. Дане явище пов'язане з уповільненням кристалізації сплаву ~ 100 °С, що істотно впливає на весь хід затвердіння і зменшення теплового ефекту первинної кристалізації.

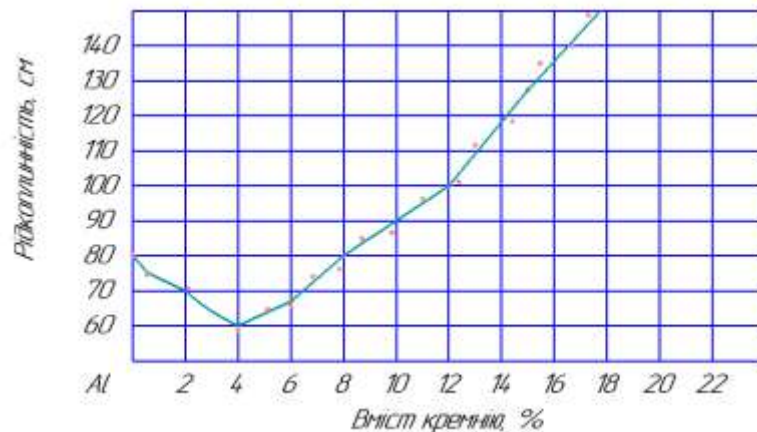


Рисунок 4.4 – Залежність рідкоплинності алюмінієвого сплаву від кремнію [22]

Також, не менш важливим чинником, слід зазначити більшу спорідненість кремнію до вуглецю. Дослідження [23] показали, що при концентрації кремнію 12 % в алюмінієвому сплаві знижується ймовірність

утворення карбідів алюмінію (рисунок 4.5). У свою чергу, як було зазначено вище, карбід кремнію відрізняється хорошою змочиваністю з графітом. У зв'язку з великим розміром частинок ($\sim r_{\text{cp}} = 5 \text{ мкм}$ при пористості графіту ЕГ від 2,3 мкм до 5,6 мкм) SiC закупорює пори і не дає просочуватися кисню.

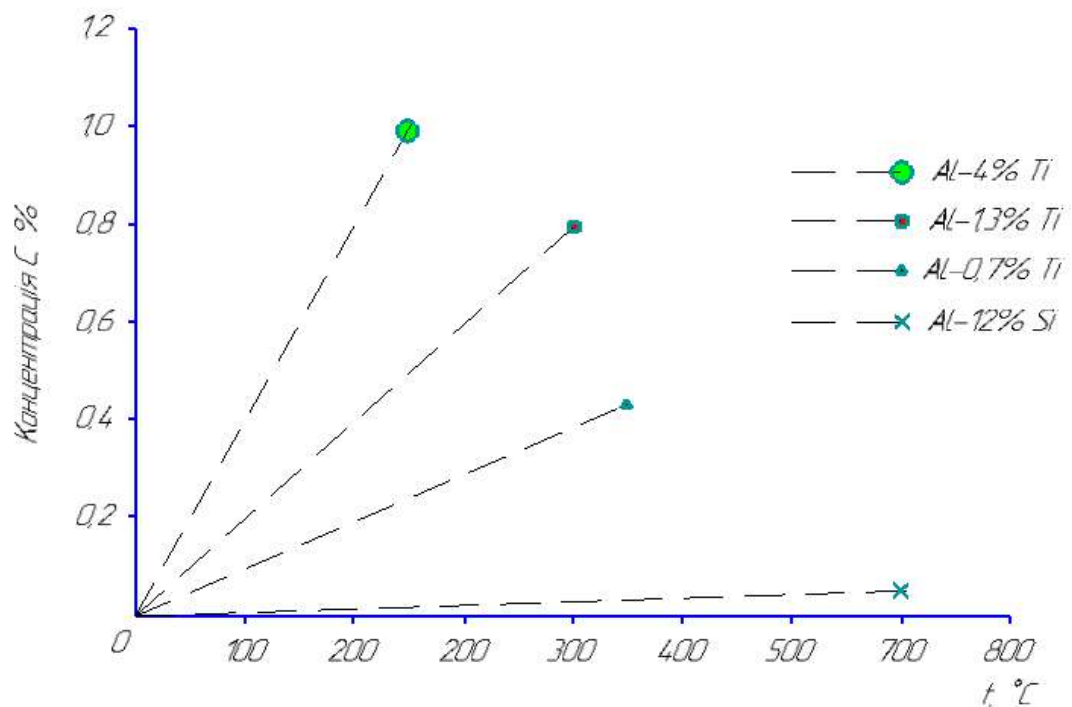


Рисунок 4.5 – Вплив складу сплаву на вміст вуглецю в залежності від температури [23]

5 ТЕХНІЧНІ УМОВИ НА НАПИЛЕННЯ

5.1 Технічні умови до вихідної заготовки

Для виготовлення електрода із захисним покриттям використовують графітові електроди марки ЕГ з габаритними розмірами 300 мм x 1200 мм.

Якість виробу повинно відповідати вимогам сертифікату, який поставляє завод виробник і повинні відповідати ДСТУ 4494:2005 [7].

Пред'являються такі технічні вимоги до електродів:

- відхилення від перпендикулярності торця електрода щодо його утворювальної поверхні повинно бути не більше 0,2 мм;
- відхилення від прямолінійності (увігнутість) в площині торцевих поверхонь електрода не повинно бути більше 0,15 мм;
- на поверхні електрода не допускається:
 - відколи крайок торця глибиною понад 8 мм, сумарною довжиною понад 20 мм;
 - поверхневі дефекти глибиною понад 8 мм, довжиною більше 20 мм;
 - тріщини;
- на поверхні ніпеля і ніпельного гнізда не допускаються:
 - більше двох дефектів ниток різьблення розміром від 5 мм до 15 мм кожен;
 - тріщини;
- відхилення від співвісності ніпельного гнізда щодо утворює поверхні електрода не повинно бути не більше 1,5 мм.

5.2 Технічні умови до дроту

В якості струмоведучого дроту для плазмового напилення використовувати зварювальний дріт Св АК5 1,2 х ДСТУ EN ISO 18273-2018 [24]. Основними вимогами до дроту є відповідність його до хімічного складу, таблиця 5.1.

Таблиця 5.1 – Хімічний склад Св АК5 в процентному співвідношенні [24]

Марка дроту	Al	Si	Fe
Св АК5	Решта	4,5 – 6	0,1 – 0,2

Додаткові вимоги до дроту:

- Дріт повинен мати поверхню без дефектів у вигляді плів, тріщин, вм'ятин, задирок і розшарувань;
- На поверхні дроту, що поставляється в бухтах, допускаються одиничні дефекти, темні і світлі плями, що не виводять дріт при контрольній зачистці за граничні відхилення по діаметру;
- Після обробки дріт повинен мати світлу блискучу поверхню з параметрами шорсткості Ra не більше 0,63 мкм;
- Дріт, що поставляється без обробки поверхні, перед використанням повинен бути оброблений споживачем. Після обробки дріт повинен відповідати вимогам цього стандарту.

5.3 Технічні умови до плазмоутворюючого газу

Для забезпечення задовільних властивостей плазмового напилення доцільно застосовувати в якості плазмоутворюючого газу аргон зварювальний

який поставляється по ДСТУ ГОСТ 10157:2019 [25].

Застосовуваний аргон повинен бути сухим і мати концентрацію не нижче 98 % Ar. Для осушення від вологи газ з балона іноді пропускають через спеціальний патрон, заповнений зневоднених мідним купоросом, або через сілікагелевий осушувач. У газі також не повинні міститися мінеральні масла, гліцерин, сірководень, соляна, сірчана і азотна кислоти, спирти, ефіри, органічні кислоти і аміак.

5.4 Технічні умови до транспортуючого газу

У системах працюючих з стисненим повітрям дотримуватися ДСТУ 4169:2003 «Стиснене повітря. Частина 1. Забруднювачі та класи чистоти (ISO 8573-1:2001, MOD)» [26].

Умови, при яких визначають об'єм газу, повинні відповідати наступним значенням:

- Температура повітря 20 °С;
- Абсолютний тиск повітря 100 кПа = 1 бар;
- Відносний тиск водяного пару 0.

Класи чистоти повинні дотримуватися наступних пунктів:

Класи чистоти по частинкам – 1;

Класи чистоти по вологості і вмісту води в рідкій фазі – 1;

Класи чистоти за вмістом масел – 1.

6 ТЕХНОЛОГІЯ ТА ТЕХНІКА НАПИЛЕННЯ

6.1 Вибір параметрів режиму плазмового напилення

Напилення проводиться на установці плазмового напилення «Орнітоф»-5м (УПНО-5М), виготовлену за ТУ У 29.4-19267697-007:2007. В якості катода в плазмотроні застосовуються вольфрамові зварювальні електроди по ДСТУ EN ISO 6848:2015 [27] марок ЕВЛ , Еві-1, ЕОТ-15, робочий торець яких заточений під кутом 60° з притуплюванням на торці діаметром від 0,15 мм до 0,25 мм.

Параметри режиму напилення [28]:

$$I_H - 170 \text{ А};$$

$$U_d - 65 \text{ В};$$

$$d_e - 1,2 \text{ мм};$$

$$Q_{Ar} - 30 \text{ л / хв};$$

$$Q_{\text{повітря}} - 16,5 \text{ м}^3 / \text{ГОД};$$

$$l_a - 100 \text{ мм, де } a - \text{відстань від електроду до напиленої поверхні};$$

$$S_{\text{покрття}} - \cong 0,4 \text{ мм};$$

$$V_{\text{под др.}} - 555 \text{ м / ГОД.}$$

$$V_{\text{переміщ. ап.}} [28]:$$

$$V_{\text{переміщ. ап.}} = 0,94 * 10^3 \frac{\eta G}{\gamma_{\text{п}}(\delta - \Delta\delta)} = 0,94 \cdot 10^3 \frac{0,85 \cdot 1,4}{2680 \cdot (0,4 - 0,12)} = 1,5 \text{ м / хв}$$

(6.1)

де $V_{\text{переміщ. ап.}}$ – швидкість переміщення апарату, м / хв;

η – коефіцієнт використання металу = 0,85;

G – продуктивність плазмотрону = 1,4 кг / год;

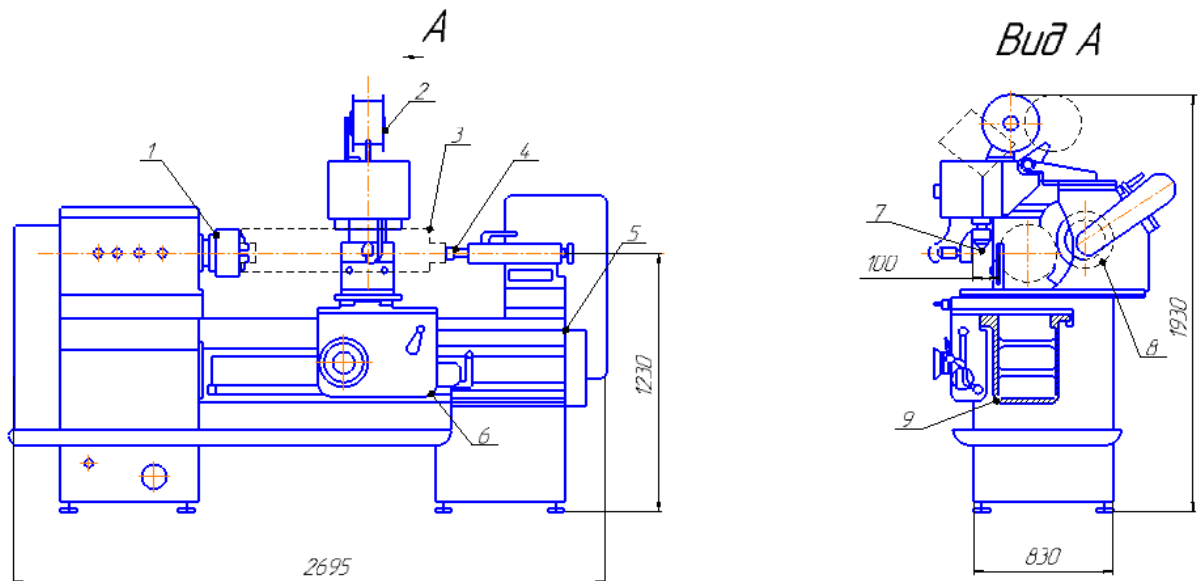
$\gamma_{\text{п}}$ – щільність газотермічного покриття = 2680 кг / м³;

δ – товщина покриття = 0,4 мм;

$\Delta\delta$ – поправка ($\Delta\delta = 0,3\delta$) = 0,12;

6.2 Технологія та техніка нанесення захисного покриття

Для виготовлення електродів з захисним покриттям використовується установка для напилення типу УН 125, рисунок 6.1.



- 1 – передня бабка; 2 – касета з дротом; 3 – заготовка; 4 – задня бабка;
 5 – напрямна переміщення супорту; 6 – супорт; 7 – плазмотрон; 8 – щітка;
 9 – станина

Рисунок 6.1 – Схема установки для плазмового напилення

Порядок формування захисного покриття зводиться до наступної послідовності:

- Зарядити касету з дротом 2;
- Підключити балон з аргоном;
- Відкрити магістральний вентиль зі стисненим повітрям;
- Встановити параметри режиму напилення (пункт 6.1);
- Закріпити електрод на консольному крані;
- Поверхневий огляд виробу на наявність не регламентованих пошкоджень;

- Очистити виріб від пилу стисненим повітрям;
- Транспортувати на місце напилення;
- Закріпити виріб в установці між опорними бабками 1, 4;
- Нанести 1-й шар покриття на виріб;
- Ввімкнути щітку для очистки поверхні нанесеного шару 8;
- Нанести 2-й шар покриття;
- Провести візуальний контроль на наявність дефектів;
- Закріпити виріб в консольному крані;
- Транспортувати на місце готових заготовок.

Для підвищення когезії на 27 % рекомендується пошарова зачистка металевої швидко обертовою щіткою з метою видалення з поверхні напиленого шару частинок, які не “закріпилися” при напиленні [28].

6.3 Контроль якості захисного покриття

Нанесене захисне покриття на графітованому електроді повинне відповідати стандарту ГОСТ 9.304-87 «Покриття газотермические. Общие требования и методы контроля»[30]:

1. Візуальний огляд покриття на наявність дефектів. Не допускається наявність наступних дефектів:

- Відшарування напилюваного шару;
- Розтріскування покриття;
- Поява на поверхні крапель міді;
- Різновисність покриття;

2. Товщину покриття перевіряють за допомогою методу випадкової вибірки. Визначають ділянку контрольованої поверхні площею не менше 1 м², на якому в 10 місцях визначають товщину ультразвуковим товщиноміром.

3. Міцність покриття з основою визначають методом нанесення сітки подряпин гостро заточеним інструментом з прорізанням покриття до матеріала підкладки, таблиця 6.1.

Таблиця 6.1 – Геометричні розміри сітки для проведення контролю [30]

Розмір сітки, мм	Відстань між подряпинами, мм	Товщина покриття, мкм
15 x 15	3	До 200
25 x 25	5	Понад 200

На контрольованій поверхні не допускається наявності відшаровування покриття від підкладки основного матеріалу. Після проведення контролю, покриття відновлюється.

7 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ

7.1 Дослідження температурного поля електроду

В розділі 1 були надані показники щодо розповсюдження температури при роботі електроду в ДСП та в проміжку від колосника, до електродотримача. Однак дані результати не розкривають в повній мірі зміну температури, що в свою чергу унеможлиблює коректну оцінку розподілу температури та її вплив на захисне покриття.

Для визначення розподілу температури був проведений розрахунок в пакеті програмного забезпечення ANSYS WORKBENCH. Дане програмне забезпечення відноситься до програм типу CAE (Computer-aided engineering), яке дозволяє проводити інженерні розрахунки за допомогою методу кінцевих елементів.

Так як основним джерелом нагріву електроду є джоулеве тепло, то для аналізу було обрано два розрахункові модулі: Electric та Transient Thermal, рисунок 7.1.

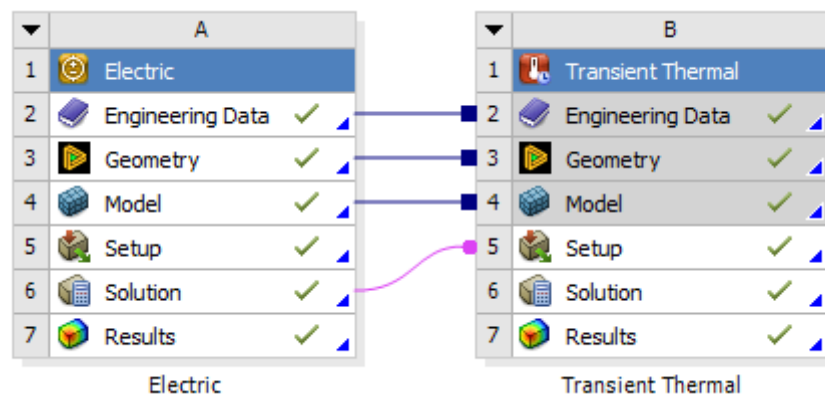


Рисунок 7.1 – Вихідні дані для розрахунку

Граничними умовами яких виступали:

$H - 1200$ мм;

$D - 300$ мм;

$I - 2000 \text{ A};$

$U - 60 \text{ V};$

$t_{\text{торця}} - 5000 \text{ }^\circ\text{C};$

$t_{\text{серед.}} - 500 \text{ }^\circ\text{C};$

$\tau - 3600 \text{ с.}$

Розрахунок Джоулевого тепла показав, що максимальне значення дорівнює 26 кДж. На рисунку 7.2 зображено результат комбінованого аналізу, при якому мінімальна температура на протилежному від дуги торці дорівнює 541 °С.

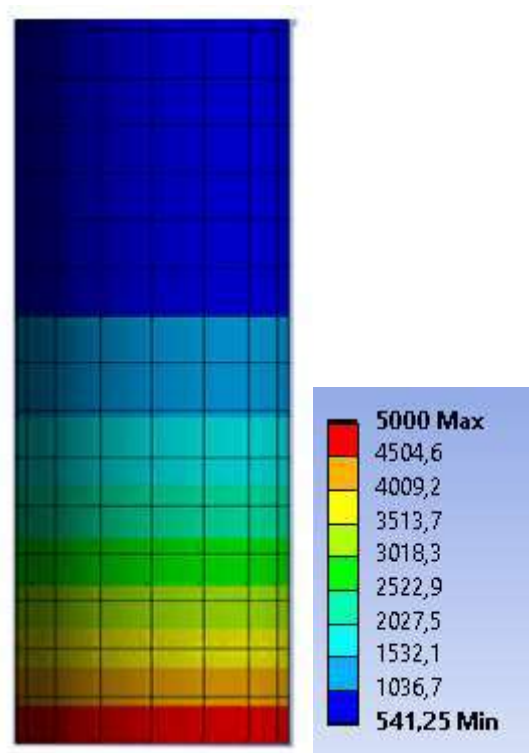


Рисунок 7.2 – Розподіл температурного поля за 3600 с

Отримані дані аналізу дозволяють більш детально розглянути розподіл температури на електроді в залежності від часу та прийти до висновку, що захисне покриття потрібне на всьому проміжку електроду.

7.2 Дослідження графітової пластини в якості електрода

На графітовану пластину марки ЕГ з розміром 150 мм × 18 мм × 7 мм (Д × Ш × В) було нанесене захисне покриття АК-5, товщиною 0,4 мм. Пластину використовували у вигляді зварювального електрода, щоб визначити в масштабі роботу графітованого електрода в натуральну величину, рисунок 7.3.

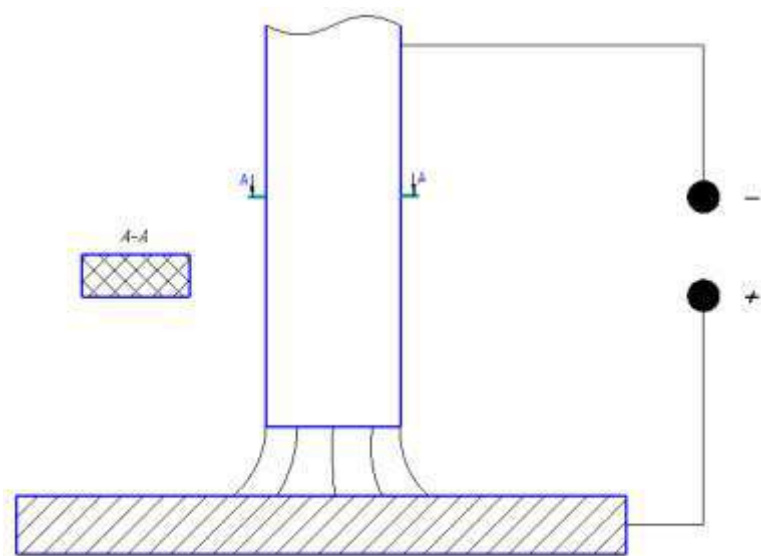


Рисунок 7.3 – Схема роботи графітованого електрода

Параметри режиму зварювання були наступними:

Рід струму – постійний;

Полярність – пряма;

$I_{зв}$ – від 450 до 500 А;

U_d – від 38 до 40 В;

$\tau_{зв}$ – 5 с.

Також був проведений теоретичний розрахунок розподілу температурних полів згідно блок-схеми, рисунок 7.1. Результати представлені на рисунку 7.4

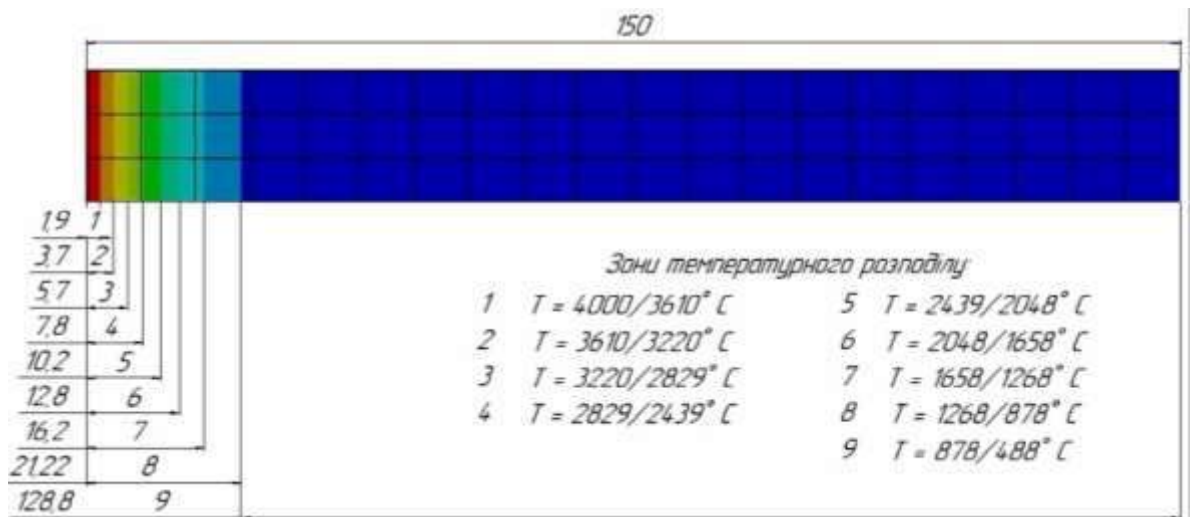
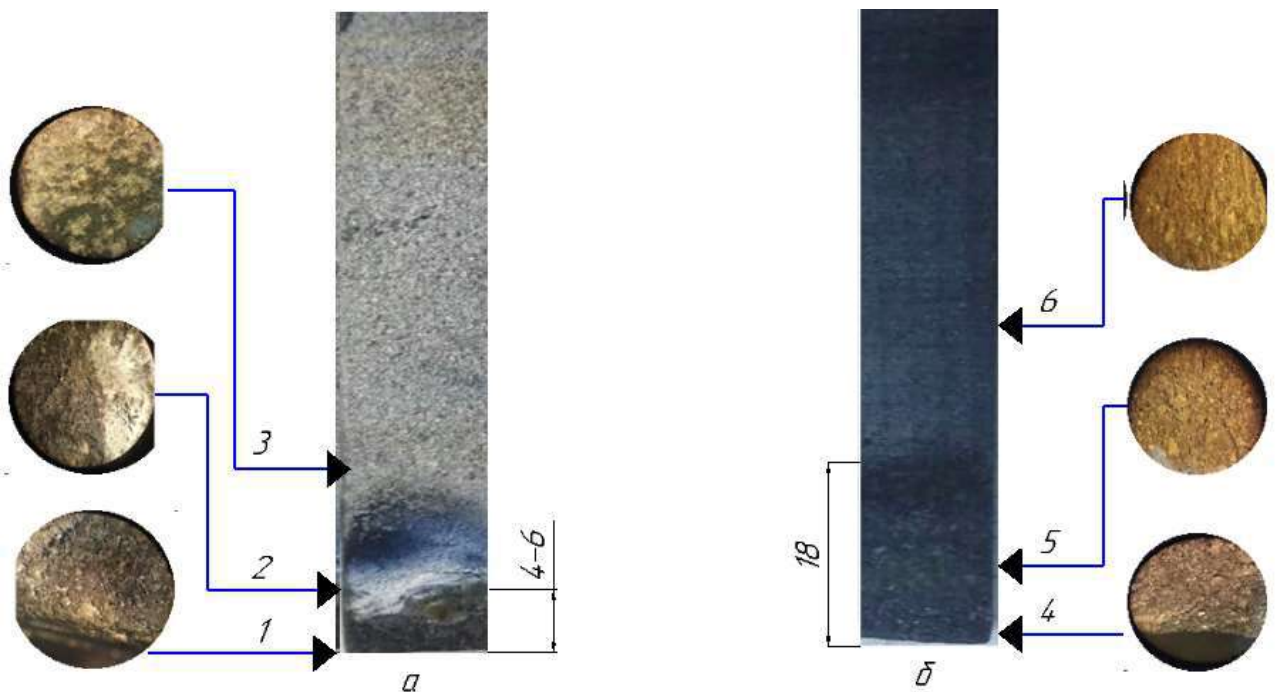


Рисунок 7.4 – Температурний розподіл на графітованій пластині

Після зварювання з обох сторін пластина придбала наступний вигляд, рисунок 7.5. Угар у торці електрода з покриттям склав від 4 мм до 6 мм, (рисунок. 7.5 а), на зворотному боці графіту окислення складо 18 мм (рисунок 7.5 б).



а – з боку покриття; б – зі зворотного боку

Рисунок 7.5 – Графітова пластина після зварювання:

В зоні 1 (рисунок 7.5 а) спостерігається повний угар внаслідок розповсюдження тепла катодної зони вверх по електроду. Зона 2 характеризується наявністю фази $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Дана фаза відноситься до високотемпературної фази оксиду алюмінію кінцева температура переходу – 1400°C . В перехідній зоні 2-3 спостерігається перетворення $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (від 1200°C до 500°C). 3 зона являє собою перехід з $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в алюміній.

Зона 4, рисунок 7.5 б, за своїми характеристиками схожа з зоною 1, рисунок 7.5 а. В 5 зоні зображена більш відкрита пористість, а ніж в зоні 6, в якій температура не досягла критичних значень для графітованого електроду.

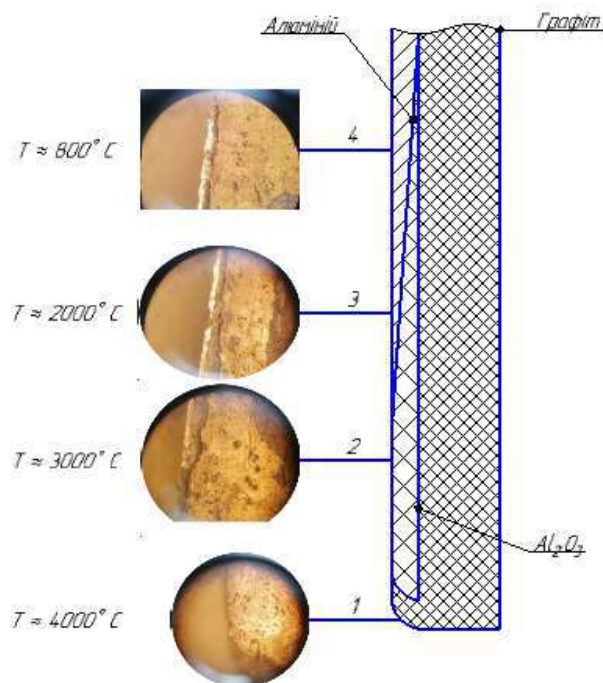


Рисунок 7.6 – Бічна сторона пластини, х 50

З віддаленням теплового вкладення пористість та розмір пор графіту знижується, а зчеплення покриття з основою збільшується (рисунок 7.6). Дане явище обумовлюється різними коефіцієнтами лінійного теплового розширення, так у графіту та оксиду алюмінію вони дорівнюють $8 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$, а в алюмінію $22 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ [31]. Внаслідок чого, при нагріванні електроду, покриття збільшилося в розмірі, але при структурному переході з алюмінію (зона 4 рисунок 7.6) в Al_2O_3 (зона 3 рисунок 7.6), щільність збільшилася, а геометричні

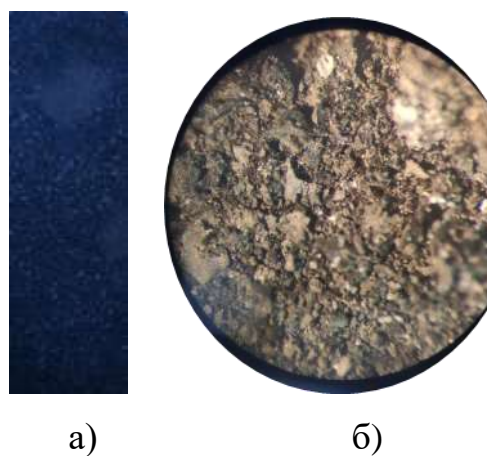
розміри зменшились. Також варто зазначити, що в той же час середній радіус пор збільшився (зона 2 – 1 рисунок 7.6), що призвело до зменшення контактних точок покриття з основою. Однак слід враховувати, що при напиленні електродів для руднотермічних печей, покриття буде циліндричним, що не дозволить порушити захисних властивостей.

7.3 Порівняльний аналіз пластин з покриттям і без нього

В ході експерименту використовувалася пластина з попереднього експерименту та пластина без нанесеного захисного покриття, розміри якої відповідають зразку описаному вище. При порівняльному аналізі зразки були поміщені в муфельну піч при t 900 °C і часу витримки 2 години.

Після термічної обробки були отримані наступні дані:

Пластина без покриття втратила в розмірах по 0,5 мм на кожну сторону, пористість збільшилася, що дозволило проникати кисню в більш глибокі шари графіту. При вимірі шорсткості, до термообробки, профілограф показав 8 Ra, після термообробки дані склали 13,6 Ra, рисунок 7.7.



а – зовнішній вигляд пластини; б – структура x50

Рисунок 7.7 – Пластина без покриття після термообробки

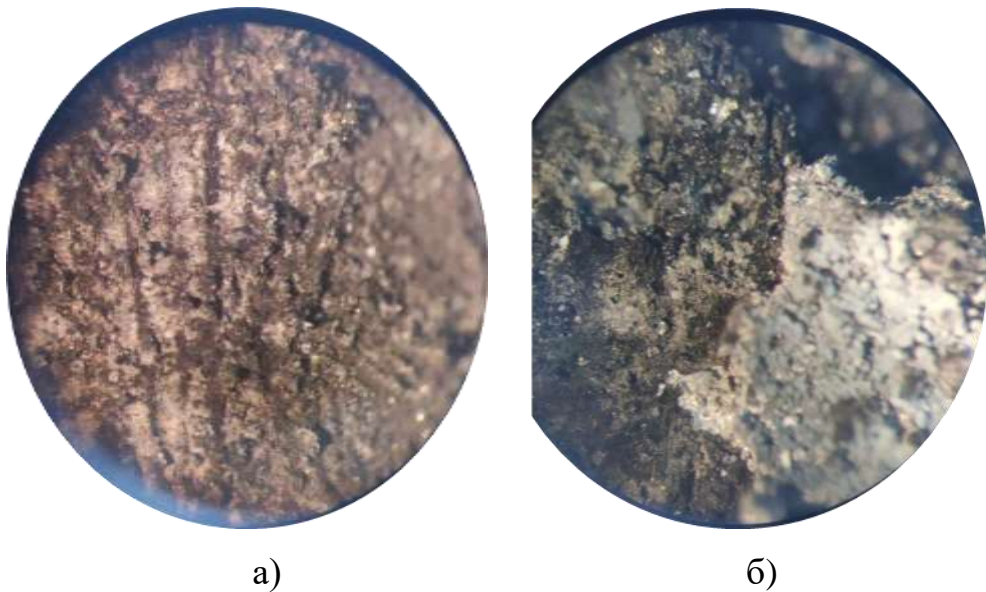
Дані отримані при розгляді пластини з покриттям:

На торцях електрода, де вже було тепловкладення, втрата геометричних даних складала 2 мм. Це пов'язано з тим, що при проведенні експерименту з розділу 7.1 пористість графіту збільшилася, що і вплинуло на більш підвищене зношування зразка.



Рисунок 7.8 – Зовнішній вигляд пластини з покриттям

Після видалення захисного покриття було виявлено, що ближче до торців електрода є когезійне руйнування, рисунок 7.9, так як під час проведення експерименту з розділу 7.1 зразок використовувався як зварювальний електрод, то температура, яка утворилася в той проміжок була ≥ 2050 °С, що дозволило Al_2O_3 перейти в рідкий стан і просочити графіт (рисунок 7.10).



а)

б)

а – внутрішня сторона покриття; б – торець електрода

Рисунок 7.9 – Когезійне руйнування захисного покриття в х 50

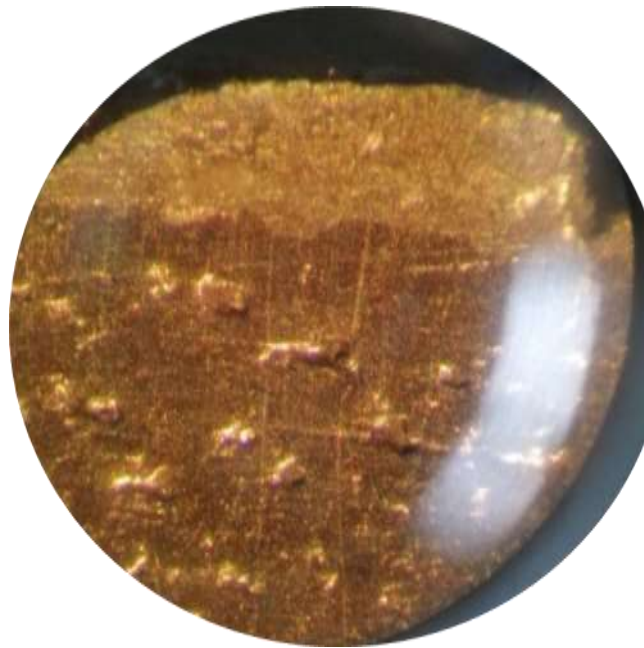


Рисунок 7.10 – Просочення графіту алюмінієм через збільшену пористість

Графіт збільшив значення своєї пористості, рисунок 7.11, шорсткість склала 9,84 Ra, проте слід зазначити, що на зразку знаходилося захисне покриття, яке перешкоджало проникненню кисню.

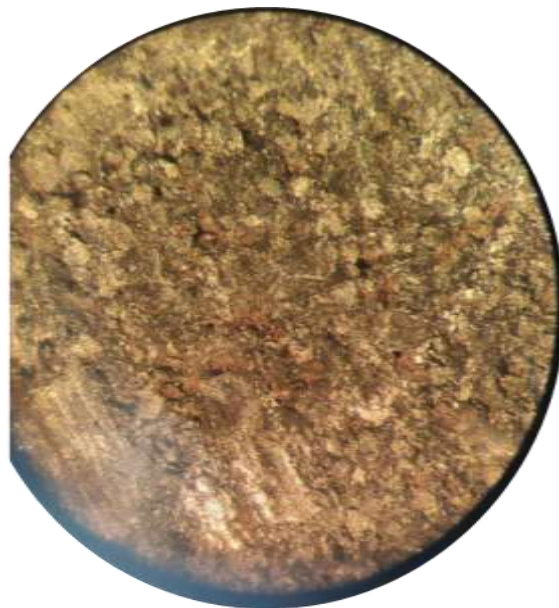


Рисунок 7.11 – Поверхня графіту після зняття покриття, x 50

7.4 Дослідження роботи алюміній-мідного покриття

З метою підвищення антикорозійних властивостей покриття, було проведено вивчення впливу міді. Для експерименту використовувався електрод з товщиною шару алюмінію та міді від 0,2 мм до 0,4 мм відповідно. Використання другого мідного шару аргументовано підвищенням електропровідності і зниженням пористості основного покриття. Це пов'язано з характером плазмового наплення і природою Al_2O_3 , рисунок 7.12. Зразок був підданий відпалу при t 900 °C і часу витримки 2 год, охолодження відбувалося на повітрі. В результаті чого мідь окислилась і розтеклася по алюмінієвому шару (рисунок 7.13).

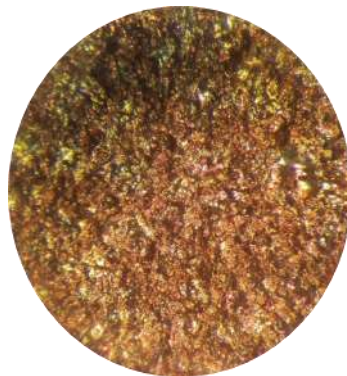


Рисунок 7.12 – Зовнішній вигляд покриття до відпалу, х 50

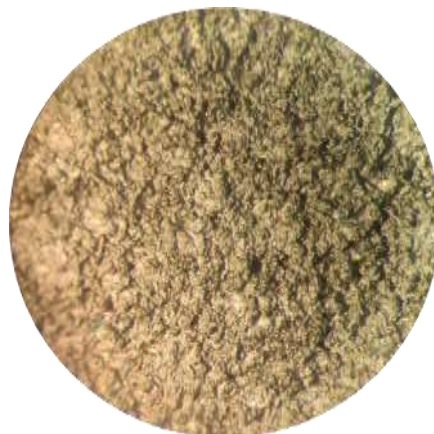
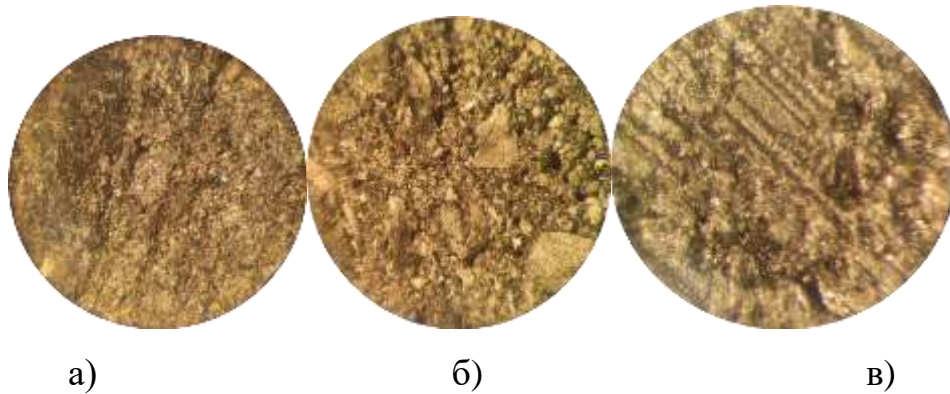


Рисунок 7.13 – Зовнішній вигляд покриття після відпалу, х 50

Після зняття покриття з електрода були виявлено наступне дані – структура поверхні відпаленого графіту була наближена до поверхні невідпаленого графіту, рисунок 7.14



а – мідь - алюміній - кремній; б – алюміній - кремній; в – невідпалений графіт

Рисунок 7.14 – Порівняльний аналіз поверхонь графітового електрода після відпалу, х 50

Дане явище було досліджено авторами [32], де було встановлено, що безкисневі покриття знижують окислюваність графіту ефективніше, таблиця 7.1. Це пов'язано з формуванням карбідів цих елементів, які нейтралізують активні центри окислення залучаючи вуглець в реакції утворення і розкладання карбідів. Однак, слід відзначити не достатню температуру для застосування даних покриттів для електродів руднотермічних печей.

Таблиця 7.1 – Вплив захисного покриття на окислюваність графіту на основі голчастого коксу при температурі 850 °С [32]

Захисне покриття	Окислювання, мас. %	Зниження окислювання віднос. %
Контрольний зразок	51,4	–
Al ₂ O ₃	41,8	18,7

Продовження таблиці 7.1

Na_2SiO_3	40,7	20,8
SiO_2	30,4	40,8
SiMn	25,8	49,8
SiC	18,6	63,8

7.5 Дослідження змочування графіту оксидом алюмінію

Для визначення змочуваності графіту рідким розплавом Al_2O_3 потрібно оцінити його роботу адгезії. Так робота адгезії ($A_{\text{адг}}$) є взаємодія рідкої і твердої фаз на межі поділу цих фаз, рисунок 7.15.

Адгезія обумовлює взаємодію між твердим тілом і знаходиться в контакті з рідиною, а змочування - це явище, яке має місце в результаті цієї взаємодії.

Адгезія рідини та її здатність змочувати тверді поверхні характеризується крайовим кутом змочування θ і роботою адгезії. Рівноважне значення крайового кута можна розрахувати за формулою Юнга:

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{\text{т-г}} - \sigma_{\text{ж-т}}}{\sigma_{\text{ж-г}}}$$

де $\sigma_{\text{т-г}}$ – поверхнева енергія на кордоні тіло-газ;

$\sigma_{\text{ж-т}}$ – поверхнева енергія на кордоні рідина-тіло;

$\sigma_{\text{ж-г}}$ – поверхнева енергія на кордоні рідина-газ.

Однак з трьох поверхневих енергій можна виміряти загальнодоступними способами тільки одну – $\sigma_{\text{ж-г}}$. Поверхневу енергію твердого тіла на кордоні з рідкою і газоподібною фазами важко визначити експериментально, тому розрахувати крайовий кут змочування за допомогою рівняння Юнга не є можливим.

Одним з методів визначення кута θ передбачає безпосереднє вимірювання крайового кута по формі краплі, що знаходиться на підкладці. Краплю проєктують на екран досягаючи максимальної різкості в зображенні контуру краплі. При вимірі таким методом необхідно зарисувати або сфотографувати форму краплі. На знімку або рисунку проєкції краплі проводять дотичну в точці перетину контуру краплі з підкладкою і заміряють кут нахилу цієї дотичної. Можлива похибка вимірювання крайового кута становить від 3° до 5° . Однак даний метод вимагає наявності спеціалізованого обладнання [33].

Крім безпосереднього вимірювання крайового кута можна визначити його значення за основними розмірами прилиплої краплі: по висоті h і радіусу або діаметра площі контакту краплі з поверхнею r_k . Знаючи ці розміри, розраховують крайовий кут змочування за формулою [34]:

$$\theta = \arccos \cdot \left(1 - \frac{h}{r}\right) \quad (7.1)$$

Роботу адгезії розраховують по формулі:

$$A_{\text{адг}} = \sigma_{\text{ж-г}} \cdot (1 + \cos\theta) \quad (7.2)$$

В ході дослідження розтікання рідкого розплаву оксиду алюмінію на графіті використовувався високотемпературний нагрів циліндричних зразків Al_2O_3 з наступними параметрами:

$$I_{\text{зв}} - 94 \text{ А};$$

$$\tau_{\text{зв}} - 5 \text{ с};$$

$$m_3 - 0,6 \text{ г};$$

$$d_3 - 4,5 \text{ мм};$$

$$h_3 - 4 \text{ мм};$$

$$\text{Шорсткість підкладки} - 13,59 \text{ Rz.}$$

В ході якого утворилася крапля (рисунок 7.15) з наступними розмірами:
 $d_k - 4$ мм, $h_k - 3,4$ мм.

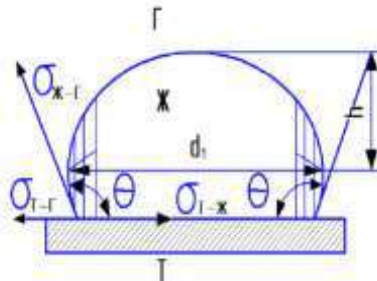


Рисунок 7.15 – Схема розташування краплі на графітовій підкладці

Виходячи з формули 7.1, крайовий кут змочування складає:

$$\theta = \arccos \cdot \left(1 - \frac{h}{r}\right) = \arccos \cdot \left(1 - \frac{3,4}{2}\right) = 134^\circ$$

Роботу адгезії розраховуємо за формулою 7.2:

$$A_{адг} = \sigma_{ж-г} \cdot (1 + \cos\theta) = 0,616 \cdot (1 - 0,69) = 0,19 \text{ Н / м}^2$$

де: $\sigma_{ж-г} = 0,616$ Н / м [35].

Визначають наступні стадії змочування:

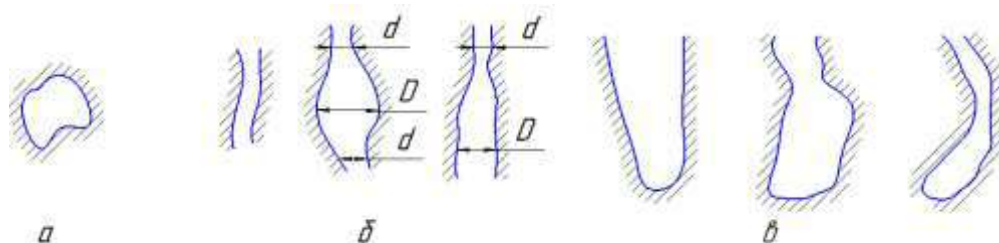
- $\theta < 90^\circ$, краєвий кут змочування гострий – рідина добре змочує підкладку;
- $\theta < 90^\circ$, краєвий кут змочування тупий – рідина погано змочує підкладку;
- $\theta > 180^\circ$ – рідина не змочує підкладку;
- $\theta = 0^\circ$ – не можливо заміряти краєвий кут – повне розтікання рідини.

Отримані розрахункові данні формули 7.2 свідчать, що Al_2O_3 погано змочую графітовану підкладку. Це явище обумовлює хімічну не спорідненість оксиду алюмінію та графіту, а також шорсткість підкладки.

7.6 Аналіз просочення рідкої фази Al_2O_3 в поровий простір електроду

Пори в пористому тілі мають довільну форму та розміри, можуть бути локалізовані як всередині елементів структури твердого тіла (всередині кристалів, фрагментів, блоків, комірок або гранул), так і по їх кордонах, в залежності від формування речовини, її енергетичного балансу, структури.

При оцінці загальної поверхні тіла, поверхню внутрішніх пор не враховується. До відкритих пор відносяться наскрізні та тупикові пори (рисунок 7.16).



а – закрита пора (внутрішня); б – наскрізна пора; в – тупикова пора

Рисунок 7.16 – Види пор в твердому тілі

Відкриті пори класифікуються за розмірами:

- Макропори ($R > 100$ нм);
- Мезопори ($2 < R < 100$ нм);
- Мікропори ($R < 2$ нм).

Розрізняють дві моделі пористого тіла:

- Модель губчастого тіла, отриманого відніманням маси, тобто модель суцільного тіла, що містить пори у вигляді розгалуженої сітки як би

висвердлених каналів. З цією моделлю порівнюють зазвичай пористі середовища, утворені в результаті розкладання або випаровування одного з компонентів, що складають вихідний матеріал, наприклад при корозії речовин, вилуговування їх агресивними середовищами/розчинами, дегідратації, при виділенні з твердого тіла газоподібних частинок в процесі затвердіння, сушки або випалу.

– Корпускулярна модель тіла, отриманого шляхом агрегації дисперсних частинок, відповідно до якої пори представляють зазори між нещільно зрощеними конгломератами частинок, що утворюють сітчастий каркас. Зазначеній моделі відповідає структура ксерогелів, деяких пористих вакуумних конденсатів.

Для пор, які можуть модельовані канонічними формами (найпростіші геометричними фігурами), параметрами дисперсності зазвичай слугують або справжні лінійні, або ефективні (в разі довільних форм поперечного перерізу) розміри. Так подвоєне значення відношення площі f_c нормального перетину порівняно рівноважної пори до його периметру Π називається еквівалентним радіусом пори:

$$R_e = \frac{2 \cdot f_c}{\Pi}$$

Зокрема, для характеристики поперечного розміру відкритих капілярів вводиться так званий гідравлічний радіус [36]:

$$R_h = 0,5 \cdot R$$

В роботі [34] розглядається пористий простір капіляра зернистих матеріалів у вигляді каналу, що змінює свій перетин за синусоїдальним законом, так званий чотковий капіляр, рисунок 7.17.

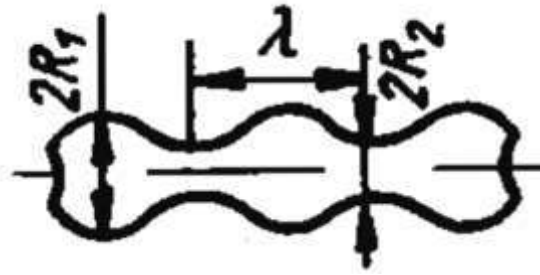


Рисунок 7.17 – Схема чоткового капіляру [34]

Радіус даного капіляра розраховується за формулою [34]:

$$R = \left(\frac{R_1 + R_2}{2} + \frac{R_1 - R_2}{2} \right) \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\lambda}$$

де R_1 – радіус в найширшій частині капіляру;

R_2 – радіус в самій вузькій частині капіляру;

λ – період капіляра;

l – довжина капіляра.

У зернистих пористих структурах залежно від щільності упаковки, відношення R_1 / R_2 становить зазвичай від 1,77 до 1,83.

Особливістю руху рідини в такому капілярі є наявність пульсацій швидкості: на зростаючій частині капілярний тиск зменшується, а площа перетину зростає, в наслідок чого рух сповільнюється, у вузькій частині швидкість підвищена.

У технології отримання композиційних матеріалів, течію рідини можна розглядати як просочення твердого пористого тіла методом натікання рідини на його поверхню. Моделлю такого перебігу рідини зазвичай вважають розтікання краплі рідини по поверхні твердого тіла при наявності на його поверхні відкритих пор. Таким чином, в даному випадку має місце бути одночасне розтікання краплі рідини по поверхні твердого тіла і її проникнення в канали порового простору.

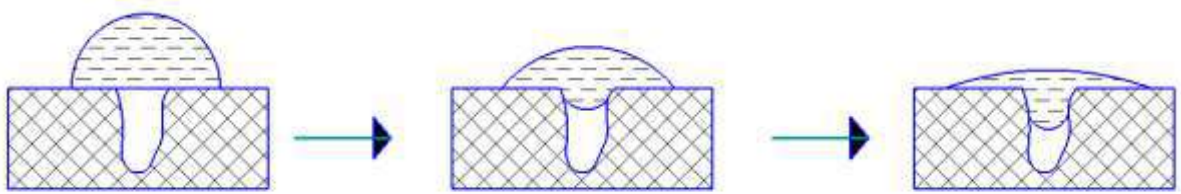


Рисунок 7.17 – кінетика просочення по механізму розтікання

Припустимо, що крапля рідини масою m_0 розтікається по поверхні твердого тіла так, що частина рідини масою m_1 залишається на поверхні, а інша частина масою m_2 проникає в канали порового простору. Однак усюди в процесі течії дотримується умови $m_0 = m_1 + m_2 = \text{const}$ (вплив можливого випаровування рідини не враховується). Висловимо величини мас m_1 і m_2 як:

$$m_1 = a \cdot r^2 \cdot l \quad (7.1)$$

$$m_2 = m_0 - a \cdot r^2 \cdot l \quad (7.2)$$

і запишемо рівняння течії краплі рідини у вигляді системи [9]:

$$\begin{cases} l = \exp(-c \cdot t \cdot r^2) - \left[b - g \cdot r^2 + \frac{\exp\left(\frac{a \cdot r^4 \cdot t}{c}\right)}{a \cdot r^4} \right] \\ r = \left[6 \frac{(S_p - S_\sigma)}{f} \right]^{\frac{1}{6}} \cdot t^{\frac{1}{6}} - 2 \left(\frac{m_0}{a \cdot l} \right)^{\frac{1}{2}} \arcsin \left[\exp \left(0,665 \frac{m_0 \cdot t}{(a \cdot l)^2} \right) \right] / \pi \end{cases} \quad (7.3)$$

$$a = \frac{2r_k \cdot \sigma_{p-r} \cdot \cos \theta}{\rho \cdot \Pi_{ак}} \quad (7.4)$$

$$b = \frac{\Delta \sigma}{\rho \cdot \pi \cdot \Pi_{ак}} \quad (7.5)$$

$$c = \frac{4\mu}{\rho \cdot \Pi_{ак}} \quad (7.6)$$

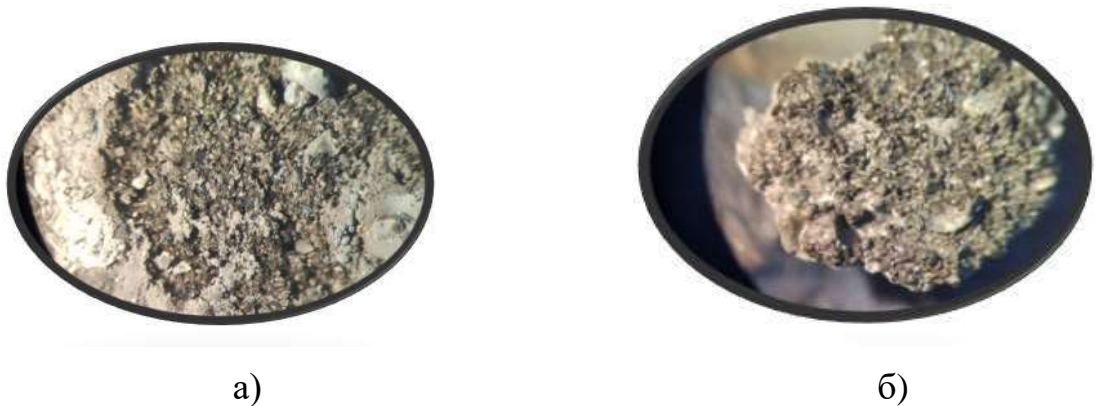
$$S_p = \frac{1,08\pi \cdot \rho \cdot g \cdot r_k^3}{m_n} \quad (7.7)$$

$$S_\sigma = \frac{\pi \cdot \Delta \sigma (r_{max}) r_{max}^2}{m_n} \quad (7.8)$$

$$f = \frac{1,7\mu}{m_n \cdot r_k^3} \quad (7.9)$$

де r_k – радіус капіляру;
 σ_{p-g} – енергія фази на кордоні рідина-газ;
 $\cos\theta$ – краєвий кут змочування;
 ρ – щільність рідини;
 $\Pi_{ак}$ – активна пористість;
 $\Delta\sigma$ – питома поверхнева енергія;
 μ – динамічна в'язкість;
 g – сила тяжіння;
 r_{max} – максимальний радіус капіляру;

За для перевірки теоретичних даних був проведений експеримент, розділ 7.5. Застиглу, сформовану краплю було видалено з підкладки, результати представленні на рисунку 7.19. На підкладці зображено чіткий кратер від краплі, а на самій краплі, з місця її прилягання, залишилися графіт, що демонструє явне когезійне руйнування.



а – кратер на поверхні графіту; б – торець краплі Al_2O_3

Рисунок 7.19 – Результат просочення графіту розплавленою краплею Al_2O_3 , x 50

Проведений розрахунок заповнення капіляра графіту розплавом Al_2O_3 (формула 7.3) при різних температурах виявив, що розплав просочується на незначну глибину графіту ($l = 140$ мкм при 3252 °C). Однак варто зазначити, що цієї глибини просочення вистачає для надійного зчеплення оксиду з

підкладкою, та унеможливорює її скручення та сколювання, результати представлені у вигляді графіку, рисунок 7.20.

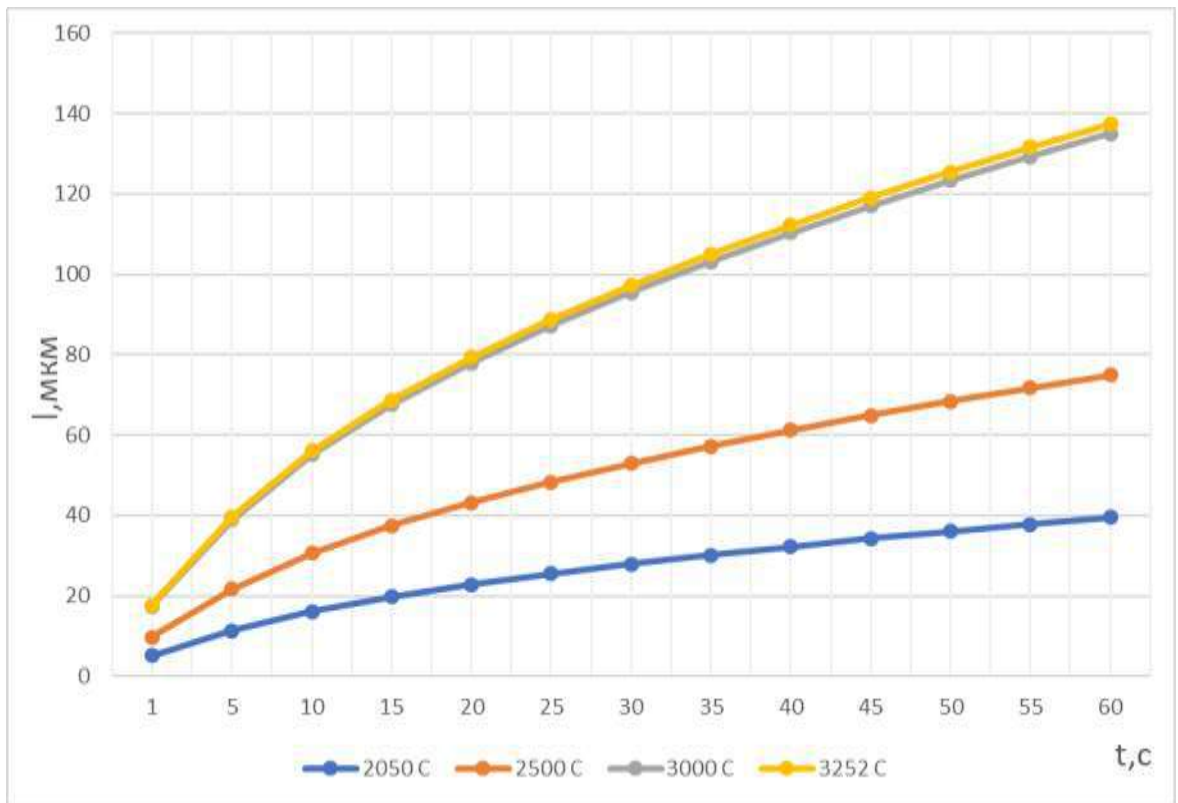


Рисунок 7.20 – Залежність глибини просочення від часу

8 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ

Ідея полягає в збільшенні працездатності графітованих електродів марки ЕГ для руднотермічних/дугових сталеплавильних печей шляхом формування захисного покриття, для стримування високотемпературної корозії. Дана технологія дозволяє зменшити вплив окислення на електроди, підвищити якість плавки та екологічні показники, через зменшення летючих часток вуглецю. Опис ідеї приведений в таблиці 8.1

Таблиця 8.1 – Ідея плазмового напилення електроду

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів
Підвищення ефективності використання електродів шляхом плазмового напилення	1.Вирішення проблем зі збільшення терміну експлуатації електродів	Зменшення витрат на матеріали
	2. Покращення якості продукції	Зменшення витрат на матеріали для рафінації
	3. Покращення санітарних умов експлуатації	Зменшення концентрації шкідливих речовин

Характеристику потенційного ринку представлено в таблиці 8.2

Таблиця 8.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

№	Показники стану ринку	Характеристика
1	Головні конкуренти (заводи-виробники графітових електродів)	Виготовлення захисних покриттів електродів на матеріально-технологічних базах цих підприємств
2	Динаміка ринку	Зростає

Продовження таблиці 8.2

3	Наявність обмежень для входу	Формування капіталовкладень для створення матеріально-технологічної бази
4	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Закупівля спеціального обладнання для напilenня та навчання діючих робітників

Характеристику потенційних клієнтів представлено в таблиці 8.3:

Таблиця 8.3 – Попередня характеристика потенційних клієнтів

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів
1.	Збільшення попиту на продукцію (електроди)	Заводи-виробники	Відсутні	Відповідна якість продукції (електродів)
2.	Зменшення виробничої собівартості продукції (електродів)			Зменшення виробничої собівартості продукції (електродів)

Таблиця 8.4 – SWOT- аналіз проекту виробництва електродів

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
<ul style="list-style-type: none"> – Простота виготовлення; – Низька собівартість матеріалів; – Відсутність додаткових операцій обробки; – Малий час на виготовлення; 	<ul style="list-style-type: none"> – Нижчий строк експлуатації в залежності від промислових електродів (ЕГП/ЕГС);
Можливості:	Загрози:
<ul style="list-style-type: none"> – Можливість швидко налагодити випуск продукції; – Можливість швидко переналадити обладнання. 	<ul style="list-style-type: none"> – Зменшення об'ємів випуску оксидів/сталі; – Підвищення ціни на сировину для виробництва штучних графітів.

Опис цільових груп потенційних споживачів представлено в таблиці 8.5.

Таблиця 8.5 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
	Підприємства, які спеціалізуються на виплавці абразивів	Висока	Великий попит	Низька конкуренція	Легка
Які цільові групи обрано: ПрАТ «Запоріжабразив»					

З метою відображення взаємозв'язків стейкхолдерів на Kartі виокремлено три концентричних області, в яких розміщено всіх зацікавлених осіб інноваційного проекту за можливостями впливу на них ініціатора проекту.

Область внутрішніх стейкхолдерів – область повноважень/відповідальності ініціатора. Внутрішні зацікавлені сторони знаходяться в прямій підлеглості ініціатора, що дозволяє використовувати досить прості методи адміністрування проекту.

Залежні зацікавлені сторони формально ініціатору проекту не підлеглі, проте тісні ділові стосунки потребують на пошук взаємовигідних рішень та компромісів. На периферії ж знаходяться зовнішні зацікавлені сторони. Це область стейкхолдерів опосередкованого впливу на успішність реалізації інноваційного проекту.



Рисунок 8.1 – Карта стейкхолдерів

8.1. Технічне нормування операцій

Нормування операції транспортування електроду здійснюється згідно наступної формули:

$$T_{\text{трансп}} = t_{\text{осн}} + t_1 \cdot k = 8 + 4 \cdot 1,13 = 12,52 \text{ хв} \quad (8.1)$$

де $t_{\text{осн}}$ – основний машинний час на транспортування за допомогою консольного крану електроду = 8 хв;

t_1 – час, потрібний на встановлення, закріплення та зняття електроду з установки = 4 хв;

Нормування операції плазмового напилення електродів здійснюється згідно наступного співвідношення:

$$T_{\text{напил}} = t_{\text{осн}} + (t_1 + t_2 + t_3) \cdot k = 51,4 + (4 + 0,61 + 1,44 + 1,5 + 4) \cdot 1,13 = 64,45 \text{ хв.} \quad (8.2)$$

де $t_{\text{осн}}$ – основний машинний час операції плазмового напилення;

t_1 – час, потрібний на встановлення, закріплення та зняття електроду з установки = 4 хв.;

t_2 – час, потрібний для огляду заготовки = 0,61 хв;

t_3 – час, потрібний для продувки електроду = 1,44 хв;

t_4 – час, потрібний для очистки 1-го шару електроду = 1,5 хв;

t_5 – час, потрібний для візуального огляду напиленого покриття електроду = 4 хв;

k – коефіцієнт, який враховує витрати часу на природні потреби робітника, відпочинок та обслуговування робочого місця = 1,13.

Для визначення машинного часу, необхідного для виконання операції плазмового напилення одного електроду, потрібно розрахувати масу покриття $m_{\text{покр}}$ (кг) та продуктивність процесу (кг / год).

Визначаємо масу покриття $m_{\text{покр}}$:

$$a_{\text{покр}} = 942,48 \text{ мм} = 0,94248 \text{ м};$$

$$h_{\text{покр}} = 0,4 \text{ мм} = 0,0004 \text{ м};$$

$$l_{\text{покр}} = 1200 \text{ мм} = 1,2 \text{ м};$$

$$\rho_{\text{мет}} = 2680 \text{ кг / м}^3;$$

$$V_{\text{покр}} = a \cdot h \cdot l = 0,94248 \cdot 0,0004 \cdot 1,2 = 0,00045 \text{ м}^3;$$

$$m_{\text{покр}} = V_{\text{покр}} \cdot \rho = 0,00045 \cdot 2680 = 1,2 \text{ кг} \quad (8.3)$$

Визначаємо продуктивність процесу плазмового напилення $G_{\text{н}}$:

$$d_{\text{др}} = 1,2 \text{ мм} = 0,0012 \text{ м};$$

$$V_{\text{пд}} = 555 \text{ м / год};$$

$$\rho_{\text{мет}} = 2680 \text{ кг / м}^3;$$

$$\psi = 0,85;$$

$$S_{\text{дроту}} = \pi \cdot r^2 = 3,14 \cdot 0,0006^2 = 0,0000011 \text{ м}^2;$$

$$V_{\text{дроту}} = S_{\text{дроту}} \cdot h_{\text{дроту}} (V_{\text{пд}}) = 0,0000011 \cdot 555 = 0,00063 \text{ м}^3;$$

$$m_{\text{дроту(розпил)}} = V_{\text{дроту}} \cdot \rho_{\text{мет}} = 0,00063 \cdot 2680 = 1,7 \text{ кг};$$

$$m_{\text{дроту(напил)}} = m_{\text{дроту(розпил)}} \cdot \psi = 1,7 \cdot 0,85 = 1,4 \text{ кг};$$

$$m_{\text{дроту(напил)}} = G_{\text{н}} \text{ за 1 год} = 1,4 \text{ кг / год}.$$

Визначаємо машинний час $t_{\text{очн}}$ на напилення одного електроду.

Знаючи продуктивність плазмотрону $G_{\text{н}}$ за одну годину (60 хв) та масу напилюваного покриття $m_{\text{покр}}$ складаємо рівняння пропорції:

$$\frac{G_{\text{н}}}{m_{\text{покр}}} = \frac{60 \text{ хв}}{x} \quad (8.4)$$

де x – машинний час напилення одного електроду

Визначаємо машинний час x :

$$\frac{1,4}{1,2} = \frac{60 \text{ хв}}{x} = 51,4 \text{ хв}$$

Визначаємо норму часу на підготовчо-заклучні операції:

$$t_{\text{пз}} = (t_{\text{отр}} + t_{\text{озн}} + t_{\text{одерж}} + t_{\text{нал}} + t_{\text{зд}}) \cdot k = (3 + 5 + 4 + 5 + 6) \cdot 1,13 = 23 \text{ хв (8.5)}$$

де $t_{\text{отр}}$ – отримання виробничого завдання, наряду, технічної документації, вказівок та інструктажу = 3 хв;

$t_{\text{озн}}$ – ознайомлення з отриманим завданням, технологічною документацією, та кресленням = 5 хв;

$t_{\text{одерж}}$ – одержання інструментів та пристосувань = 4 хв;

$t_{\text{нал}}$ – налагодження устаткування на заданий режим роботи = 5 хв;

$t_{\text{зд}}$ – здача виконаної роботи, пристосувань, інструментів, технічної документації та прибирання робочого місця = 6 хв.

Норми часу на виконання технологічних операцій за технологією наведені в таблиці 8.6.

Таблиця 8.6 – Нормування технологічних операцій процесу

Найменування операцій	Норма часу на виріб, н / год.
Транспортування	0,21
Напилення	1,07
Підготовчо-завершальна	0,38
Всього	1,66

На основі розрахованих норм часу по виготовленню виробів встановлюємо річну виробничу програму у кількості 1943 штук (таблиця 8.7).

Таблиця 8.7 – Виробнича програма виробів на рік

Найменування виробу	Норма часу на виріб, н / год.	Виробнича програма	
		шт.	Н / год.
Електрод з покриттям	1,66	1943	3225,6

8.1.1 Розрахунок кількості обладнання, площі ділянки

Розрахунок необхідної кількості обладнання по кожному типу ведеться за формулою:

$$G_p = \sum_{i=1}^m \frac{t_i \cdot N_i}{F_{до}}, \quad (8.6)$$

- де G_p – кількість обладнання за розрахунком, одиниць;
 m – кількість видів работ;
 t_i – норма часу і-тої операції, нормо-годин;
 N_i – річна виробнича програма виробів, одиниць;
 $F_{до}$ – дійсний річний фонд часу роботи обладнання, годин;

$$G_{p.крану} = \frac{t_i \cdot N_i}{F_{до}} = \frac{0,21 \cdot 1943}{3225,6} = 0,13 = 1$$

- де t_i – 0,21 н / год
 N_i – 1943 шт;
 $F_{до}$ – 3225,6 год;

$$G_{p.плазмотрону} = \frac{t_i \cdot N_i}{F_{до}} = \frac{1,07 \cdot 1943}{3225,6} = 0,64 = 1$$

де $t_i - 1,07$ н / год

$N_i - 1943$ шт;

$F_{до} - 3225,6$ год;

Прийнята кількість обладнання встановлюється шляхом округлення до цілої величини ($G_{пр}$).

Коефіцієнт завантаження обладнання визначається за формулою:

$$K_z = \frac{G_p}{G_{пр}}, \quad (8.7)$$

де $G_{пр}$ - прийнята кількість обладнання, одиниць.

$$K_{з.крану} = \frac{G_p}{G_{пр}} = \frac{0,13}{1} = 0,13$$

$$K_{з.плазмотрону} = \frac{G_p}{G_{пр}} = \frac{1,07}{1} = 1,07$$

Середній коефіцієнт завантаження обладнання на ділянці повинен бути не нижче, чим 0,85.

Дійсний річний фонд часу роботи устаткування визначаються за формулою:

$$F_{до} = F_{ном}(1 - K_b), \text{ годин} \quad (8.8)$$

де $F_{ном}$ – номінальний фонд часу роботи обладнання, годин;

K_b – коефіцієнт витрат часу на ремонт та обслуговування обладнання, $K_b = 0,1$;

Номінальний річний фонд часу обладнання при п'ятиденному робочому тижні та двозмінному режимі роботи – 3584 год.;

$$F_{до} = 3584 \cdot (1 - 0,1) = 3225,6 \text{ год,}$$

Таблиця 8.8 – Розрахунок кількості обладнання та його потужності

Найменування обладнання	Кількість обладнання		Коефіцієнт завантаженн я	Потужність двигунів, кВт / год.	
	за розрахун ком	прийма та		одиниці	усього обладнан ня
Пост для напилання	1,07	1	1,07	3	21,5
Кран консольний	0,13	1	0,13	1	4
Всього				4	25,5

Виробнича площа розраховується виходячи з кількості обладнання, робочих місць і питомої площі на одиницю обладнання з додаванням 20 % (проходи, проїзди та ін.). Площа ділянки $18 \cdot 12 = 216 \text{ м}^2$.

8.1.2 Розрахунок чисельності персоналу ділянки

Чисельність основних виробничих робітників ділянки на нормованих роботах розраховується за операціями згідно розрядам і професіям за формулою:

$$R_0 = \frac{\sum_{i=1}^m t_i \cdot N_i}{F_{д.р} \cdot K_{в.н}}, \text{ осіб} \quad (8.9)$$

$$R_{0.\text{крану}} = \frac{0,13 \cdot 1943}{3046 \cdot 1,05} = 0,08 = 1 \text{ особа}$$

$$R_{0.\text{плазмотрону}} = \frac{1,07 \cdot 1943}{3046 \cdot 1,05} = 0,65 = 1 \text{ особа}$$

Продовження таблиці 8.9

технолог	2							1	1
Усього	4								
Разом	6								

8.2 Планування витрат на виробництво

У даному підрозділі розраховано заплановані матеріальні витрати на основні засоби, фонд оплати праці персоналу, складено калькуляція собівартості продукції.

8.2.1 Матеріальні витрати

Вартість основних і додаткових матеріалів розраховується на основі норм використання та цін. Крім того, необхідно врахувати транспортно-заготівельні витрати (від 5 % до 7 % від вартості матеріалів) та вартість оборотних відходів.

До основних матеріалів слід віднести металопрокат для заготовок, виготовлених на складально-зварювальному ділянці. Вартість основних матеріалів вказана в табл. До додаткових матеріалів слід віднести ті матеріали, які використовуються для здійснення технологічних процесів (зварювальні дроти та газу). Вартість додаткових матеріалів вказана в таблиці 8.10.

Таблиця 8.10 – Розрахунок вартості основних та допоміжних матеріалів для плазмового напилення електроду

Найменування матеріалу	Норма витрат		Ціна за 1 кг (балон), грн	Вартість програми грн	З урахуванням транспортних витрат
	На виріб кг (л)	На програму кг (л)			
Дріт марки АК-5	1,2	2331,6	150	349740	374222
Аргон зварювальний	1542	2996106	400	199740	213722
Вольфрамовий електрод 2,4 мм	0,00109	2,1	150	315	337
Всього	-	-	-	549795	588281

* Обсяг 1 балона 6000 літрів

8.2.2 Вартість основних засобів

Вартість основних виробничих фондів передбачає такі розрахунки:

– вартість будівель визначається на основі розрахованої загальної площі і вартості 1 м² будівель (12815 грн. за 1 м²):

$$V_{\text{буд}} = 216 \cdot 12815 = 2768040 \text{ грн.} \quad (8.11)$$

– вартість споруд 5 % від вартості будівель:

$$V_{\text{спр.}} = 2768040 \cdot 0,05 = 138402 \text{ грн.} \quad (8.12)$$

- вартість обладнання (таблиця 8.11) з урахуванням транспортно-заготівельних витрат і монтажу (від 10 % до 15 %).
- вартість цінних інструментів, пристосувань, інвентарю (від 3 % до 5 % балансової вартості обладнання);
- вартість транспортних засобів (3 % балансової вартості обладнання).

Таблиця 8.11 – Розрахунок вартості обладнання

Найменування обладнання	Ціна, грн..
Обладнання для плазмового напилення	30000
Кран консольний	50000
Всього	94400

Розрахунок вартості основних засобів, амортизаційних відрахувань, структури основних засобів наведено в таблиці 8.12.

Таблиця 8.12 – Вартість основних засобів

Найменування основних засобів	Балансова вартість, грн.	Нормативний строк експлуатації, роки	Амортизаційні відрахування, тис. грн.
1.Виробничі будівлі	2768040	45	61,512
2. Споруди	138402	30	4,613
3. Обладнання	94400	5	18,880
Усього	3000842		84,925

8.2.3 Розрахунок фонду оплати праці

Сума заробітної плати, яка виплачується працівникам підприємства, формує фонд оплати праці. Фонд заробітної плати розраховується за прийнятими формами і системами оплати праці. Оплата праці основних робітників здійснюється за відрядно-преміальною формою оплати праці; керівників та спеціалістів – по штатно-окладною формою оплати праці.

Плановані доплати і премії для робітників приймаємо в розмірі 40 % від тарифної заробітної плати. Премії з прибутку складають для робітників – 15 % до тарифної заробітної плати, для керівників і фахівців – 40 %.

Розраховуємо тарифний фонд заробітної плати основних робітників за формулою:

$$Z_{\text{тар}} = N \sum_{i=1}^m P_i, \quad (8.13)$$

де m – кількість операцій технологічного процесу;

P_i – розцінка на i -ту операцію, табл.;

N – річна виробнича програма виробів;

Розцінка на операцію розраховується за формулою:

$$P_i = C_i \cdot t_i, \quad (8.14)$$

де C_i – годинна тарифна ставка i -того розряду;

t_i – норма штучного часу на t_i -ту операцію, нормо-год;

Розрахунок розцінок зведений в таблиці 8.13.

Таблиця 8.13 – Розрахунок розцінок за операціями за базовою технологією

Найменування операції	Норма часу, н/год.	Розряд робіт	Годинна тарифна ставка, грн.	Розцінка, грн.
Складання	0,13	4	80	10,4
Напилення	1,07	4	100	107
Усього				117,4

Річний фонд заробітної плати ІТР приведений в таблиці 8.14.

Таблиця 8.14 - Розрахунок фондів заробітної плати ІТР

Посада	Чисельність, чол.	Місячний оклад, грн.	Річний фонд, грн.
1. Майстер	2	14400	172800
2. Технолог	2	13800	165600
Усього	4	28200	338400

Фонд оплати праці розрахований і приведений в таблиці 8.15.

Таблиця 8.15 – Фонд оплати праці

Категорія персоналу	Чисельність персоналу, чол.	Фонд оплати праці, тис. грн.			Премії з прибутку, тис. грн.	Фонд оплати праці, тис. грн.	Відрахування на соц. страхування, тис. грн.	Середня зарплата в місяць, грн.
		Основна зарплата	Додаткова зарплата	Усього				
1. Основні виробничі робочі	2	228108	91243	319351	47903	367254	70257	13306
2. Майстер	2	172,8	69,120	241,92	36,288	278,208	53,222	10080
3. Технолог	2	165,6	66,24	231,84	34,776	273,24	51,005	9660
Усього	6	566508	226603	793111	118967	918702	174484	11015

8.2.4 Собівартість виробу

Собівартість виробу визначається усіма витратами ділянки за такими статтями прямих і непрямих витрат.

8.2.4.1 Прямі витрати

1. Основні та допоміжні матеріали – 588,281 тис. грн. (таблиця 8.15);

2. Основна заробітна плата основних виробничих робітників – 228,108 тис. грн. (таблиця 8.15);

3. Додаткова заробітна плата основних виробничих робітників, премії – 91,243 тис. грн. (таблиця 8.15);

4. Відрахування на соціальне страхування від фонду оплати праці основних виробничих робітників – 22 % від ($ЗП_{осн.} + ЗП_{дод.}$) – 70,257 тис. грн;

5. Паливо та енергія на технологічні цілі:

$$E = C \cdot U \cdot I \cdot t \cdot N = 53384 \text{ грн} \quad (8.15)$$

де $C = 3,18$ грн. – вартість 1 кВт електроенергії;

$U = 60$ В – зварювальна напруга;

$I = 0,12$ кА – зварювальний струм;

$t_{шт.напил} = 1,07$ год. – час напилення;

$t_{шт.склад.} = 0,13$ год. – час транспортування.

Таблиця 8.16 – Прямі витрати на виробництво захисного покриття

Найменування статті	Сума, грн
Основні та допоміжні матеріали	588281
Основна заробітна плата основних виробничих робітників	228108
Додаткова заробітна плата основних виробничих робітників	91243
Відрахування на соціальне страхування від фонду оплати праці основних виробничих робітників	70257
Паливо та енергія на технологічні цілі	53384
Усього	1031273

8.2.4.2 Непрямі витрати

Стаття «Утримання та експлуатація машин і обладнання» комплексна і охоплює такі витрати:

1. Утримання обладнання і робочих місць.

$$E_s = C \cdot F_{до} \cdot W \cdot K_3 \cdot K_s = 3,18 \cdot 3225,6 \cdot 25,5 \cdot 1,2 \cdot 0,8 = 251101 \text{ грн (8.16)}$$

де C – вартість 1 кВт електроенергії = 3,18 грн.;

$F_{до}$ – номінальний річний фонд часу обладнання = 3225,6 год;

W – потужність всього устаткування дільниці = 25,5 кВт / год;

K_3 – коефіцієнт завантаження обладнання = 1,2;

K_s – коефіцієнт попиту, який враховує витрати електроенергії в мережі = 0,8.

2. Поточний ремонт обладнання – 5 % від їх вартості – 4,72 тис. грн.

3. Амортизація виробничого обладнання та дорогих інструментів – 18,88 тис. грн.

Таблиця 8.17 – Витрати на утримання та експлуатація машин і обладнання

Найменування витрат	Сума, грн
Утримання обладнання і робочих місць	251101
Поточний ремонт обладнання	4720
Амортизація виробничого обладнання та дорогих інструментів	18880
Усього	274701

Витрати на утримання та експлуатацію обладнання розподіляють на собівартість одиниці продукції пропорційно основній заробітній платі виробничих робітників.

Розраховується відсоток витрат на утримання та експлуатацію обладнання за формулою:

$$L = \frac{\sum \text{ВУО}}{\text{ЗП}_0} \cdot 100 \% = \frac{274701}{228108} \cdot 100 = 120 \% \quad (8.17)$$

де ВУО – сума витрат на утримання обладнання = 274,701 тис. грн.;

ЗП₀ – основна заробітна плата виробничих виробників = 228,108 тис. грн.

Розмір витрат на утримання та експлуатацію обладнання, що припадає на одиницю виробу розраховуються за формулою 8.18:

$$\text{ВУ}_i = \frac{L}{100} \cdot \text{З}_{oi} = \frac{120}{100} \cdot 117,4 = 140,8 \text{ грн} \quad (8.18)$$

де З_{oi} – основна заробітна плата на одиницю продукції = 107,4 грн.

Стаття «Загальновиробничі витрати» – це витрати на управління в межах цеху. Стаття комплексна і охоплює такі витрати:

1) Утримання цехового персоналу – річний фонд заробітної плати спеціалістів і керівників – 473,760 і відрахування на соціальні заходи – 104,227 тис. грн.

2) Утримання приміщень та інвентарю:

– вартість освітлювальної електричної енергії:

$$E_{oc} = \frac{C \cdot q \cdot S \cdot F_{oc}}{1000} = \frac{3,18 \cdot 20 \cdot 216 \cdot 2000}{1000} = 27475,2 \text{ грн.} \quad (8.19)$$

де С – вартість 1 кВт електроенергії = 3,18 грн.;

q – норма використання електричної енергії за годину на 1м² площі = 20 Вт;

S – площа ділянки = 216 м²;

F_{oc} – тривалість освітлення в рік = 2000 год, при двозмінній роботі дільниці.

– вартість води на побутові нужди:

$$S_{пн} = S_{в} \cdot Q_{в} = 24,2 \cdot 1800 = 43560 \text{ грн.} \quad (8.20)$$

де $S_{в}$ – вартість 1 м^3 води = 24,2 грн;

$Q_{в}$ – річна норма видачі води = 1800 м^3 .

– вартість пари на опалення:

$$S_{по} = \frac{S_{пар} \cdot V \cdot H \cdot q}{i \cdot 500} = \frac{35 \cdot 570 \cdot 4224 \cdot 20}{540 \cdot 500} = 6242 \text{ грн.} \quad (8.21)$$

де $S_{пар}$ – вартість 1 т. пари = 35 грн;

V – об'єм приміщення дільниці = 570 м^3 ;

H – число годин опалювального сезону = 4224 год;

q – питома витрата тепла на 1 м^3 будівлі = 20 ккал / год;

i – тепловіддача = 540 ккал.

3) Амортизаційні відрахувань будівель і споруд – 66,125 тис. грн.

4) Витрати на проведення випробувань, досліджень, раціоналізації та винахідництво – 2000 грн.

5) Витрати на охорону праці – 3500 грн.

Таблиця 8.18 – Загально виробничі витрати

Найменування статті	Сума, грн
Утримання цехового персоналу	577987
Утримання приміщень та інвентарю	77277,2
Амортизаційні відрахувань будівель і споруд	66125
Витрати на проведення випробувань, досліджень, раціоналізації та винахідництво	2000

Продовження таблиці 8.18

Витрати на охорону праці	3500
Усього	726889,2

Загальновиробничі витрати розподіляють на собівартість одиниці продукції пропорційно основній заробітній платі виробничих робітників.

$$L = \frac{\Sigma ЗВВ}{ЗП_0} \cdot 100 \% = \frac{726889,2}{228108} \cdot 100 = 319 \% \quad (8.22)$$

де $\Sigma ЗВВ$ – сума загальновиробничих витрат = 726,889 тис. грн.;

$ЗП_0$ – основна заробітна плата виробничих виробників = 228,108 тис. грн.

Розрахуємо загальновиробничі витрати, які відносяться на собівартість одиниці продукції:

$$ЗВ_i = \frac{L}{100} \cdot З_{oi} = \frac{319}{100} \cdot 117,4 = 374 \text{ грн.} \quad (8.23)$$

де $З_{oi}$ – основна заробітна плата на одиницю продукції = 117,4 грн.

Адміністративні витрати вміщують витрати, пов'язані з утриманням адміністративно - управлінського персоналу підприємства, а також утриманням та експлуатацією основних засобів загального виробничого призначення, охорону праці та техніку безпеки персоналу та інші. Адміністративні витрати складають в середньому 50 % від основної заробітної плати основних виробничих робітників та розраховуються за формулою:

$$АВ_i = \frac{L}{100} \cdot З_{oi} = \frac{50}{100} \cdot 117,4 = 58,7 \text{ грн} \quad (8.24)$$

де $L = 50 \%$;

$З_{oi}$ – основна заробітна плата на одиницю продукції = 117,4 грн.

Витрати на збут складаються з витрат, пов'язаних з реалізацією продукції і вміщують витрати на тару та тарні матеріали, транспортування готової продукції, рекламу, витрати на маркетингові дослідження та інші. Витрати на збут складають 2 % від виробничої собівартості і розраховуються за формулою:

$$ВЗ_i = \frac{L}{100} \cdot C_v = \frac{2}{100} \cdot 1046 = 21 \text{ грн.} \quad (8.25)$$

де C_v – собівартість виробнича = 1046 грн;

Таблиця 8.19 – Калькуляція собівартості напилювальних робіт

Стаття витрат	За запропонованою технологією	
	Всього витрат, грн	На одиницю, грн
1	2	3
1.Основні та допоміжні матеріали	588281	302,8
2.Основна заробітна плата основних робітників	228108	117,4
3.Додаткова заробітна плата основних робітників	91243	47
4.Відрахування на соціальні заходи	70.257	36
5.Паливо і енергія на технологічні цілі	53384	27,4
6.Утримання та експлуатація машин і обладнання	274701	141
7.Загальновиробничі витрати	725930,4	374
8.Виробнича собівартість	2031904,4	1046
9.Адміністративні витрати	114054	53,7
10. Витрати на збут	40803	21
11. Повна собівартість	2186761,4	1125,5

8.3 Економічне обґрунтування запропонованих розробок

В даному розділі необхідно розрахувати річний економічний ефект, який можливо отримати при виробництві виробів на спеціалізованій дільниці по запропонованому технологічному процесу в порівнянні з виробництвом цих же виробів на діючому підприємстві. Крім цього необхідно оцінити ефективність і результативність діяльності виробничої дільниці або потокової лінії; розрахувати беззбитковість виробництва, побудувати графік беззбитковості.

8.3.1 Розрахунок економічного ефекту

Порівняльна економічна ефективність полягає у визначенні найбільш економічного варіанта рішення господарської задачі. Показниками порівняльної економічної ефективності є: сума зведених витрат, сума ефекту за розрахунковий рік. Показник зведених витрат:

$$З = C_i + E_n \cdot K_i \quad (8.26)$$

де C_i – поточні витрати (повна собівартість) = 2186761,4 грн;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень = 0,15;

K_i – капітальні вкладення в проєкт = 725930,4 грн.

$$Z_{\text{нап ел}} = 2186761,4 + 0,15 \cdot 725930,4 = 2295651 \text{ грн}$$

$$Z_{\text{ел}} = 3077712 \text{ грн}$$

Економічний ефект E за розрахунковий рік:

$$E = Z_{\text{ел}} - Z_{\text{нап ел}} = 3077712 - 2295651 = 782061 \text{ грн} \quad (8.27)$$

8.3.2 Ефективність та результативність

Оцінку ефективності та результативності діяльності можна здійснити по показникам:

- 1) Річний випуск виробів:
 - в натуральному вимірі, одиниць;
 - по трудомісткості, нормо-годин;
 - в грошовому вимірі, грн.;
- 2) Виробнича площа ділянки, м²;
- 3) Вартість основних засобів, грн.;
- 4) Спискова чисельність осіб, в тому числі:
 - основні робочі;
 - керівники та спеціалісти;
- 5) Фонд оплати праці, грн.;
- 6) Середня заробітна плата за місяць, грн.;
- 7) Продуктивність праці одного працівника:

$$ПП = \frac{C_{\text{п}}}{R} = \frac{2186761,4}{6} = 364460 \text{ грн} \quad (8.28)$$

де $C_{\text{п}}$ – повна собівартість виробу = 2186761,4 грн;

R – чисельність працівників = 6.

- 8) Фондовіддача:

$$f = \frac{C_{\text{п}}}{\Phi_{\text{осн}}} = \frac{2186761,4}{725930,4} = 3 \frac{\text{грн.}}{\text{грн.}} \quad (8.29)$$

де C_{Π} – повна собівартість виробу = 2186761,4 грн;

$\Phi_{\text{осн}}$ – основний капітал = 725930,4 грн.

9) Фондомісткість:

$$f' = \frac{\Phi_{\text{осн}}}{C_{\Pi}} = \frac{725930,4}{2186761,4} = 0,33 \frac{\text{грн}}{\text{грн}} \quad (8.30)$$

10) Коефіцієнт завантаження обладнання;

11) Собівартість одиниці продукції;

Таблиця 8.20 – Показники ефективності і результативності

Найменування показника	Значення показника
1. Річний випуск виробів	
– в натуральному вимірі, одиниць	1943
– по трудомісткості, нормо-год	3046
– в грошовому вимірі, грн	2186761,4
2. Виробнича площа ділянки, м ²	216
3. Вартість основних засобів, грн	3000842
4. Спискова чисельність персоналу усього, осіб:	
– основні робітники	2
– керівники і спеціалісти	4
5. Фонд оплати праці, грн	793111
6. Середня заробітна плата працюючих за місяць, грн	13306
7. Продуктивність праці одного працівника, грн / чол	364460
8. Фондовіддача грн / грн	3
9. Коефіцієнт завантаження обладнання	1
10. Фондомісткість грн / грн	0,33
11. Пована собівартість одиниці продукції, грн	1125,5

Продовження таблиці 8.20

12. Економічний ефект за розрахунковий рік, грн	782061
---	--------

8.4 Висновки по розділу техніко–економічні розрахунки

Таким чином використання технології плазмового нанесення струмоведучим дротом алюміній-кремнієвого захисного покриття на графітовані електроди ЕГ підвищують техніко-економічні показники та ресурс роботи виробу.

Перевагами даної технології :

- Зниження впливу високотемпературної корозії на 20 %.
- Відсутність додаткових операцій обробки, що знижує собівартість виробу та збільшує кількість вироблених електродів.
- Можливість швидко переналагодити обладнання для випуску іншої продукції або для роботи на внутрішній ринок.
- Економічний ефект даної технології сягає 782061 гривень в рік.

9 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКИ У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В розділі надані основні заходи з охорони праці при дослідженні стійкості захисного покриття графітованих електродів до високотемпературної корозії.

9.1 Аналіз потенційних небезпек

а) Небезпеки, які пов'язані з порушенням роботодавцями вимог нормативних актів з охорони праці стосовно забезпечення безпеки умов праці працівників, а саме:

– щодо організації проведення навчання та перевірки знань з питань охорони праці, відсутності інструкцій, плакатів, схем тощо;

– щодо облаштування робочих зон та робочих місць в приміщенні дослідницької лабораторії, зокрема це може бути пов'язано з невідповідності розмірів робочих зон, а також максимально можливої кількості осіб, що можуть там перебувати;

б) Можливість ураження електричним струмом, при виконанні службових обов'язків внаслідок порушення правил з електробезпеки, несправності енергоспоживаючого обладнання, відсутності групових або індивідуальних засобів захисту, що може призвести до електричних травм або летального наслідку;

в) Небезпеки які пов'язані з визначенням хімічного складу дослідницьких матеріалів методами: рентгенографічного аналізу за допомогою дифрактометру ДРОН-7 М, в якому є наявність проникаючого

іонізуючого випромінювання, що може призвести до онкологічних захворювань;

г) Небезпеки які пов'язані з проведенням металографічних досліджень, зокрема:

– Можливість отримання механічних травм при виготовленні зразків з використанням метало оброблювального обладнання або абразивних інструментів;

– Можливість отримання хімічних опіків при травленні, що пов'язано з порушенням технології;

– Можливість ушкоджень зору при хибній калібровці світлофільтру.

г) Небезпеки які пов'язані з визначенням пористості з використанням рентгеноскопії, що пов'язано з наявністю іонізуючого випромінювання, що може призвести до зниження імунітету.

д) Небезпеки які пов'язані з нанесенням жаростійких алюміній-кремнієвих покриттів на поверхню електродів, методом плазмового нанесення, а саме:

– Можливість ураження електричним струмом використовуваних плазмотронів;

– Можливість ураження органів зору ультрафіолетовим випромінюванням;

– Можливість отримання термічних опіків внаслідок відсутності індивідуальних засобів захисту.

е) Небезпеки які пов'язані з визначенням жаростійких властивостей захисних покриттів, а саме:

– Можливість отримання негативного впливу інтенсивного теплового випромінювання при витримці електродів та температурі від 1000 °С до 1200 °С;

– Можливість тяжких механічних травм при порушенні правил зберігання, переміщення та експлуатації судин, що працюють під тиском;

- Можливість отруєння аргоном та отруйних парів речовин при напиленні;
 - Можливість ушкодження органів слуху через підвищений рівень шуму.
- є) Небезпеки які пов'язані з обробкою результатів досліджень з використанням ПК, що може призвести до зниження працездатності.
- ж) Недостатній рівень освітлення в дослідницькій лабораторії, може бути пов'язано з виходом з ладу освітлювальних приборів.
- з) Невідповідність параметрів умов вимог санітарно-гігієнічних правил.
- и) Можливість загорянь внаслідок порушень правил з пожежної безпеки.

9.2 Заходи забезпечення безпеки

а) Згідно вимог НПАОП 0.00-7.11-12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників» передбачено:

– усі працівники повинні пройти навчання та перевірку знань з питань охорони праці відповідно до «Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці», затвердженого наказом Держнагляддохоронпраці (Держпраці) від 26.01.2005 №15. Роботодавець повинен забезпечити повну і вичерпну інформацію працівників з питань охорони праці як відносно підприємства в цілому так і відносно специфіки виконуваних робіт на робочих місцях, де зазначені можливі небезпечні ситуації та заходи для їх запобігання. Найбільш ефективним є проведення відповідних інструктажів (вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий) [36].

б) Для виключення можливості уражень електричним струмом у відповідності ПУЕ-17 «Правила устаткування електроустановок – споживачів» обов'язково є:

– Всі співробітники повинні пройти навчання та перевірку знань з електробезпеки (спеціальне навчання за правилами) на перевірку знань з отриманням посвідчення за відповідною групою з електробезпеки [37].

– У відповідності до ДСТУ 7237:2011. «Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту» обов'язково є періодична (один раз на рік) перевірка опору заземлюючих контурів (4 Ом до 1000 В, 10 Ом після 1000 В) та перевірка електроз'єднань [38].

– Для захисту від ураження електричним струмом передбачено використання подвійної ізоляції провідників. Розташування струмоведучих частин виконується на недоступній висоті (до 1000 В, $h - 3,5$ м; більше 1000 В, $h - 6$ м). У разі не ізольованих струмопровідних ліній вони повинні бути надійно огорожені, відкриття або заміну яких виконую спеціальний персонал за допомогою ключів.

– Електрообладнання дільниці напилання повинне відповідати вимогам НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила техніки безпеки при використанні електрообладнання електроспоживачів» а саме: зварювальні дроти повинні бути гнучкими, з легкою, міцною ізоляцією; довжина дроту від струмозмінника не більше трьох метрів, саме з'єднання представляє з себе пристрій байонетного типу. По відношенню до джерел живлення основним заходом безпеки є недопущення потрапляння струму в ланцюг при переривах в процесі напилання, для чого потрібно використовувати автоматичні вимикачі [39].

в) При визначенні хімічного складу дослідницьких матеріалів з використанням рентгеноспектрального аналізу, основними заходами безпеки є:

– Оскільки основною небезпекою є іонізуюче рентгенівське випромінювання обов'язковим є наявність захисних екранів, інструкції до виконання робіт передбачені часом та відстанню, що відповідає НРБУ-97 [40].

г) – Для уникнення механічних травм при визначенні властивостей захисних покриттів необхідно працювати на справному станку, своєчасно проводити заміну деталей, термін експлуатації яких вже закінчився та

використовувати захисні окуляри та рукавиці; для виключення травмування органів зору передбачено застосування захисних окулярів, які служать для захисту очей від ушкоджень частками твердих тіл, що летять попереду, знизу і збоку. Ці окуляри оснащені фігурними боковинами, що відкидаються.

– При проведенні металографічних досліджень за допомогою хімічних реактивів необхідно:

– Використовувати засоби індивідуальні захисту, а саме: халати, гумові рукавички, окуляри;

– Чітко дотримуватись рецепту виготовлення реактивів;

– Мати при собі речовини для деактивації кислот.

– Дотримуватися правил ПП 1.3.10-450-2006. «Примірна інструкція з охорони праці при виконанні робіт з кислотами і лугами» [41].

– При проведенні металографічних досліджень з використанням мікроскопів типу МІМ-8, основними видами захисту є:

– Оптимальна комбінація об'єктивів та окулярів мікроскопу;

– Обов'язкове використання світлофільтрів.

г) Подальше дослідження передбачає визначення наявності пор по перерізу дослідницького графітованого електроду. Дослідження можна провести за допомогою рентгеноскопа фірми Tesla ABS-540. Основну увагу слід приділяти шкідливій дії іонізуючого випромінювання, конструкцію апарату вакуумувати, що дасть змогу суттєво зменшити потужність іонізуючого випромінювання. Також додержуватись правил НРБУ-97.

д) При нанесенні жаростійких покриттів на графітований електрод методом плазмового напилення для отримання дослідницьких зразків, необхідно:

– Дотримуватись правил ПУЕ-17, при роботі з електроустаткуванням;

– За для збереження органів зору та відкритих частин тіла від ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання потрібно використовувати захисні маски зі ступенем затемнення 13 DIN згідно ДСТУ EN 379:2017 [42].

е) При випробуванні дії високотемпературної корозійної стійкості необхідно враховувати температурні режими випробувань та специфіку дослідницького обладнання:

– У разі відкритої зони випробувань необхідно використовувати засоби індивідуального захисту, а саме:

- Спец одяг з повстю, до 1000 °С;
- При температурі більше 1000 °С, використовувати додатково азбестові фартухи;
- Спец взуття з шкіри та високими халявами;
- Головний прозорий щиток та повстяний капелюх;
- В якості групових засобів захисту можливе використання повітряних завіс.

– Згідно правил НПАОП 0.00-1.07-94 «Правила будови і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском» [43] посудини повинні бути:

- Встановлені посудини повинні виключати можливість перекидання;
- Місце збереження посудин повинне забезпечувати можливість огляду, ремонту та очищення з різних сторін;
- Експлуатація посудин повинна проводитись згідно їх паспорту.

– Для захисту органів дихання необхідно видаляти аерозолі тугоплавких металів та остаточного аргону за допомогою:

- Використання місцевої витяжної вентиляції в режимі витоку, зі швидкістю руху повітря у робочому прорізі витяжної шафи не менш ніж 1,5 м/с;
- Використання індивідуальних засобів захисту Респіратори типу ffp2.

– Рівень виробничого шуму повинен не перевищувати норми встановленими санітарними нормами ГОСТ 12.1.003-83. «Шум. Общие требования безопасности» [44] Працівники, на робочому місці яких рівень

шуму перевищує 80 дБА, повинні забезпечуватись засобами індивідуального захисту.

є) Персонал, який працює з використанням комп'ютерної техніки зобов'язаний дотримуватись інструкції з охорони праці, які розроблені на підставі ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державних санітарних правил і норм роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [45] та НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроям» [46] а саме:

- Перерви в роботі не рідше 10 хвилин на 1 годину;
- Використання сучасних моделей відео дисплеїв;
- Інтенсивність ультрафіолетового випромінювання на відстані 0,3 м від екрану не повинна перевищувати, в діапазоні довжин хвиль:
 - від 400 нм до 320 нм – $2 \text{ Вт} / \text{м}^2$;
 - від 320 нм до 280 нм – $0,002 \text{ Вт} / \text{м}^2$;
 - від 280 нм до 200 нм – ультрафіолетового випромінювання не повинно бути;
- Обов'язкове вологе прибирання.

9.3 Заходи забезпечення виробничої санітарії

ж) Для забезпечення вимог ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення» [48] в дослідницьких лабораторіях обов'язковим є використання цих видів освітлення.

Природне освітлення має здійснюватися через світлові прорізи, орієнтовані переважно на північ або північний схід і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5 %. Для захисту від прямих сонячних променів, які створюють прямі та відбиті відблиски на поверхнях дисплеїв і клавіатури, повинні бути передбачені сонцезахисні

пристрої на вікнах (жалюзі або штори). Задовільний природне освітлення легше забезпечити в невеликих приміщеннях від 5 робочих місць до 8 робочих місць.

Штучне освітлення в приміщеннях з ПК повинно здійснюватися системою загального рівномірного освітлення. У виробничих та адміністративно-громадських приміщеннях, у разі переважної роботи з документами, допускається застосування системи комбінованого освітлення. Тобто крім системи загального освітлення додатково встановлюються світильники місцевого освітлення.

Значення освітленості на поверхнях робочих столів, в зоні розміщення документів, має становити від 300 лк до 500 лк. Якщо значення освітленості неможливо забезпечити системою загального освітлення, допускається використання місцевого освітлення. При цьому світильники місцевого освітлення слід встановлювати таким чином, щоб не створювати відблисків на поверхні екрану, а освітленість екрана має не перевищувати 300 лк.

У якості джерел штучного освітлення переважно повинні застосовуватися люмінесцентні лампи типу ЛБ. Допускається використання ламп розжарювання у світильниках місцевого освітлення.

Система загального освітлення має становити суцільні або переривчасті лінії світильників, розташованих збоку від робочих місць (переважно ліворуч), паралельно лінії зору працюючих.

Для загального освітлення допускається використання світильників наступних класів світлорозподілу:

- «П» – прямого світла;
- «ПРО» – переважно відбитого світла.

Показник засліпленості для джерел загального штучного освітлення в приміщеннях, обладнаних ПК з ВДТ, не повинен перевищувати 20, а показник дискомфорту – не більш 40.

У приміщеннях з ПК необхідно передбачити обмеження прямих і відбитих відблисків на робочих поверхнях від джерел природного та штучного освітлення (екран, стіл, клавіатура).

Яскравість світлових поверхонь (вікна, джерела штучного освітлення тощо), розташованих в поле зору, не повинна перевищувати 200 кд/м^2 .

Яскравість відблисків на екрані дисплея не повинна перевищувати 40 кд / м^2 , а яскравість стелі, при використанні системи відбитого освітлення, не повинна перевищувати 200 кд / м^2 .

Захист від відблисків досягається правильним розміщенням предметів і використанням матових поверхонь предметів в приміщенні. Обмеження нерівномірності розподілу яскравості в полі зору користувачів ПК досягається дотриманням наступних співвідношень:

- співвідношення яскравості робочих поверхонь не повинно перевищувати 3:1;
- співвідношення яскравості робочих поверхонь і поверхонь стін, обладнання тощо – 5:1.

Коефіцієнт запасу (K_3) для освітлювальних установок загального освітлення приймається рівним 1,4.

Величина коефіцієнта пульсації освітленості не повинна перевищувати 5 %. Це забезпечується застосуванням газорозрядних ламп у світильниках загального та місцевого освітлення з високочастотними пускорегулюючими апаратами (ВЧ ПРА) для світильників будь-яких типів [48].

Для розрахунку штучного освітлення дослідницької лабораторії з розмірами $12 \text{ м} \times 8 \text{ м} \times 4 \text{ м}$ ($\text{Д} \times \text{Ш} \times \text{В}$) використовується метод світлового потоку[49]:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E_{\text{н}} \cdot S \cdot k_3 \cdot z}{N \cdot n \cdot \eta} \quad (9.1)$$

де $\Phi_{\text{л}}$ – розрахункове значення світлового потоку однієї лампи в кожному світильнику, лм;

$E_{\text{н}}$ – нормоване значення освітленості = 500 лк;

S – площа освітлюваної поверхні = 96 м²;

k_3 – коефіцієнт запасу = 1,4;

z – коефіцієнт мінімальної освітленості = 1,1;

N – загальна кількість світильників;

n – кількість ламп у одному світильнику;

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

Чисельне значення індексу приміщення визначають за рівнянням:

$$i = \frac{AB}{h(A+B)} = \frac{12 \cdot 8}{2,85 \cdot (12+8)} = 1,7 \quad (9.2)$$

де A – довжина приміщення = 12 м;

B – ширина приміщення = 8 м;

h – висота розміщення світильників над робочою поверхнею, м.

Загальна висота приміщення включає наступні складові:

$$H = h + h_p + h_3 \quad (9.3)$$

де H – висота виробничого приміщення м;

h_p – висота робочої поверхні над підлогою = 0,7 м;

h_3 – висота звисання світильника від стелі, м.

Визначення h і h_3 проводити за наступною послідовністю:

– Розраховується кількість рядів світильників у приміщенні:

$$N_p = \frac{B}{(H-h_p) \cdot [L/h]} = \frac{8}{(4-0,7) \cdot 1,4} = 1,75 = 2 \quad (9.4)$$

де $[L/h]$ – числове значення коефіцієнта світильника = 1,4.

– Визначається максимально припустима відстань між рядами світильників:

$$L_{max} = \frac{B}{N_p} = \frac{8}{2} = 4 \text{ м} \quad (9.5)$$

– Розраховується висота підвісу світильника над робочою поверхнею:

$$h = \frac{L_{max}}{[L/h]} = \frac{4}{1,4} = 2,85 \text{ м} \quad (9.6)$$

– Знаходиться висота звисання світильника від стелі:

$$h_3 = H - h_p - h = 4 - 0,7 - 2,85 = 0,45 \text{ м} \quad (9.7)$$

Визначення світлового потоку лампи та загальної кількості світильників проводиться за наступним розрахунком:

– Визначається сумарний світловий потік освітлювальної установки в даному виробничому приміщенні:

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{E_n \cdot S \cdot k_3 \cdot z}{\eta} = \frac{500 \cdot 96 \cdot 1,4 \cdot 1,1}{52} = 1421,5 \text{ лм} \quad (9.8)$$

– Розраховується загальна кількість світильників N^* у приміщенні, виходячи з розташування їх у кутах квадрата:

$$N^* = \frac{AB}{L_{max}^2} = \frac{12 \cdot 8}{4^2} = 6 \text{ шт} \quad (9.9)$$

– Визначається розрахунковий світловий потік лампи:

$$\Phi_{л}^* = \frac{\Phi_{\Sigma}}{N_n} = \frac{1421,5}{6} = 237 \text{ лм} \quad (9.10)$$

де $N_{\text{л}}$ – кількість ламп = 6 шт.

Згідно отриманих параметрів обираємо компактну люмінесцентну лампу типу КЛС з світловим потоком $\Phi_{\text{л}} = 400$ лм.

– Знаходимо коефіцієнт пропорційності m :

$$m = \frac{\Phi_{\text{л}}^*}{\Phi_{\text{л}}} = \frac{237}{400} = 0,6 \quad (9.11)$$

Визначаємо оптимальну кількість ламп у приміщенні:

$$N = N^* \cdot m = 6 \cdot 0,6 = 3,5 = 4 \text{ шт} \quad (9.11)$$

Отже для освітлення дослідницької лабораторії з геометричними розмірами 12 м × 8 м × 4 м (Д × Ш × В) потрібно 4 лампи типу КЛС з світловим потоком 400 лм [49].

з) Для забезпечення повітрообміну в об'єкті, який відповідає вимогам ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [50], для чого обов'язково влаштовувати природню вентиляцію, загальну штучну вентиляцію або локальну місцеву витягову систему відбору шкідливих речовин. В приміщеннях дослідницьких лабораторій, в тих зонах, де розташовані постійні робочі місця дослідників доцільно виконувати кондиціювання.

Згідно вище зазначених санітарних норм, в холодний період року температура в приміщенні повинна бути в межах від 20 °С до 21 °С, відносна вологість від 40 В % до 60 В %, а $V_{\text{п}}$ до 0,1 м / с.

В теплий період року температура в межах від 22 °С до 24 °С, відносна вологість від 40 В % до 70 В %, а $V_{\text{п}}$ до 0,2 м / с.

Для забезпечення оптимальних фізичних параметрів повітряного середовища на ділянці плазмового напилення необхідно визначити продуктивність природної вентиляції $L_{\text{п}}$:

$$L_{\text{п}} = k \cdot V_{\text{п}} = 2 \cdot 288 = 576 \text{ м}^3 / \text{год} \quad (9.1)$$

де k – кратність повітрообміну на дільниці, $k = 2$;

$V_{\text{п}}$ – об'єм приміщення дільниці плазмового напилення, 288 м^3 .

При плазмовому напиленні покриттів у робочу зону оператора установки здійснюється виділення шкідливих речовин, концентрація яких значно перевищує допустимі норми згідно ГОСТ 12.1.005-88 «Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони» [51] (діоксин кремнію SiO_2 у вигляді аерозолу концентрації – $2 \text{ мг} / \text{м}^3$, оксид хрому Cr_2O_3 – $1 \text{ мг} / \text{м}^3$), тому необхідно розрахувати продуктивність місцевої витяжної вентиляції $L_{\text{м}}$ (витяжного зонту):

$$L_{\text{м}} = a \cdot b \cdot V \cdot 3600 = 0,5 \cdot 0,75 \cdot 1,5 \cdot 3600 = 2025 \text{ м}^3 / \text{год} \quad (9.2)$$

де a та b розміри зона в плані м, $a \cdot b = 0,375 \text{ м}^2$;

V – швидкість руху повітря, яке відсмоктується, в площині перерізу по кромці зонту, $V = 1,5 \text{ м} / \text{с}$.

9.4 Заходи безпеки під час надзвичайних ситуацій

и) Найбільш вірогідною надзвичайною ситуацією може бути пожежа. Причинами пожежі при напиленні можуть бути іскри та краплі розплавленого металу, необережне ставлення до газових балонів. Основні вимоги пожежної безпеки вказані НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» [52]. Для попередження пожег персонал дослідницької лабораторії повинен виконувати наступні правила:

- Проходити регулярно інструктажі пожежно-технічного мінімуму та правилам безпечної роботи;

- Суворо дотримуватись правил пожежної безпеки, чистоти та порядку на робочому місці;
- Слідкувати за встановлення захисних огорожень;
- Правильно експлуатувати газові балони та інше обладнання;
- Слідкувати за справністю системи електроживлення;
- Не загороджувати проїзди та проходи, а також підступи до засобів пожежогасіння;
- Забороняється користуватися відкритим вогнем;
- Паління дозволяється лише у спеціально відведених місцях.

Місця, де виконуються напилення повинні бути оснащені вуглекислотними вогнегасниками типу ВВК-5, пожежними щитами до складу яких входять: три багра, три лопати, три сокири, три відра, азбестове полотно та ящик з піском об'ємом 0,1 м³.

Дерев'яні конструкції, розташовані ближче 5 м від установки плазмового напилення обштукатурюють, або обшивають листовою сталлю по повсті, змоченій в глиняному розчині. В зоні попадання бризок металу та іскор не повинно бути займистих предметів. Легкозаймісті та вибухонебезпечні матеріали повинні бути на відстані не менш як 30 м від відстані напилення. Дерев'яні підлоги, настили помости при потребі захищають від іскор і крапель металу листами сталі.

Перед початком роботи оператору плазмової установки потрібно перевірити справність напилювальної апаратури, підготовленість робочого місця в протипожежному відношенні: наявність засобів пожежогасіння, внутрішніх пожежних кранів, піску, вогнегасників. Якщо робоче місце не підготовлене, до роботи приступати не можна.

Особи, які не здали випробування з напилювальних робіт, а також що не пройшли попередню перевірку знань з пожежної безпеки, до виконання робіт не допускаються.

ВИСНОВКИ

В ході роботи були поставлені наступні задачі для аналізу роботи захисного покриття для графітованого електроду:

1. Аналіз роботи графітованих електродів в руднотермічних печах.

Літературний огляд виявив, що електроди схильні до високотемпературної корозії внаслідок джоулевого тепла, що проходить крізь нього при роботі, та нагріву від екранування теплоти від «дзеркала» розплаву та футерування. Температура початку окислення графітованого електроду складає 400 °С, при цій температурі починається сублімація кам'яного пеку – зв'язуючого електроду. Внаслідок цього електрод починає зазнавати руйнування монолітної структури, що призводить до збільшення окислення через проникання кисню в більш глибокі шари графіту. Це явище призводить до зменшення поперечного перерізу, як результат – зменшення струмового навантаження. При спробі тримати струмове навантаження на заданих параметрах, електрод починає більше нагріватись внаслідок збільшення опору, це призведе до збільшення окислення та втрати маси.

2. Вибір та дослідження захисного покриття для графітованого електроду.

Для стримування високотемпературної корозії був обраний спосіб нанесення захисного покриття на електрод. Даний спосіб формує захисний прошарок, який відділяє графіт від кисню, таким чином запобігаючи контакту з ним. В якості захисного покриття була обрана технологія плазмового напилення струмоведучим дротом марки АК-5. Цей спосіб дозволяє швидко та економічно сформувати захисний прошарок, який не потребує додаткової обробки. Легуюча добавка кремнію в дроті збільшує розтікання розплаву, що в свою чергу збільшує зчеплення з підкладкою. Алюміній в ході експлуатації переходить в оксид алюмінію, який має температурну стійкість наближену до

стійкості графіту – $T_{\text{дис}} = 3500$ °С. Таким чином формується захисне покриття, яке надійно зберігає поверхню електроду від окислення.

3. Дослідження роботи захисного покриття.

Першочергово був проведений розрахунок для визначення температурного розподілу джоулевого тепла по всьому вильоті електроду. Було визначено, що при силі струму в 2 кА електрод, з розмірам 300 мм x 1200 мм, та $T_{\text{max}} = 5000$ °С температура електроду досягає значення в 576 °С. Таким чином захисне покриття потребується на всьому проміжку.

Для порівняльного аналізу роботи покриття з чистим графітом в натуральних умовах був проведений експеримент, який виявив, що сторона електроду з нанесеним покриттям окислилася від 4 мм до 6 мм, а окислення графіту склало 18 мм. Варто зазначити, що зі сторони покриття окислення склало лиш на ділянці тепловкладення дуги ($T_{\text{дуги}} = 4000$ °С), що унеможливило знайти матеріал, який здатний витримувати таку температуру в окислювальному середовищі.

Для підвищення характеристик алюміній-кремнієвого покриття був нанесений другий прошарок у вигляді міді. Після високотемпературного відпалу ($T_{\text{печі}} = 1200$ °С, $\tau = 1$ год) та охолодженні на повітрі, зразки з алюміній-кремнієвим покриттям, мідь-алюміній-кремнієвим покриттям та графіт без покриття та контрольний зразок (невипалений графіт) показали наступні результати: шорсткість мідь-алюміній-кремнієвого покриття склала 9 Rz; алюміній-кремнієвого 9,84 Rz; чистого графіту 13,6 Rz; контрольного зразку 8 Rz. Краща стійкість до корозії мідь-алюміній-кремнієвого покриття обумовлюється комбінованим захистом. Так мідь запобігає окислюванню алюмінію, який в свою чергу не дає дифузійно окислюватись графіту.

4. Дослідження просочення Al_2O_3 до порового простору графіту

Проведений експеримент з використанням графітової пластини в вигляді електроду виявив, що в температурній зоні від 2050 °С до 3500 °С спостерігається просочення Al_2O_3 в поровий простір графіту. Дослідження даного явища привели до наступних показників: крайовий кут змочування

краплею оксиду алюмінію графітової пластини $\theta = 134^\circ$. Даний кут свідчить про погану змочуваність підкладки. Також варто зазначити, що ріст температури в графітованому електроді призводить до збільшенню розмірів пор. На основі сукупних факторів був зроблений теоретичний розрахунок просочення.

5. Економічні показники

Технологія плазмового напилення струмоведучим дротом захисного покриття графітованого електроду марки ЕГ збільшує його експлуатаційний строк служби на 20 %. Так розрахунок повної собівартості нанесення захисного покриття дозволяє отримати економічний ефект на 782061 грн в рік в залежності з використання звичайних електродів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ГОСТ 28818-90. Материалы шлифовальные из электрокорунда. Технические условия. Чинний від 1992-01-01 – Москва : Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. 1992. – [8] с.
2. Полубелова А.С. Производство абразивных материалов / А. С. Полубелова и др. – Ленинград : Машиностроение, 1967. – 112 с.
3. Богданов, С.П. Расчет руднотермических печей [Текст] : методические указания / С.П. Богданов – Санкт-Петербургб.: СПбГТИ(ТУ), 2011. – 38 с.
4. Григорьев В. П. Конструкции и проектирование агрегатов сталеплавильного производства. : Учебник для вузов / В. П. Григорьев и др. – Москва: МИСИС, 1995. – 512с.
5. Станкус С. В. Тепловое расширение искусственных графитов в интервале температур 293–1650 °К / С.В. Станкус, О.С. Яцук, Е.И. Жмуриков, Л. Текчио // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19. – № 5. – С. 637-642.
6. Бажин В. Ю. Управление тепловыми и электрохимическими процессами в дуговых печах / В. Ю. Бажин, С. А. Мартынов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 5. – С. 34-37.
7. ДСТУ 4494:2005. Електроди зграфітовані та ніпелі до них. Загальні технічні умови (ІЕС 60239:2005, NEQ). Чинний вид від 2018-01-03 – Київ : Держстандарт України. 2018. – [20] с.
8. Храпко С. А. Производство стали в ДСП : конспект лекций /С. А. Храпко, Е.Л. Корзун, Ю.В. Костецкий. – Донецкий Национальный Технический Университет. – 136 с.
9. Костиков В. И. Гидродинамика пористых графитов / В. И. Костиков, Г. М. Белов Москва : Metallurgia, 1988. – 208 с.

10. Костиков В. И. Взаимодействие металлических расплавов с углеродными материалами / В. И. Костиков, А. Н. Варенков. Москва : Металлургия, 1981. – 184 с.
11. Зеленский В. Ф. Исследования коррозионной стойкости графитов в среде кислорода / В. Ф. Зеленский и др. // Вопросы атомной науки и техники. – 2011. – №2. – С. 116-122.
12. Одейчук А. Н. Моделирование окисления графита в среде кислорода при температурах 400-800 °С / А. Н. Одейчук, А. И. Комир // Физика твердого конденсированного тела. – 2015. – Т.12. – №2. – С. 532-542.
13. Авторское свидетельство 621474 СССР. Способ пропитки углеграфитовых материалов металлами и сплавами / О. Н. Рябкина, А. И. Райченко // Бюл. – 1978. – № 32. – С. 2
14. Андреев Е. П. Графит с пироуглеродной пропиткой в тепловой зоне для выращивания профилированного сапфира / Е. П. Андреев и др. // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – №1. – С. 185-188.
15. Патент № 2245396 С2 Российская Федерация, МПК С 25 С 3/08, FR 99/01322. Пропитанный графитовый катод для электролиза алюминия : № 2001124345/02 : заявл. 01.02.2000 : опубл. 27.01.2005 / Полюс Р., Дрейфус Ж.
16. Вишняков Л. Р. Получение, механические и триботехнические свойства силицированного композиционного материала на основе терморасширенного графита / Л. Р. Вишняков и др. // Новітні матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2006. – №2. – С. 41-44.
17. Лащенко Г. И. Плазменное упрочнение и напыление / Г. И. Лащенко. Київ : Екологія, 2003. – 64 с.
18. Патент № 2193294 С1 Российская Федерация, МПК H05B 7/085, C23C 4/06. Графитированный электрод с защитным покрытием : № 2001129111/06 : заявл. 30.10.2001 : опубл. 20.11.2002 / Русев Г. М., Киселев С. М., Овсяников В. В., Галюк Н. Ф.
19. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. Москва : МАШГИЗ, 1951. – 296 с.

20. Никифоров Г. Д. *Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов* / Г. Д. Никифоров. Москва : Машиностроение, 1972. – 264 с.
21. Schmitz Ch. *Handbook of Aluminium Recycling* / Ch. Schmitz. Vulkan-Verlag GmbH, 2006. – 454 с.
22. Корольков А. М. *Литейные свойства металлов и сплавов* / А. М. Корольков. Москва : АН СССР, 1960. – 196 с.
23. Пастухов Э. А. *Смачивание графита расплавами алюминия, алюминий-титан и алюминий-кремний* / Э. А. Пастухов и другие // *Расплавы*. – 2006. – № 5. – С. 8-13.
24. ДСТУ EN ISO 18273:2018 *Матеріали зварювальні. Електроди, дрiт та прутки для зварювання алюмінію та його сплавів. Класифікація (EN ISO 18273:2015, IDT; ISO 18273:2015, IDT)*. Чинний від 2018–11–15 – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). 2018. [25] с.
25. ДСТУ ГОСТ 10157:2019 *Аргон газоподібний та рідкий. Технічні умови (ГОСТ 10157-2016, IDT)*. Чинний від 2019–06–01 – Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). 2019. [13] с.
26. ДСТУ 4169:2003 *Стиснене повітря. Частина 1. Забруднювачі та класи чистоти (ISO 8573-1:2001, MOD)*. Чинний від 2004–07–01 – Київ : Технічний комітет стандартизації «Об’ємні гідроприводи, пневмоприводи і змащувальні системи» (ТК 45). 2004. [28] с.
27. ДСТУ EN ISO 6848:2015 *Дуговая сварка и резка. Электроды вольфрамовые неплавкие. Классификация (EN ISO 6848:2015, IDT; ISO 6848:2015, IDT)*. Чинний від 2016–01–01 – Київ : ГП «Украинский научно-исследовательский и учебный центр проблем стандартизации, сертификации и качества» (ГП «УкрНИУЦ»). 2016. [19] с.
28. Русев Г. М. *Влияние параметров режима плазменного напыления токоведущей проволокой на фракционный состав распыляемых частиц* / Г. М. Русев и др. // *Автоматическая сварка*. – 2013. – № 1. – С. 45-47.

29. ГОСТ 28302-89 Покрyтия газотермические защитные из цинка и алюминия металлических конструкций. Общие требования к типовому технологическому процессу. Чинний вiд 1989–24–10 – Москва : Государственный строительный комитет СССР. 1989. [22] с.

30. ГОСТ 9.304-87 Покрyтия газотермические. Общие требования и методы контроля. Чинний вiд 1987–18–12 – Москва : Министерство химического и нефтяного машиностроения СССР. 1987. [11] с.

31. Казанцев Е. И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-е издание доп. и перераб. / Е. И. Казанцев – Москва : Металлургия, 1975. – 368 с.

32. Оптимизация состава защитного покрытия от высокотемпературного окисления графитированных электродов: зб. доп. 9 междунаро. конф. ТИСНУМ, 5-8 ноября 2014 г. ФБГНУ "Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов". – Москва : ТИСНУ, 2014. – 520 с. 143 - 145

33. Попель С.И. Поверхностные явления в расплавах / С.И. Попель – Москва : Металлургия, 1994. – 440 с.

34. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание / А.Д. Зимон.: Москва: Химия, 1974. – 416 с.

35. Корепанов М.А. Поверхностное натяжение жидкого оксида алюминия / М. А. Корепанов // Физическая химия и мезоскопия. – 2013. – Т.15. – С. 83-90.

36. Черемской П.Г. Поры в твердом теле / П.Г. Черемской, В. В. Слезов, В.И. Бетехтин – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 376 с.

37. НПАОП 0.00 – 7.11 – 12. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників. Чинний вiд 2012-16-03 – Київ : Міністерство надзвичайних ситуацій України. 2012. [15] с.

38. ПУЕ. Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання). Чинний вiд

2017–21–08 – Київ : Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. 2017. [617] с.

39. ДСТУ 7237:2011. Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту. Чинний від 2011–01–08 – Київ : Держспоживстандарт України. 2011. [10] с.

40. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила техніки безпеки при використанні електрообладнання електроспоживачів. Чинний від 1998–09–01 – Київ : Держнагляд охорони праці. 1998. [36] с.

41. ПП 1.3.10-450-2006. Примірні інструкції з охорони праці при виконанні робіт з кислотами і лугами. Чинний від 2006–19–12 – Київ : ДержНДІТБХВ. 2006. [5] с.

42. ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. Державні гігієнічні нормативи. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Чинний від 2000–07–12 – Київ : Міністерство охорони здоров'я. 2000. [29] с.

43. ДСТУ EN 379:2017 Засоби індивідуального захисту очей. Автоматичні зварювальні фільтри (EN 379:2003 + A1:2009, IDT). Чинний від 2017–27–12 – Київ : ДП «УкрНДНЦ». 2017. [19] с.

44. НПАОП 0.00-1.07-94. Правила будови і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском. Чинний від 1994-18-10 – Київ : Комітетом по нагляду з охорони праці України. 1994. [20] с.

45. ГОСТ 12.1.003-83. Шум. Общие требования безопасности. Чинний від 1984-01-07 – Москва : АН СРСР. 1984. [11] с.

46. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державних санітарних правил і норм роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. Чинний від 1998–10–12 – Київ : Міністерство охорони здоров'я. 1998. [9] с.

47. НПАОП 0.00-7.15-18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. Чинний від 2018–18–05 – Київ : Міністерство соціальної політики України. 2018. [8] с.

48. ДБН В.2.5-28-2006. Природне та штучне освітлення. Чинний від 2006–10–01 – Київ : Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України. 2006. [96] с.

49. Шмирко В.І., Коробко О.В., Троян Ю.І. Методичні вказівки до лабораторного заняття «Розрахунок загального рівномірного штучного освітлення виробничих приміщень» з дисципліни «Цивільний захист і охорона праці в галузі»: для студентів усіх спеціальностей та форм навчання /Укл. : В.І. Шмирко, О.В. Коробко, Ю.І. Троян. – Запоріжжя: каф. ОПіНС. НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 36 с.

50. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Чинний від 1999–01–12 – Київ : Міністерство охорони здоров'я. 1999. [10] с.

51. ГОСТ 12.1.005-88 Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони. Чинний від 1989–01–01 – Москва : Міністерство охорони здоров'я СРСР. 1989. [95] с.

52. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. Чинний від 2014–30–12 – Київ : Міністерство внутрішніх справ. 2014. [86] с.

ДОДАТОК А

ГОСТ 3.1118-82

Дубл.			
Взам.			
Подл.			

Розроб.	Кідун		
Перевір.	Биковський		
Н. контр.	Шумікін С. О.		
		Листів 2	Лист 1

ГКІЮ 04512021.000

ДП

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

УЗГОДЖЕНО

ЗАТВЕРДЖУЮ

МАРШРУТНА КАРТА

технологічного процесу

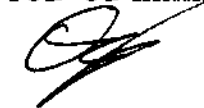
Плазмового наплення графітованих електродів

Нормоконтролер: к.т.н., доц. Шумікін С. О.

Зав. кафедри ОТЗВ Овчинников О. В.

Дата

Дата



ПРОДОВЖЕННЯ ДОДАТКУ А

ГОСТ 3.1118-82 Форма 16.

Дубл.														
Взам.														
Подл.														
											Листів 2	Лист 2		
Розроб.			Кідун											
Перевір.			Биковський										ГКНО 04512021.000	
Н. контр.			Шумікін С. О.											
А	Цех	Діл.	РМ	Опер.	Код, найменування операції					Позначення документа				
Б	Код, найменування обладнання				СМ	Проф.	Р	УП	КОВД	ОН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт
К/М	Найменування деталі, скл. одиниці або матеріалу				Позначення, код					ППП	ОВ	ОН	КД	Н. расх
А	03	05	005	Транспортування електроду										
Б	Консольний кран				Оператор уст. плазм. напил. 4 р.								0,075	0,13
К/М	Електрод ЕГ													
А	03	05	010	Плазмове напилення										
Б	Установка УПНО «Орнітоф» - 5М; джере- ло живлення ВДУ 506 УЗМ				Оператор уст. плазм. напил. 4р.								0,1	0,86
К/М	Електрод ЕГ / Дріт АК-5, балон 40 л з Ag				Режим:									0,36 кг
														$I_{зв} = 170-180 \text{ A}; U_{зв} = 65-75 \text{ В}; Q_{Ag} = 30 \text{ л / хв.};$
														$Q_{тран} = 16,5 \text{ м}^3 / \text{год}; d_{др} = 1,6 \text{ мм}; L_{нап} = 100 \text{ мм};$
														$V_{под} = 555 \text{ м} / \text{год}; \alpha = 70 - 90^\circ; n_{шарів} = 2$
А	03	05	015	Зачистка 1-шого шару										
Б	Високообертова щітка				Оператор уст. плазм. напил. 4 р.									0,025
К/М	Електрод ЕГ													
А	03	05	020	Контроль якості (візуальний огляд)										
К/М	Електрод ЕГ				Оператор уст. плазм. напил. 4 р.									0,066

