

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Кораблебудівний навчально-науковий інститут (факультет)

Кафедра матеріалознавства і технології металів

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

Дубовий О.М.

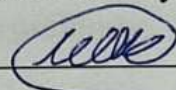
« 14 » 12 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

**на тему : «Удосконалення технології формування композиційних
електродугових покриттів з додаванням червоного шламу»**

Виконав: студент 5131М групи

 Макаров Д.О.

Керівник роботи:

к.т.н., доцент

 Бобров М.М.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут (факультет): Кораблебудівний

Кафедра: Матеріалознавства і технології металів

Спеціальність: 132 – Матеріалознавство

Освітня програма: «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

_____ к.т.н., доц. Карпеченко А.А.

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»
Студенту Макарову Данілу Олексійовичу

1. Тема роботи: «Удосконалення технології формування композиційних електродугових покриттів з додаванням червоного шламу».

Керівник роботи: к.т.н., доцент без вч. звання Бобров М.М.

Затверджені наказом ректора № _____ від “___” _____ 2024 року № _____

2. Термін подання роботи: “___” _____ 2024 року.

3. Вихідні дані по роботі: Дослідити технологію нанесення електродугових композиційних покриттів; дослідити гранулометричний склад та морфологію порошку червоного шламу миколаївського підприємства з виробництва бокситу; отримати композиційне покриття з додаванням порошку червоного шламу; ідентифікувати фази в отриманому покритті; проаналізувати мікроструктуру та визначити міцність зчеплення сформованих композиційних покриттів; розробити заходи щодо охорони праці та охорони навколишнього середовища при нанесенні електродугових покриттів; розрахувати техніко-економічні показники отримання покриття.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів): 1. Аналіз стану та перспективи розвитку та застосування електродугових покриттів. 2. Аналіз обладнання та напилуваних матеріалів для отримання композиційних електродугових покриттів з додаванням червоного шламу. 3. Ідентифікація фаз та визначення вмісту червоного шламу у отриманих електродугових покриттях. 4. Розробка технологічних рекомендацій щодо електродугового напилення вищевказаних композиційних покриттів покриттів. 5. Розрахунок собівартості та економічної ефективності даної розробки. 6. Питання охорони праці, довкілля та техніки безпеки.

5. Перелік презентаційних матеріалів: 1. Модернізована розпилююча голівка (креслення).

Плакати: 1. Мета та постановка задачі дипломної роботи; 2. Актуальність теми дослідження. 3. Напилювані матеріали для отримання композиційних електродугових

покриттів з додаванням червоного шламу; 4. Результати дослідження мікроструктури отриманих покриттів; 5. Результати визначення вмісту червоного шламу у отриманих покриттях; 6. Результати визначення міцності зчеплення отриманих покриттів; 7. Технологічні рекомендації процесу електродугового напилення покриттів з червоним шламом; 8. Техніко-економічні показники та собівартість нанесення покриттів композиції електродувим методом; 9. Загальні висновки по роботі.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Бобров М.М., к.т.н., доцент		
2	Бобров М.М., к.т.н., доцент		
3	Бобров М.М., к.т.н., доцент		
4	Бобров М.М., к.т.н., доцент		
5	Бобров М.М., к.т.н., доцент		
6	Бобров М.М., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання: “___”_____ 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз стану та перспективи розвитку та застосування електродугових покриттів	21.11.2024	
2	Аналіз обладнання та напилюваних матеріалів для отримання композиційних електродугових покриттів з додаванням червоного шламу	28.11.2024	
3	Ідентифікація фаз та визначення вмісту червоного шламу у отриманих електродугових покриттях	04.12.2024	
4	Розробка технологічних рекомендацій щодо електродугового напилення вищевказаних композиційних покриттів покриттів	11.12.2024	
5	Розрахунок собівартості та економічної ефективності даної розробки	18.12.2024	
6	Питання охорони праці, довкілля та техніки безпеки.	23.12.2024	

Студент

_____ Макаров Д.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Бобров М.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Анотація

Дипломна робота на тему «Удосконалення технології формування композиційних електродугових покриттів з додаванням червоного шламу» присвячена дослідженню можливостей повторного використання промислових відходів та їх інтеграції у виробничі процеси. Метою дослідження є формування високоякісних покриттів, які поєднують у собі екологічність і високу зносостійкість. В роботі проаналізовано актуальність проблеми утилізації червоного шламу, проведено аналіз властивостей цього матеріалу, а також оцінено перспективи його застосування у формуванні електродугових композиційних покриттів. Розроблено технологічні рекомендації для вдосконалення процесу електродугового напилення із використанням модернізованого обладнання, що сприяє ефективнішому використанню енергетичних та матеріальних ресурсів. Отримані результати включають створення покриттів із низькою пористістю (до 6%) та вмістом червоного шламу 12,2%, а також визначення їх фізико-механічних властивостей. Зокрема, мікротвердість металевої матриці становить 526 МПа, а частинок червоного шламу – 658 МПа. Показник міцності зчеплення покриттів досягає 10 МПа. Впровадження розроблених рекомендацій дозволяє підвищити економічну ефективність процесу, зменшити собівартість продукції та скоротити обсяги промислових відходів.

Ключові слова: червоний шлам, електродугове напилення, твердість, зносостійкість.

Abstract

The thesis titled "Improvement of the Technology for Forming Composite Arc-Sprayed Coatings with the Addition of Red Mud" focuses on investigating the potential reuse of industrial waste and integrating it into production processes. The study aims to develop high-quality coatings that combine environmental sustainability and excellent wear resistance. The research analyzes the relevance of red mud utilization, examines the material's properties, and evaluates its prospects for use in forming composite arc-sprayed coatings. Technological recommendations were developed to enhance the arc-spraying process using modernized equipment, ensuring more efficient energy and material resource utilization. The results include the creation of coatings with low porosity (up to 6%) and a red mud content of 12.2%, along with the determination of their physical and mechanical properties. Specifically, the microhardness of the metal matrix is 526 MPa, while the red mud particles reach 658 MPa. The adhesion strength of the coatings is up to 10 MPa. Implementing the proposed recommendations improves the economic efficiency of the process, reduces production costs, and minimizes industrial waste volumes.

Key words: red mud, electric arc spraying, hardness, wear resistance.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПЕРЕРОБКИ ТА УТИЛІЗАЦІЇ ЧЕРВНОГО ШЛАМУ (ЧШ).....	8
1.1. Актуальність переробки ЧШ.....	8
1.2 Низькотемпературне відновлення заліза із ЧШ.....	12
1.3 Відновлювальна плавка ЧШ	14
1.4 Утилізація ЧШ при виробництві будівельних матеріалів	18
1.4.1. Виробництво цементу.....	18
1.4.2. Виробництво цегли	21
1.5. Використання ЧШ при формуванні плазмових покриттів	23
1.6. Висновки і постановка задач кваліфікаційної роботи магістра	26
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ТА НАПИЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ З ДОДАВАННЯМ ЧШ.....	28
2.1 Аналіз технології нанесення композиційних покриттів електродуговим методом	28
2.1.1 Застосування різнорідних дротів.....	28
2.1.2 Використання порошкових дротів	29
2.2 Аналіз модернізованої конструкції електродугового розпилювача ЕМ-14М....	31
2.3 Дослідження порошку червоного шламу МГЗ	34
2.4 Формування композиційних електродугових покриттів з додаванням червоного шламу та дослідження їх мікроструктури.....	35

РОЗДІЛ 3. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ФАЗ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ЧЕРВОНОГО ШЛАМУ У ОТРИМАНИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТЯХ. ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ЗЧЕПЛЕННЯ	38
3.1 Ідентифікація фаз у композиційному покритті.....	38
3.2 Визначення вмісту червоного шламу у сформованих покриттях	38
3.3 Дослідження міцності зчеплення нанесених покриттів	40
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПИЛЕННЯ ВИЩЕВКАЗАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ.....	43
4.1 Вибір і підготовка матеріалів, які застосовуються при нанесенні газотермічних покриттів.....	44
4.2 Підготовка поверхні під нанесення газотермічного покриття	45
4.3 Напилення газотермічного покриття	47
4.4 Визначення фізико-механічних властивостей напилених покриттів	48
4.5 Висновки до розділу 4	49
РОЗДІЛ 5. ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА НА ДІЛЬНИЦІ НАНЕСЕННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ	50
5.1 Основні вимоги до дільниці	50
5.1.1 Технічні вимоги до дільниці	50
5.1.2 Вимоги до освітлення	51
5.1.3 Вимоги до робочих місць	51
5.1.4 Вимоги до вентиляції приміщення.....	51
5.1.5 Вимоги до захисту від шуму та вібрації	52
5.1.6 Вимоги до засобів індивідуального захисту	53
5.2 Вибір потрібної кількості обладнання та робочих місць.....	54
5.2.1 Визначення і розрахунок партії запуску деталей	54

5.2.2 Розрахунок штучно-калькуляційного часу виготовлення покриття...	54
5.2.3 Визначення фонду часу роботи устаткування	54
5.2.4 Розрахунок необхідної кількості устаткування та його завантаженість	55
5.3 Компоновка і опис ділянки	56
5.4 Висновки до розділу 5	58
РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК СОБІВАРТОСТІ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДАНОЇ РОЗРОБКИ	60
6.1 Вхідні дані	60
6.2 Розрахунок зміни собівартості.....	61
6.3 Розрахунок одночасних витрат на впровадження композиційних, отриманих електродуговим методом	61
6.4 Розрахунок технологічної собівартості	62
6.5 Техніко-економічні показники нанесення композиційних покриттів електродуговим методом.....	65
РОЗДІЛ 7. ПИТАННЯ ОХОРОНИ ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ ТА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ	67
7.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів, що впливають на персонал під час напилення електродугових покриттів	68
7.2 Вимоги техніки безпеки при напилюванні покриттів електродуговим методом	71
7.3 Вимоги техніки безпеки при роботі з порошком ЧШ	73
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	78

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить: 84 аркуші, 7 частин, 19 рисунків, 11 таблиць, 2 креслення, 8 плакатів, 66 джерел.

Мета дипломної роботи – дослідження можливості формування композиційних електродугових покриттів з додаванням червоного шламу та удосконалення цієї технології

Методи дослідження – комп'ютерна металографія, механічні випробування.

За допомогою металографічного аналізу досліджено гранулометричний склад порошку червоного шламу МГЗ. Встановлено, що він характеризується великим розкидом розмірів частинок у діапазоні від 1 до 1000 мкм. Найбільша їх кількість менша за 5 мкм (35%) також спостерігається наявність великої кількості фракції з розміром від 10 до 50 мкм (26%) та від 50 до 100 мкм (12%). Отримано експериментальні зразки композиційних електродугових покриттів шляхом розпилення дроту з алюмінієвого сплаву системи Al-Si марки ER4043 та порошку червоного шламу МГЗ за рахунок використання модернізованого розпилювача ЕМ-14М. Аналіз мікроструктури покриттів показав, що вони характеризуються досить низькою пористістю, яка становить близько 6%, в структурі добре диференціюються частинки червоного шламу та сплаву Al-Si. Проведено ідентифікацію фаз шляхом визначення їх мікротвердості на поперечних шліфах при навантаженні на індентор 20г. Встановлено, що мікротвердість металевої матриці складає 526 МПа; червоного шламу – 658 МПа. За планіметричним методом встановлено кількість червоного шламу у покриттях, що склала 12,2% об. Штифтовим методом визначено міцність зчеплення традиційних з дроту ER4043 (12,1 МПа) та композиційних ER4043(Al-Si)– червоний шлам (10 МПа) покриттів.

ЕЛЕКТРОДУГОВЕ НАПИЛЕННЯ, ЧЕРВОНИЙ ШЛАМ,
КОМПОЗИЦІЙНЕ ПОКРИТТЯ, МІКРОТВЕРДІСТЬ, УТИЛІЗАЦІЯ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

МГЗ – Миколаївський глиноземний завод;

ЧШ- червоний шлам;

РЗМ – рідкоземельні метали;

IRa - внутрішній індекс радіоактивності;

Ir - зовнішній індекс радіоактивності;

Φ_n – номінальний фонд часу устаткування;

μ – коефіцієнт, який враховує простий устаткування в планово-передбаченому ремонті устаткування

Φ_e – ефективний річний фонд часу одиниці устаткування;

$K_{вн}$ – коефіцієнт виконання норм часу;

TN_i – річна трудомісткість виготовлення виробів на і-тому устаткуванні

$t_{шт.к}$ – штучно–калькуляційний час обробки однієї деталі на і-тому устаткуванні;

A – річний обсяг випуску деталей;

t – необхідна норма часу на операцію, хв;

N – кількість деталей, шт.

ВСТУП

З підвищенням світового споживання алюмінію збільшується кількість відходів, що утворюються у процесі виробництва глинозему за способом Байєра - червоних шламів.. Через високий вміст лугів та високодисперсність шламу його складування становить небезпеку для людини і навколишнього середовища. Особливо актуальною дана проблема є для Миколаївській області, оскільки на її території розташовано одне з найбільших в Європі підприємств кольорової металургії Миколаївський глиноземний завод (МГЗ). За останні 10 років на шламосховищах МГЗ кількість накопиченого червоного шламу збільшилася на 54% і за станом на 1 січня 2019 року складає 43,5 мільйони тон.

Щодо способів переробки та утилізації червоних шламів, то основними є пірометалургійні технології. Вони включають як способи низькотемпературного відновлення при температурах 1050...1200 ° С, так і відновну плавку. Також перспективними вважаються способи утилізації одержуваних шлаків, які можуть бути використані для вилучення глинозему, титану, отримання будівельних матеріалів, таких як цемент різних марок, мінеральна вата та флюсові матеріали для металургії. Водночас відомо про інноваційні рішення щодо застосування порошку червоного шламу у якості напилюваного матеріалу при плазмовому нанесенні покриттів. Такі покриття характеризуються досить низькою міцністю зчеплення (до 10 МПа) та наявністю тріщин на границі поділу з металевою основою. Однак плазмове напилення характеризується досить високою вартістю та складністю обладнання та низькими значеннями коефіцієнту використання енергії. В той же час електродугове напилення вирізняється простотою та технологічністю, високими енергетичним ККД розпилення і коефіцієнтом використання матеріалу, найвищою продуктивністю та низькою собівартістю.

Таким чином, актуальним є дослідження можливості формування композиційних електродугових покриттів із додаванням червоного шламу, аналіз мікроструктури та визначення їх фізико-механічних властивостей.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПЕРЕРОБКИ ТА УТИЛІЗАЦІЇ ЧЕРВНОГО ШЛАМУ (ЧШ)

1.1. Актуальність переробки ЧШ

Зі зростанням світового споживання алюмінію збільшується кількість відходів, що утворюються у процесі виробництва глинозему за способом Байєра – червоних шламів. Зростання виробництва алюмінію у період з 2004 по 2019 рік зображено на рис. 1.1.

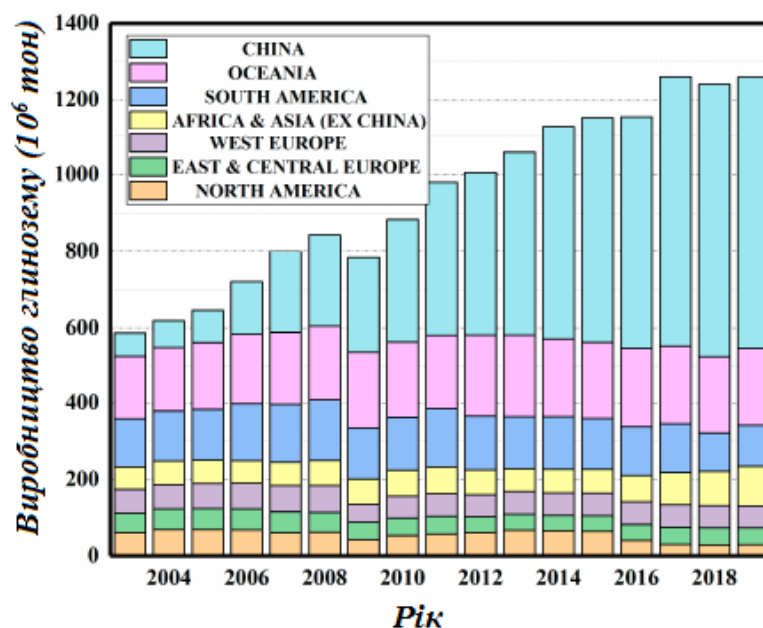


Рисунок 1.1 - Глобальні обсяги виробництва глинозему протягом останніх 20 років (дані Міжнародного Інституту Алюмінію)

Так, наприклад, виробництво глинозему в Китаї стрімко зростає за останні два десятиліття, і виробництво глинозему в 2019 році досягло приблизно 71,28 мільйона тонн, збільшившись приблизно в 10,7 рази порівняно з 2003 роком. Глобальна частка Китаю у виробництві глинозему також зросла з 10,4% у 2003 році. до 53,9% у 2019 році, що зробило Китай першим у світі найбільший виробник глинозему.

Залежно від складу вихідних бокситів та технології, на 1 т глинозему утворюється від 0,9 до 1,5 т цих відходів [1, 2]. Досі червоні шлами не переробляються, а складаються у спеціальні шламосховища. Кожне таке

сховище є резервуаром висотою 30 - 50 м, який займає 10 - 50 га земельної площі і вміщує десятки мільйонів тонн шламів.

Через високий вміст лугів та дрібнодисперсності складування шламів становить небезпеку для людини та навколишнього середовища [3, 4]. У 2010 р. в Угорщині стався прорив шламосховища, внаслідок чого близько 700 тис. м³ шламів було викинуто в навколишнє середовище, що призвело до загибелі 10 осіб, руйнування близько 350 будинків та забруднення значних територій [5, 6]. На рис. 1.2 зображено прорив дамби та наслідки аварії.



а



б

Рисунок 1.2 – Прорив дамби шламосховища в Угорщині (а) та наслідки аварії (б) [7]

Червоний шлам небезпечний з кількох причин. Найбільш критичною проблемою є те, що шлам має високий рН через розчин гідроксиду натрію, який використовується у процесі очищення. Під час вимірювань лужність червоного шламу була зареєстрована на рівні рН 13 або вище за шкалою від 0 до 14. Нейтральна точка дорівнює 7, а 14 означає найвищу лужність. Оскільки діапазон рН є логарифмічним, лужність червоного шламу в мільйон разів вища, ніж у води. Ця лужність призвела до опіків у жертв і вбила більшість рослин і тварин у зоні ураження. Червоний мул потрапив у річку Маркаль через струмок Торна і практично знищив флору і фауну річки.

Виділяють основні три проблеми, що пов'язані з червоним шламом. Одним з них є вміст важких металів. Хоча офіційні результати стверджують, що вміст важких металів у червоному шламі є безпечним, за словами фахівців з університету Паннон, концентрація миш'яку, хрому та кобальту перевищує

прийнятні межі. Друга проблема – потенційна радіоактивність червоного шламу. Хоча радіоактивність червоного шламу перевищує природну межу, вимірювання в постраждалих районах були задовільними та завжди були нижче межі для безпеки людей. Через тиждень після катастрофи з'явилася нова характеристика червоного шламу. Через сонячну погоду суміш висихала дуже швидко, пил потрапляв у повітря. Проблема полягає в тому, що значно більша частка червоного шламу придатна для вдихання, ніж інші розплави та речовини. Кількість червоного шламу становить близько 100 тис. тонн. Лужність пилу досягає рН 11-12, а частинки можуть мати ще вищу лужність. Це проблема, тому що маски, які носять волонтери та працівники, не можуть фільтрувати такий тонкий пил [7].

Особливо актуальною дана проблема є для Миколаївській області, оскільки на її території розташовано одне з найбільших в Європі підприємств кольорової металургії Миколаївський глиноземний завод (МГЗ). За останні 10 років на шламосховищах МГЗ кількість накопиченого червоного шламу збільшилася на 54% і за станом на 1 січня 2019 року складає 43,5 мільйони тон (рис.1.3). Це 82,2% від усіх накопичених відходів IV класу в Миколаївській області.

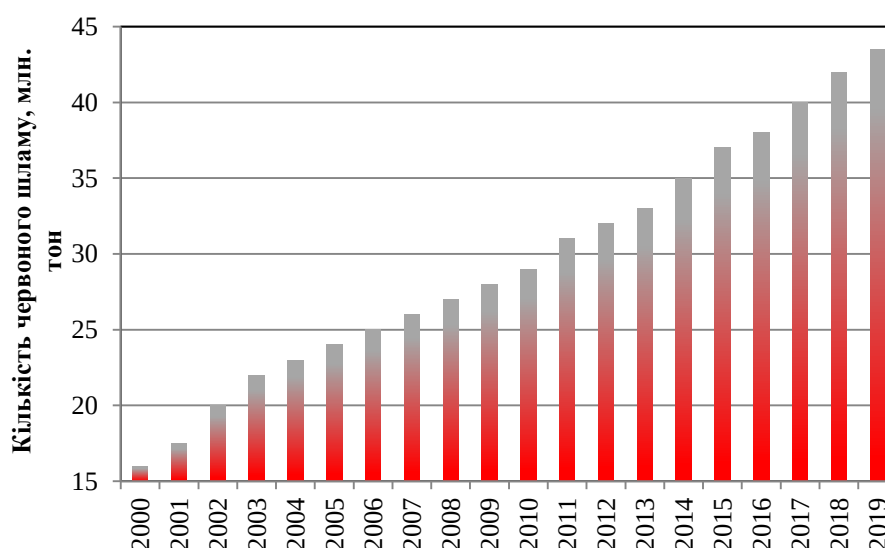


Рисунок 1.3 - Накопичення красного шламу на шламосховищах МГЗ за 2000
2019 роки (станом на 1 січня) [8]

Червоний шлам на МГЗ зберігається на двох шламосховищах. Перше було введено в експлуатацію в 1980 році з проектною потужністю 20 мільйонів м³ шламу. Шламосховище №1 (рис.1.4 а) знаходиться на першій заплавній терасі Дніпро-Бузького лиману, в дамбах висотою 22 метри з боку лиману і 12 метрів з боку схилів. Шлам складавався мокрим методом - для зручності транспортування розбавляли водою. Шламосховище №2 було введено у роботу у 2007 році (рис 1.4 б). Складування шламів проводиться сухим методом шляхом згущення. Будівництво вели з урахуванням новітніх технологій. Проектна потужність 1,5 мільйона м³ на рік [8].



а



б

Рисунок 1.4 - Загальний вигляд шламосховищ МГЗ: а – шламосховище №1;
б – шламосховище №2 [8]

На даний момент шламосховища заповнюються досить активно тому проблема вторинного використання шламу стоїть дуже гостро.

Дослідження з переробки червоних шламів ведуться у всьому світі і в даний час розроблено сотні способів їх утилізації. В останні роки кількість публікацій на тему рециклінгу червоних шламів значно зросла. Незважаючи на численні дослідження, до цих пір лише незначна частина червоних шламів піддається переробці, що обумовлено низькою рентабельністю більшості технологій, високими капітальними витратами на освоєння нових та складністю реалізації продукції. Багатокомпонентний склад цих відходів дозволяє їх у різних галузях промисловості [9-14]. Способи переробки червоних шламів можна умовно розділити на пірометалургічні, гідрометалургійні та способи безпосереднього використання шламів, наприклад у будівництві [9] або як

каталізатор хімічних реакцій [10]. Такий поділ є умовним, тому що в більшості випадків запропоновані технології включають як пірометалургічні, так і гідрометалургійні процеси.

1.2 Низькотемпературне відновлення заліза із ЧШ

У роботах [15-17] проведено дослідження щодо процесу відділення заліза з червоного шламу способом прямої магнітної сепарації, проте отримані концентрати містили трохи більше 47 % заліза за низького ступеня його вилучення. Тому пряму магнітну сепарацію не можна розглядати як спосіб виділення заліза в окремий продукт, лише як спосіб збагачення червоного шламу.

Низькотемпературне відновлення при температурах 1050 ... 1200 °C дозволяє знизити витрату електроенергії на вилучення заліза, проте при цьому необхідні витрати на дроблення спеку та магнітну сепарацію магнітних фракцій, а вилучення заліза не завжди залишається задовільним. Відділення магнітних фаз після відновлювального відпалу утруднено, оскільки отримані магнітні фази мають дуже малий розмір і важко відокремлюються від порожньої породи [18]. Для їхнього укрупнення в ході відновлення використовують різні добавки.

Автори роботи [19] змішували червоний шлам з вуглецем та домішками Na_2SO_4 та CaO , після чого проводили карботермічне відновлення суміші з подальшою магнітною сепарацією. Було визначено оптимальні умови відновлення суміші червоного шламу з 9% Na_2SO_4 , 9,46% CaO та 16% вугілля. Цю суміш відновлювали протягом 80 хв при температурі 1150 °C, а потім піддавали магнітної сепарації в полі зі значенням магнітної індукції 0,08 Тл. Кінцевий продукт (металевий порошок заліза) містив 90,28% Fe зі ступенем металізації 94,87%. Вивчення мікроструктури відновлених зразків показало, що у зразках, отриманих без добавок Na_2SO_4 розмір зерен заліза не перевищує 50 мкм, а з добавками Na_2SO_4 їх розмір перевищує 100 мкм.

В іншій роботі [20] автори досліджували вплив домішків Na_2CO_3 на процес карботермічного відновлення червоного шламу та подальшого

відділення заліза методом магнітної сепарації. При карботермічному відновленні зразка з вмістом 8 % Na_2CO_3 у суміші з червоним шламом та вуглецем при температурі 1050 °C протягом 80 хв автори отримали найкращі результати. Після магнітної сепарації обпаленого зразка в полі зі значенням магнітної індукції 0,08 Тл кінцевий продукт містив 90,87 % Fe, ступінь його металізації склала 94,28 %, а ступінь вилучення заліза в концентрат дорівнювала 95,76 %.

У роботах [21, 22] досліджували ефективність домішок Na_2SO_4 та Na_2CO_3 на процес зростання зерен заліза при карботермічному відновленні червоного шламу. У процесі карботермічного відновлення протягом 60 хв при температурі 1050 °C у присутності 6 % Na_2SO_4 та 6 % Na_2CO_3 параметри відділення заліза були найкращими. Після магнітної сепарації отриманого обпаленого зразка у полі 0,1 Тл кінцевий продукт містив 90,12 % Fe. Ступінь вилучення заліза в концентрат становила 94,95%. Як показало дослідження мікроструктури, у зразках, одержаних без домішок, розмір зерен заліза не перевищує 1 - 5 мкм, а з домішками 6 % Na_2SO_4 та 6 % Na_2CO_3 їх розмір був вищим за 100 мкм.

Автори [23] повідомляють, що домішки Na_2CO_3 і CaF_2 також покращують ефективність магнітної сепарації відновленого карботермічним способом заліза з червоного шламу. Проведено відновлення зразка червоного шламу без домішок протягом 180 хв при температурі 1150 °C. Досліди показали, що ступінь металізації заліза був нижчим за 90 %. При випалюванні суміші з добавками 3% Na_2CO_3 і 3% CaF_2 за тих самих умов ефективність магнітної сепарації збільшилася, а вміст заліза в магнітному концентраті зріс до 92,79%, ступінь вилучення заліза в концентрат склала 89,57 - 91,15%.

Автори робіт [24, 25] досліджували залежність параметрів відділення заліза методом магнітної сепарації відновленого червоного шламу від кількості добавок CaCO_3 або MgCO_3 температури і часу витримки. У процесі відновлення суміші протягом 110 хв із співвідношеннями червоний шлам: вуглець = 100:18 і червоний шлам: добавки CaCO_3 або MgCO_3 = 100:6 при температурі відновлення 1300 °C результати виявилися найкращими. Після

магнітної сепарації вміст заліза у магнітному концентраті становив 88,77%, ступінь металізації 97,69% за ступенем вилучення заліза в концентрат 81,40%.

Незважаючи на нижчі енергетичні витрати на відновлення сполук заліза до магнетиту, ці способи менш ефективні, ніж відновлення до металевого заліза. Аналізи отриманих авторами [26, 27] концентратів показали, що з відновлення сполук заліза до магнетиту у яких міститься трохи більше 62 % заліза, тоді як із відновлення до металу вміст заліза в магнітній фракції становило 88 - 94 %.

Найкращі результати магнітної сепарації були отримані після карботермічного відновлення червоного шламу з добавками Na_2SO_4 Na_2CO_3 в інтервалі температур 1050 - 1150 ° С, при цьому встановлено вплив цих добавок на процес зростання зерен магнітної фази.

У роботі [28] вивчено процес отримання заліза прямого відновлення в низькотемпературному плазмовому реакторі. Показано, що шляхом відновлення воднем при температурі 300 °С можуть бути отримані окатки з вмістом металевого заліза більше 77%. При збільшенні температури до 800 °С рівень відновлення заліза становить 99,3 %.

Досліджено процес вуглетермічного відновлення червоного шламу в мікрохвильовій печі [29]. Показано, що за потужності 3000 Вт і часу витримки 45 хв вилучення заліза після магнітної сепарації становить 90,64 %.

Таким чином, за допомогою низькотемпературного відновлення заліза з червоного шламу можливе отримання напівпродуктів з високим вмістом заліза, які можна використовувати як шихту для виробництва чавуну, сталі або для отримання чистих порошків заліза.

1.3 Відновлювальна плавка ЧШ

Основною метою відновлювальної плавки червоних шламів є переведення заліза в окрему фазу та отримання шлаку, придатного для вилучення цінних компонентів, наприклад глинозему, титану, або використання його в будівництві, сільському господарстві, як десульфуратор сталі і т. д. Останнім часом все більше робіт направлено на розробку багатостадійних схем

переробки червоних шламів з метою максимального використання всього шламу без утворення додаткових відходів. Залежно від концентрації різних елементів у вихідному шламі та мети подальшого використання шлаку плавку ведуть з отриманням чавуну або феросиліцію, залізотитанкремнистої лігатури, з добавками різних флюсів (у більшості випадків вапна), а також кварцового піску, глинозему, CaSiO_3 .

Показано, що домішки вапна в процесі відновлювальної плавки червоного шламу сприяють зниженню в'язкості шлаку і покращують поділ фаз. При цьому, за даними авторів [30], оптимальне співвідношення CaO/SiO_2 дорівнює 0,5. За іншими даними [31] оптимальною слід вважати основність, рівну одиниці, при якій температура плавлення шлаку становить $1400\text{ }^\circ\text{C}$, а вилучення заліза 97,6%. При основності 0,9 та температурі плавки $1750 - 1800\text{ }^\circ\text{C}$ кремній, що міститься в червоному шламі, може бути відновлений алюмінієм [32]. Добавки глинозему також призводять до отримання шлаків з низькою температурою плавлення та в'язкістю [31]. Для відновлення оксидів заліза, що містяться в шламі, зазвичай використовують кокс або вугілля, а найбільш повне відділення заліза досягається при температурах в інтервалі $1400...1700\text{ }^\circ\text{C}$.

Через наявність у червоному шламі високої концентрації глинозему доцільно вести плавку з отриманням шлаків, придатних для його вилучення методами гідрометалургії. При цьому запропоновано використовувати алюмокальцієвий залишок після вилуговування в якості компонента сировинної суміші для виробництва портландцементу.

Автори роботи [33] плавили червоний шлам в електродуговій печі з додаванням 20% вапна при температурі $1600 \dots 1700\text{ }^\circ\text{C}$, як відновник використовували вугілля. Отриманий шлак вилуговували розчином 15 - 50 % (за масою) NaOH протягом 3 годин в інтервалі температур $170 \dots 250\text{ }^\circ\text{C}$. У деяких експериментах додавали розчин Na_2CO_3 (10 % з вмістом 120 - 140 г/л на концентрацію NaOH) і NaF (20 г/л). Відношення Т:Ж у всіх експериментах дорівнювало 1:10. Найбільше вилучення глинозему в розчин було досягнуто

при температурі 250 °C та концентрації NaOH, що дорівнює 600 г/л, і склало 95 %. Показано, що при додаванні NaF розчин може знизити вміст в розчині 81 з 200 мг/л (без добавок) до 50 мг/л. При цьому зниження концентрації NaOH до 200 г/л призводить до відповідного зниження виходу глинозему в розчин до 80%.

У роботі [34] вивчали вилучення алюмінію із шлаку відновлювальної плавки червоного шламу. Висушений червоний шлам у кількості 3,0 - 3,5 кг плавили в лабораторній електродуговій печі при температурі 1650 ... 1700 °C протягом 1 години з домішками 8 - 9% буровугільного коксу і 15% вапна у графітових тиглях. Отриманий шлак вилуговували розчином NaOH (460 г/л) під тиском при температурі 280°C протягом 120 хв. За цих умов вилучення алюмінію становило 97% за вмісту кремнію в розчині 2,2 г/л.

У роботі [32] досліджували вилучення рідкоземельних металів (РЗМ) з шлаку відновної плавки червоного шламу HCl, HNO₃ і H₂SO₄. Відновлювальну плавку проводили в інтервалі температур 1500 ... 1600 °C. З добавками волластоніту для зниження температури плавлення і в'язкості шлаку. Найкращі показники вилучення РЗМ були досягнуті при температурі плавки 1500 °C добавкою 20% CaSiO₃ і 5% графіту. Вилучення заліза становило 85%. Концентрація РЗМ у шлаку була в 1,4 рази вищою, ніж у вихідному червоному шламі. Показано, що РЗМ, а також алюміній та титан можуть бути вилучені шляхом обробки шлаку HCl та HNO₃, витяг скандію можливе шляхом обробки шлаку H₂SO₄. При температурі розчинення 90 °C було досягнуто вилучення розчину більше 95 % Sc, 70 % Ti і понад 70 % інших РЗМ.

При додаванні до червоного шламу рівної кількості доломітизованого вапняку та 17 % коксу та подальшому плавленні суміші в електропечі, на 1 т чавуну отримували 3 т гранульованого шлаку. На 1 т шлаку додавали 1,2 т H₂SO₄ і 3,6 м³ води, вилуговували 30 ... 60 хв з утворенням 1 т нерозчинного залишку та 6 м³ розчину. До 1 т залишку додавали 1,2 т сирого фосфату та отримували 2,2 т мінерального добрива. Розчин розбавляли втричі та рідинною екстракцією витягали з нього Ti, Zr, La, V.

У роботі [35] досліджували вилучення титану та скандію з шлаку відновної плавки червоного шламу шляхом його обробки H_2SO_4 та сумішшю H_2SO_4 та H_2O_2 . Плавку проводили в лабораторній електродуговій печі при температурі 1500...1550 °C протягом 1 години з добавками 10% буровугільного коксу і 20 % вапна у графітових тиглях. Зміст Fe_2O_3 в отриманому шлаку склало 1,8%, концентрації Al_2O_3 , TiO_2 , Sc, Y та Nd зросли в 1,59, 1,54, 1,85 та 1,64 рази відповідно. Отриманий шлак вилуговували 2,5 H_2SO_4 і сумішшю 2,5М H_2SO_4 і 2,5М H_2O_2 з відношенням Т:Ж 1:10 при 100 °C протягом 30 хв. Найкраще вилучення скандію було досягнуто вилуговуванням сумішшю H_2SO_4 і H_2O_2 . Вивчали осадження скандію шляхом обробки розчину аміаком у діапазоні рН між 3,3 ... 3,8 з двоступінчастим кроком для видалення заліза та осадженням скандію розчином $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ у вигляді ScPO_4 .

Використання традиційних металургійних плавильних агрегатів потребує спеціальної підготовки червоних шламів до плавлення - сушіння та видалення лугу. Ці операції призводять до високих витрат та зниження економічної ефективності переробки.

Компанією NALCO розроблено процес отримання чавуну із червоних шламів у плазмовій печі [36]. Суміш із червоного шламу, вапна, кварцу та графіту плавили в плазмовій печі при температурі 1600 °C протягом 20 - 30 хв. Як плазмоутворюючий газ використовували аргон. Найкраще вилучення заліза становило 70 % за основності 0,3, витримці 25 хв і потужності 12,5 кВт. В результаті експериментів було отримано чавун складу, %: 4,1 C; 0,051 S; 0,198 P; 0,07 Si і шлак складу, %: 13,49 SiO_2 ; 41,82 Al_2O_3 ; 20,29 CaO; 3,94 Na_2O ; 5,03 FeO; 5,8 MgO. Отриманий шлак запропоновано використовувати у будівництві.

Надалі робота була продовжена [37] та розроблена екологічно чиста технологія переробки червоних шламів з отриманням «зеленої сталі», що включає стадії магнетизуючого відпалу, магнітної сепарації відновленого заліза та плавлення концентрату у водневому плазмовому плавильному реакторі. При цьому досліджено процес магнетизуючого відпалу в печі з випаленням з нижнім ухилом. Магнітну фракцію виділяли водною сепарацією низько-

інтенсивному магнітному сепараторі з магнітною індукцією 2000 Тл. Отриманий концентрат плавили в плазмовій печі при температурі 2000 °С продувкою воднем. В результаті плавки отримали метал з низьким вмістом вуглецю, що містить, %: 0,02 P; 0,07 S; 0,02C.

Запропоновані методи мають обмежене застосування в промисловості через конструктивні недоліки плазмових печей та високу вартість отримання чистого водню.

1.4 Утилізація ЧШ при виробництві будівельних матеріалів

1.4.1. Виробництво цементу

Звичайний портландцемент зазвичай отримують шляхом спікання суміші вапняку, кварцу, залізної руди, глини або бокситу. Червоний шлам (ЧШ) має певну цементуючу активність, і його склад подібний до портландцементу, що дозволяє використовувати його для виробництва цементу. Однак його гідравлічна активність є низькою, тому ЧШ зазвичай застосовують у поєднанні з гіпсом, доменним шлаком, летючою золою, породою вугільних шахт, вапном та іншими речовинами для стимуляції цементуючої активності.

Компанія *Shandong Aluminum*, перший глиноземний завод у Китаї, почала використовувати ЧШ дуже рано. Ще у 1958 році компанія успішно виготовила портландцемент, використовуючи як основні сировинні матеріали спечений ЧШ і хвости вапняку, застосовуючи вологий технологічний процес. Також додавали 5% гіпсу та не більше ніж 15% активних змішаних матеріалів. Процес виробництва цементу на основі ЧШ був подібний до процесу виробництва портландцементу. Міцність цементу на основі ЧШ досягала 48–52 МПа, що повністю відповідало вимогам звичайного цементу марки 425R. Однак через високий вміст лугів у ЧШ (2,0–10,0% Na₂O) [38] співвідношення додавання ЧШ було обмежене і складало лише близько 25% [39].

Для збільшення частки ЧШ у сировинній суміші без видалення лугів компанія провела багато промислових експериментів з додавання мінералізатора до цементу. Результати показали, що додавання 0,5% мінералізатора флюориту (який містить 40–60% CaF₂) до сировини може

сприяти нормальному поглинанню вільного оксиду кальцію під час процесу спікання. Клінкер міг нормально спікатися за високого вмісту лугів (до 1,8%), і частку ЧШ можна було збільшити до 40–45% без погіршення механічних властивостей [40]. Ця технологія успішно була впроваджена у виробництво на початку 1980-х років.

З 1954 року компанія *Shandong Aluminum* виробляє портландцемент на основі червоного шламу (ЧШ) з річним випуском 1,6 мільйона тонн клінкеру. До 1997 року компанія виробила понад 20 мільйонів тонн цементу і комплексно утилізувала понад 6 мільйонів тонн ЧШ, що є найбільшим методом комплексної утилізації червоного шламу на сьогодні. Середнє річне співвідношення ЧШ становило 20–38%, кількість використаного ЧШ — 200–420 кг на тонну, а загальний рівень утилізації ЧШ досягав 30–55% [41].

Однак мокрий процес полягав у тому, що сировину подрібнювали до стану шламу (з вмістом води 32–40%) для випалу, що вимагало великої кількості енергії для висушування сировини та значно підвищувало вартість виробництва [42]. Сухий процес передбачає подрібнення сировини до стану сухого порошку для випалу з низькими енерговитратами. Однак під час сухого процесу важко досягти повного змішування сировини, що обмежує його застосування. Завдяки технологічному прогресу в цементній промисловості стало можливим замінити мокрий процес на сухий.

Крім того, компанія *Shandong Aluminum* вирішила проблему видалення лугів із ЧШ. Вони використовували вапно як основний агент для видалення лугів, здійснюючи процес при низькій температурі 70–90°C, з співвідношенням кальцію до натрію приблизно 3,0 і співвідношенням рідини до твердого 3,0. Рівень видалення лугів із ЧШ досягав понад 80%, а вміст лугів знижувався з 2,5–3,5% до менше ніж 1,0%, що відповідало вимогам для цементу з низьким вмістом лугів [43].

У 2003 році компанія запустила першу виробничу лінію нового сухого процесу з виробництва цементного клінкеру потужністю 3000 тонн на день, використовуючи спечений ЧШ і комбінований ЧШ як сировину. Частка ЧШ

досягала 45%, а якість цементу була покращена з портландцементу марки 425 до портландцементу марки 525 [44]. На основі подібного процесу компанія *Guangxi Aluminum* у 2015 році розпочала будівництво нової лінії сухого процесу для виробництва клінкеру потужністю 3200 тонн на день і 6600 тонн на день. Очікувалося, що після завершення проекту компанія утилізуватиме 1,02 мільйона тонн червоного шламу, відходів вапняку, летючої золи, шлаку, гіпсу після десульфуризації та інших промислових відходів щороку.

Висока лужність червоного шламу (ЧШ) є основною проблемою, яка обмежує його використання в цементній (і будівельній) промисловості. Луги в ЧШ переважно знаходяться у вигляді розчинних лугів та хімічно зв'язаних лугів. Розчинні луги є важливим компонентом лужності ЧШ і становлять близько 40–60% від загальної кількості лугів. Вони головним чином присутні у формах NaOH , Na_2CO_3 , NaHCO_3 , $\text{NaAl}(\text{OH})_4$, Na_2SiO_3 , KOH та K_2CO_3 [45]. Ці речовини легко розчиняються у рідкій фазі, що призводить до підвищення значення рН.

Хімічно зв'язані луги утворюються внаслідок реакції діоксиду кремнію (SiO_2) у бокситі з розчином натрію алюмінату. Вони здебільшого представлені у формах канкриніту, содаліту, цеоліту та аморфного натрієвого алюмосилікату [46]. Цементна промисловість суворо регулює вміст лугів у сировині, і зазвичай він не повинен перевищувати 1%. Дослідження показали, що частка додавання ЧШ в цементну суміш залежить переважно від кількості лужних речовин, що містяться в ЧШ, яка становить лише близько 20–30%.

Хоча було запропоновано деякі доцільні методи видалення лугів, висока лужність ЧШ залишається основною проблемою, що обмежує його використання в цементній і будівельній промисловості. Крім того, ринкове сприйняття продуктів на основі ЧШ залишається низьким, як видно із призупинення використання цементу для нафтових свердловин. Отже, окрім покращення продуктивності цементу на основі ЧШ, необхідно, щоб уряд посилив інформування про ці продукти і стимулював їх використання.

1.4.2. Виробництво цегли

Традиційно спечені цегли виготовляли з глини, сланцю, вугільних відходів та інших матеріалів, які випалювали при високій температурі [47]. Процес виробництва спечених цеглин на основі червоного шламу (ЧШ) був подібний до традиційного процесу і включав подрібнення, змішування, формування, сушіння та випал. ЧШ успішно використовували для виробництва різних видів цегли, таких як теплоізоляційна, водонепроникна, ландшафтна та тротуарна цегла. Склад ЧШ є відносно стабільним і може вважатися інертним компонентом при температурах нижче 900°C [48], що робить можливим використання ЧШ як сировини для виробництва теплоізоляційних та вогнетривких матеріалів.

Довготривалі дослідження показали, що цегла на основі ЧШ має хороші властивості, а її радіоактивність знаходиться в межах прийнятних норм (внутрішній індекс радіоактивності (IRa) і зовнішній індекс радіоактивності (Ir) менше 1.0, відповідно до стандарту GB 6566-2010 «Обмеження радіонуклідів у будівельних матеріалах») [49].

У 2009 році алюмінієвий завод у провінції Шаньсі успішно розробив вогнетривкі теплоізоляційні цегли для промислових печей, використовуючи ЧШ та летючу золу як основні матеріали, причому частка ЧШ і летючої золи перевищувала 50%. У 2010 році було побудовано виробничу лінію для виробництва вогнетривких теплоізоляційних цеглин на основі ЧШ і летючої золи з річною потужністю 12 000 тонн [50]. На сьогодні компанія створила виробничу лінію для виробництва вогнетривких ізоляційних цеглин на основі ЧШ і летючої золи з річним випуском 100 000 тонн, де частка ЧШ становить приблизно 30% від загальної маси продукції. Щорічний обсяг утилізації ЧШ досяг приблизно 30 000 тонн, і ці вогнетривкі цегли показали механічні властивості, які були співставні з традиційними спеченими цеглами. До того ж, вони мали кілька переваг, таких як висока пористість, низька щільність та низька теплопровідність.

Для розширення сфери застосування спечених цеглин на основі ЧШ Науково-дослідний і проектний інститут будівельних матеріалів провінції Гуйчжоу успішно виготовив спечену тротуарну цеглу, використовуючи ЧШ, сланець і вугільні відходи як основні сировинні матеріали. При цьому частка ЧШ у суміші досягала 40–50%, а механічні властивості відповідали вимогам до спеченої тротуарної цегли згідно з національним стандартом GB/T 26001-2010.

Червоний шлам також використовується у виробництві водонепроникної цегли, що є запатентованою технологією спечених цеглин на основі ЧШ [51]. Ця технологія вирішує проблему розчинення лужних та важких металів у ЧШ, що дозволяє безпечно використовувати його як сировину для виробництва водонепроникних матеріалів для тротуарів. Завдяки цьому рівень комплексної утилізації відходів ЧШ може досягати 50–70%.

У 2018 році в провінції Шаньдун було побудовано повністю автоматизовану лінію з виробництва екологічної водонепроникної цегли на основі ЧШ з добовою потужністю 3000 квадратних метрів, яка дозволяє переробляти майже 100 000 тонн ЧШ щороку. Частка додавання ЧШ досягла 80%. Товщина такої цегли складає 3,5 см, а її міцність на вигин становила 6–8 МПа, тоді як національний стандарт встановлює мінімум 3,2 МПа (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Цегла з червоним шламом на вулицях провінції Шаньдун КНР [51]

Показники радіоактивності, розчинення важких металів та інші характеристики відповідали вимогам до будівельних матеріалів згідно зі стандартом GB 6566-2010. Крім того, цегла на основі ЧШ має чудові

характеристики щодо водопроникності, стійкості до заморожування і розморожування, а також антиковзних властивостей [52]. З економічної точки зору, вартість цієї цегли була на рівні цегли з глини. На сьогодні її широко використовують для укладання тротуарів, що значно покращує їх водопроникність, антиковзні властивості та знижує рівень шуму.

1.5. Використання ЧШ при формуванні плазмових покриттів

Аналіз науково-технічної літератури показав, що порошок ЧШ використовують у якості напилюваного матеріалу при плазмовому напиленні у ряді досліджень [53, 54, 55]. Для цього застосовували плазмотрон, що працює на аргоні, для транспортування порошку використовували азот. Для оптимізації параметрів напилення варіювали потужність (6, 9, 12, 16 кВт). У якості підкладок застосовували низьковуглецеву стал (MS), неіржавіючу сталь (SS), мідь (Cu) та алюміній (Al). Значення товщини отриманих покриттів при різних рівнях потужності, представлені на рис. 1.6.

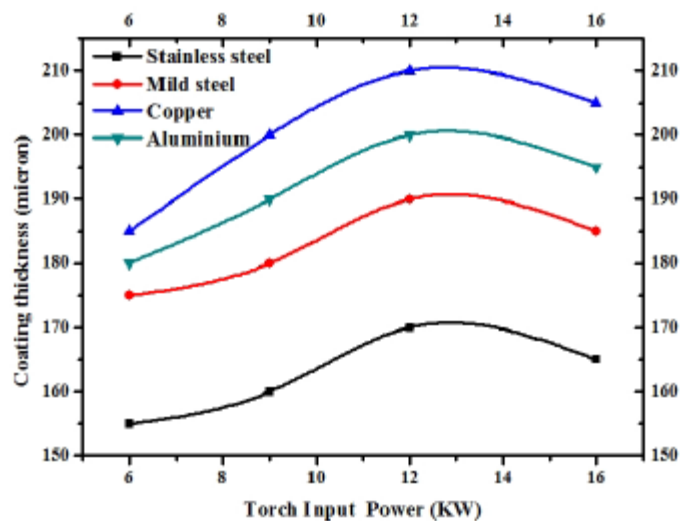


Рисунок 1.6 – Товщини плазмових покриттів з червоного шламу в залежності від потужності при напиленні [53]

Максимальна товщина покриття становила приблизно 200 мікрон для алюмінію, 210 мікрон для міді, 190 мікрон для низьковуглецевої сталі та 170 мікрон для нержавіючої сталі. З рисунка видно, що товщина покриття збільшується зі зростанням потужності плазмового пальника до приблизно 12 кВт, після чого подальше підвищення потужності не призводить до збільшення

товщини покриття. Показано, що товщина покриття різниться для різних підкладок. Товщина покриття є більшою для міді, ніж для алюмінію, низьковуглецевої сталі або нержавіючої сталі при всіх рівнях потужності. Ця різниця пояснюється теплопровідністю матеріалу підкладки, тобто для матеріалів із вищою теплопровідністю (таких як алюміній і мідь) теплопередача від розплавлених частинок відбувається швидше, ніж у випадку матеріалів із відносно нижчою теплопровідністю (таких як низьковуглецева сталь або нержавіюча сталь). Це може сприяти підвищенню швидкості осадження частинок і, таким чином, збільшенню товщини покриття [54]. Встановлено вплив потужності на виду підкладки на міцність зчеплення покриттів з основою (рис. 1.7).

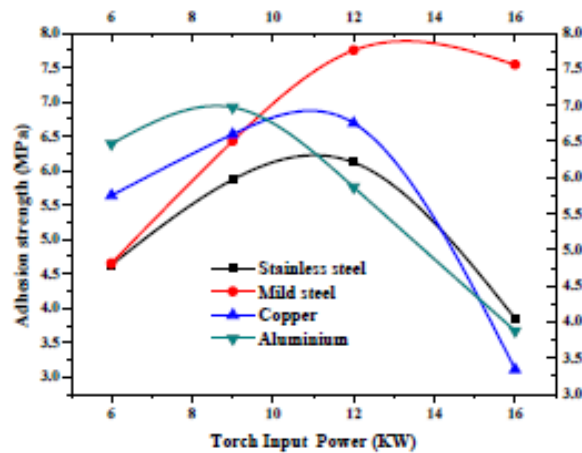


Рисунок 1.7 – Міцність зчеплення плазмових покриттів з порошку червоного шламу [53]

Для покриття на алюмінієвій підкладці міцність зчеплення зросла з 6,39 МПа до 6,92 МПа зі збільшенням робочої потужності з 6 кВт до 9 кВт. Покриття, нанесене при потужності понад 9 кВт, продемонструвало негативний вплив на міцність адгезії. Аналогічно, максимальна міцність зчеплення покриття при потужності 12 кВт склала 6,69 МПа для міді, 7,75 МПа для низьковуглецевої сталі та 6,12 МПа для нержавіючої сталі. Слід зазначити, що в усіх випадках міцність зчеплення на межі розділу збільшується зі зростанням потужності пальника до певного рівня, після чого спостерігається зниження

міцності зчеплення. Мікроструктура покриттів, нанесених на потужності 12 кВт на різні підкладки, наведено на рис. 1.8

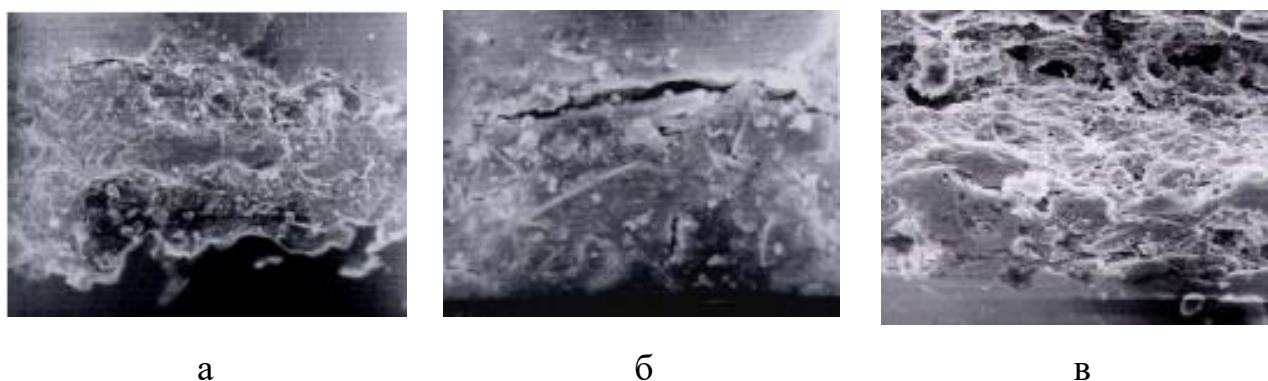


Рисунок 1.8 – Мікроструктури плазових покриттів з порошку червоного шламу при нанесенні на різні підкладки на потужності 12 кВт: а – мідь; б – низьковуглецева сталь; в – неіржавіюча сталь [54]

Порівнюючи ці зображення, видно, що вздовж межі розділу покриття і підкладки на мідній підкладці не утворюються порожнини. Проте на сталевих підкладках видно тріщини вздовж межі розділу. У випадку нержавіючої сталі спостерігається утворення порожнин у шарах покриття. Однак мідна підкладка демонструє кращу однорідність покриття. Утворення тріщин або порожнин на межі покриття може також бути причиною різниці в міцності адгезії покриттів на різних підкладках.

Подальші дослідження [55] полягали у формуванні композиційних плазових покриттів з додаванням червоного шламу. Наносили суміші червоного шламу з золою (30%, 50%), вуглецем (20%) та алюмінієм (5%). Пористість покриттів складала від 8% до 13%, вдалося підвищити міцність зчеплення до 13 МПа. Найвищі показники твердості та зносостійкості спостерігали для композиції з алюмінієм. Таким чином, покриття на основі червоного шламу також мають хороші антифрикційні властивості. У комбінації з додаванням золи або інших матеріалів, таких як карбід хрому, їх зносостійкість може бути покращена. Це особливо важливо для використання в умовах, де існує високий ступінь тертя або абразивний вплив. Додавання золи до червоного шламу поліпшує властивості покриття, зокрема його міцність на стиск і зносостійкість. Покриття, яке включає 50% золи, показало помітні

покращення в порівнянні з чистим червоним шламом. Це може бути корисним для зменшення витрат на матеріали, оскільки використання золи є економічно вигідним. Ці властивості роблять плазмові покриття з червоного шламу перспективними для використання в різних галузях, зокрема для захисту від корозії та зносу деталей військової техніки або промислового обладнання. Дослідження показують, що технологія плазмового напилення дозволяє перетворювати цей відхід на цінний матеріал для відновлення та підвищення довговічності різних компонентів. Однак плазмове напилення характеризується досить високою вартістю та складністю обладнання та низькими значеннями коефіцієнту використання енергії. На противагу плазмовому методу, електродуговий вирізняється простотою, технологічністю, низькою вартістю, найвищою продуктивністю та високим енергетичним ККД процесу.

1.6. Висновки і постановка задач кваліфікаційної роботи магістра

Виходячи з проведеного аналізу науково-технічної літератури стосовно сучасного стану та шляхів розвитку процесів утилізації червоних шламів встановлено, що перспективним напрямом є використання цього матеріалу для формування газотермічних, зокрема, плазмових покриттів, однак даний метод характеризується високою вартістю та складністю обладнання та низькими значеннями коефіцієнту використання енергії. Тому метою роботи є дослідження можливості формування композиційних електродугових покриттів з додаванням червоного шламу та удосконалення цієї технології.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати технологію нанесення електродугових композиційних покриттів;
- дослідити гранулометричний склад та морфологію порошку червоного шламу Миколаївського глиноземного заводу (МГЗ);
- отримати композиційне покриття з додаванням порошку червоного шламу;
- ідентифікувати фази в отриманому покритті;
- проаналізувати мікроструктуру та визначити міцність зчеплення

сформованих композиційних покриттів;

- провести організацію та спроектувати ділянку для нанесення електродугових композиційних покриттів;

- розробити заходи щодо охорони праці та охорони навколишнього середовища при нанесенні електродугових покриттів;

- розрахувати техніко-економічні показники отримання покриття.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ТА НАПИЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ З ДОДАВАННЯМ ЧШ

2.1 Аналіз технології нанесення композиційних покриттів електродуговим методом

2.1.1 Застосування різнорідних дротів

Нанесення електродугових псевдосплавних покриттів із використанням різнорідних дротів демонструє, що цей підхід дозволяє створювати матеріали з поліпшеними механічними, термічними та корозійними властивостями. Використання різноманітних дротів у процесі електродугового напилення забезпечує формування композитних покриттів, що здатні витримувати агресивні умови експлуатації.

Дослідження показують, що використання різнорідних дротів у псевдосплавних покриттях забезпечує оптимізацію властивостей завдяки комбінуванню різних матеріалів. Наприклад, додавання легуючих елементів, таких як хром, нікель та вольфрам, у дроти може суттєво поліпшити механічні властивості, включаючи твердість і зносостійкість [56].

Покриття, створені за допомогою різнорідних дротів, демонструють поліпшені механічні властивості, такі як адгезія, твердість та зносостійкість. Наприклад, комбіновані покриття на основі заліза та нікелю мають вищу зносостійкість у порівнянні з однокомпонентними покриттями [57]. Це пояснюється формуванням змішаних фаз та покращеною мікроструктурою, що виникає в результаті спільного напилення.

Псевдосплавні покриття на основі електродугового напилення з різнорідних дротів також демонструють підвищену корозійну стійкість. Дослідження показують, що покриття, виготовлені з легованих дротів, можуть забезпечувати відмінний захист в агресивних середовищах, зокрема у хімічній промисловості [58]. Наприклад, дроти на основі нікелю з додаванням алюмінію забезпечують високий рівень стійкості до корозії, що робить їх придатними для

використання в морських умовах. Подальші дослідження у цій галузі зосереджені на вдосконаленні технології нанесення покриттів, а також на розробці нових матеріалів із поліпшеними властивостями. Наприклад, комбінація порошкових і дротяних матеріалів відкриває нові можливості для створення покриттів з унікальними властивостями, такими як високий рівень міцності та стійкості до зносу [59, 60].

Аналіз науково-технічної літератури свідчить про те, що використання електродугового напилення з різномірними дротами є перспективним методом для створення композитних покриттів з поліпшеними механічними, термічними та корозійними властивостями. Це дозволяє не лише поліпшити експлуатаційні характеристики покриттів, а й розширити їх застосування в різних галузях промисловості.

2.1.2 Використання порошкових дротів

Електродугове напилення широко використовується завдяки можливості наносити різноманітні склади на різні поверхні, зокрема зі сталевих та інших металевих матеріалів. Порошкові дроти, які використовуються в цій технології, можуть містити композиції металів, карбідів, оксидів та інших твердих фаз для покращення експлуатаційних властивостей покриттів.

Електродугове напилення з використанням порошкових дротів різних складів дозволяє забезпечити утворення покриттів із високою адгезією та довговічністю. Дослідження показують, що найпоширенішими матеріалами є порошки на основі заліза, нікелю та кобальту. До дротів часто додають карбіди, оксиди та інші тверді фази для підвищення зносостійкості та корозійної стійкості покриттів. Наприклад, використання карбіду хрому (Cr_3C_2) у складі порошкового дроту покращує твердість і стійкість до абразивного зносу [61].

Покриття, нанесені за допомогою порошкових дротів із різними складами, можуть демонструвати різні механічні та експлуатаційні властивості. Наприклад, додавання карбідів (Cr_3C_2 , WC) значно підвищує твердість і зносостійкість покриттів, що особливо важливо для деталей, які працюють в умовах тертя. Покриття на основі нікелю часто використовуються для захисту

від корозії в агресивних середовищах, таких як хімічні реактори та морська індустрія [62].

Покриття, отримані з використанням порошкових дротів, також демонструють високу корозійну стійкість. Наприклад, порошкові дроти на основі нікелю з додаванням алюмінію та хрому забезпечують чудовий захист у високотемпературних і агресивних середовищах, таких як морська вода або промислові гази [63]. Це робить їх особливо корисними в суднобудуванні та нафтогазовій промисловості.

Сучасні дослідження зосереджені на покращенні структури та властивостей композиційних покриттів за допомогою нових складів порошкових дротів. Особливо перспективними є нанокompозитні матеріали, які демонструють підвищену стійкість до зносу та корозії завдяки вдосконаленій структурі та мікроструктурному контролю [64, 65]. Впровадження таких матеріалів може значно підвищити довговічність і надійність обладнання, що працює в екстремальних умовах.

Аналіз науково-технічної літератури свідчить про те, що використання порошкових дротів у електродуговому напиленні є ефективним підходом для створення композиційних покриттів з покращеними механічними та корозійними властивостями. Різні склади дротів дозволяють налаштовувати властивості покриття залежно від вимог до експлуатації. Подальші дослідження спрямовані на вдосконалення технології та розробку нових матеріалів, які забезпечать ще кращу продуктивність у складних умовах. Однак використання порошкових дротів для отримання композиційних покриттів призводить до підвищеної пористості, що негативно відбивається на комплексі фізико-механічних властивостей покриттів. При цьому підвищується їх вартість. Для зносостійких композиційних покриттів характерний високий рівень залишкових напружень, який викликає появу мікро- і макротріщин, а також недостатню когезійну і адгезійну міцність. Особливо це характерно для покриттів одержуваних значної товщини, які в процесі механічної обробки перешліфовувати під ремонтні розміри. Також в даний час недостатньо

експериментальних даних про розробку і створення композиційних покриттів, які б поєднували в собі високий рівень зносостійкості з достатньою пластичністю, когезійною і адгезійною міцністю. Відсутні дані про взаємозв'язок складу шихти порошкових дротів і їх комбінацій з дротами суцільного перетину з трибологічними властивостями композиційних покриттів, які стримують широке застосування їх у виробництві.

2.2 Аналіз модернізованої конструкції електродугового розпилювача ЕМ-14М

Вдосконалення апарату ЕМ-14М полягало в створенні вузла безперервної подачі матеріалу у вигляді порошку в високотемпературний струмінь, що витікає з сопла ковпака розпилювальної голівки (рис. 2.1).

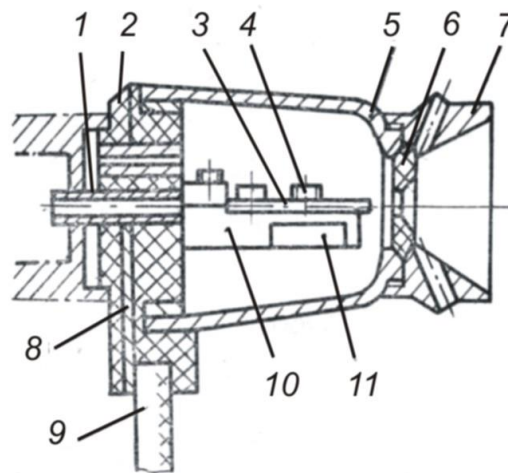


Рисунок 2.1 – Голівка розпилююча:

1 – трубка контактна; 2 – стінка передня; 3 – пластина направляюча; 4 – гвинт спеціальний; 5 – ковпак; 6 – сопло; 7 – захисний екран; 8 – шина; 9 – кабель; 10 – башмак; 11 – скоба

При витіканні струменя стисненого повітря з сопла відбувається інтенсивна інжекція атмосферного повітря в струмінь. Таким чином, якщо підвести до отвору сопла, розташованого в ковпаку розпилювальної голівки, матеріал у вигляді порошку, то він буде інжектуватися разом з атмосферним повітрям в струмінь, що витікає з сопла. Дроти-електроди, що виходять з цього ж сопла, додатково створюють турбулентність потоку стисненого повітря. Це

сприяє гарному перемішуванню різних порошкових частинок, фракцією 40...80 мкм, з краплями розплавленого металу, що в подальшому приводить до рівномірного їх розподілу в покритті.

Оскільки подачу порошку слід здійснювати в потік розплавлених частинок металу, у розпилюючу голівку внесені конструктивні зміни. Розроблено пристрій безперебійної подачі порошків різних матеріалів у високотемпературну зону електродугового апарату ЕМ-14М (рис. 2.2).

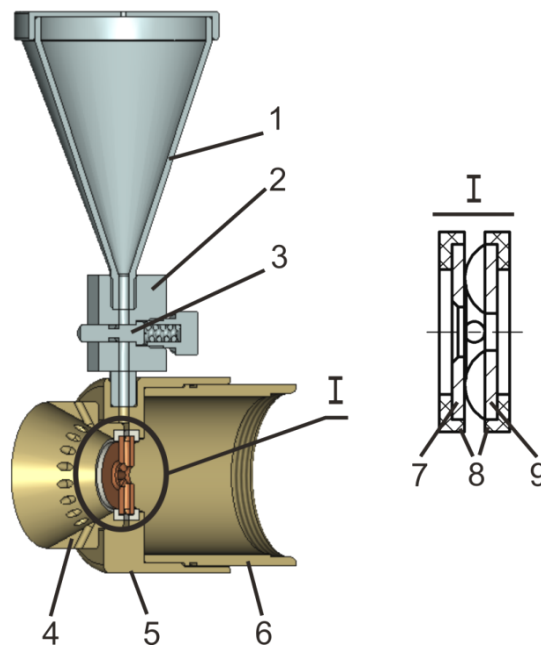


Рисунок 2.2. – Пристрій для безперебійної подачі порошків різних матеріалів в високотемпературну зону електродугового апарату ЕМ-14М:

1 – бункер для порошку; 2 – дозуючий пристрій; 3 – важіль управління дозуючим пристроєм; 4 – захисний екран; 5 – ковпак розпилювальної голівки; 6 – перехідник; 7 – додаткове сопло; 8 – ізоляційні вставки; 9 – основне сопло

Перед основним бронзовим соплом 9, діаметром 6 мм, встановлюється додаткове бронзове сопло 7 з отвором рівним 8 мм. В основному соплі 9 зроблені вісім прорізів, які входять в порожнину між додатковим 7 і основним 9 соплами, розташовані перпендикулярно до осі газового потоку. Сопла 7 і 9 вставлені в ізоляційні вставки 8, які притискаються до ковпака 5 за допомогою

захисного екрану 4. Порошок з бункера 1 надходить у дозуючий пристрій 2. При натисканні важеля управління 3, в дозуючому пристрої 2, порошок за рахунок інжекції подається в порожнину між додатковим 7 і основним 9 соплами.

Проходячи додаткове сопло 7 і електричну дугу, палаючу між торцями двох дрітів-електродів, частинки порошку, змішуючись з потоком стисненого повітря і розплавленими частками металу, направляються в сторону напилюваної поверхні.

Для регулювання зони подачі порошку призначений перехідник 6. Регулювання здійснюється шляхом викручування ковпака 5 з перехідника 6.

Таким чином, можливі три зони подачі порошку в високотемпературну струмінь (рис. 2.3).

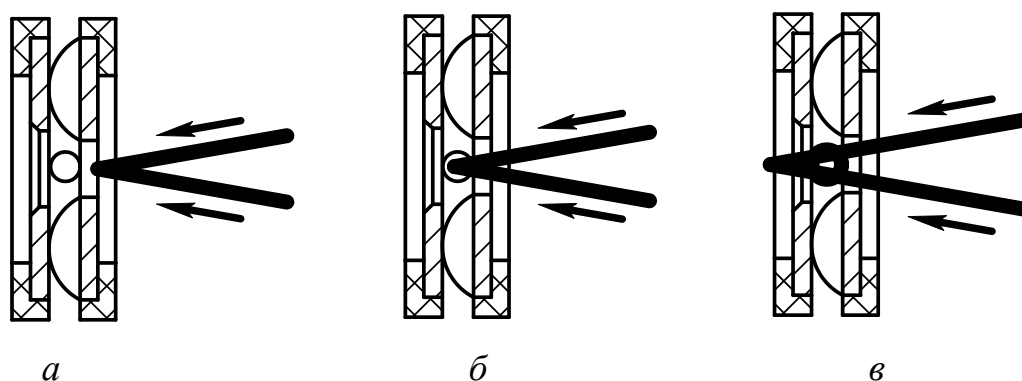


Рисунок 2.3 – Зона подачі порошку:

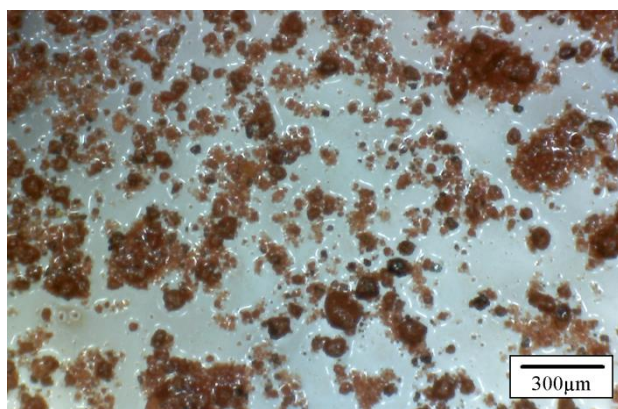
а – до зони горіння дуги; *б* – в зону горіння дуги; *в* – після зони горіння дуги

Для того щоб зберегти високу швидкість змішаного потоку і запобігти наплавленню розплавленого металу з дрітів-електродів на додаткове сопло довжину циліндричної камери змішування потрібно вибрати не більше 3 мм. У цьому випадку не буде відбуватися наплавлення розплавленого металу на додаткове сопло, а частинки порошку, що подаються в зону горіння дуги, перемішуватимуться з рідкими металевими частинками і будуть формувати разом з стисненим повітрям трифазний струмінь.

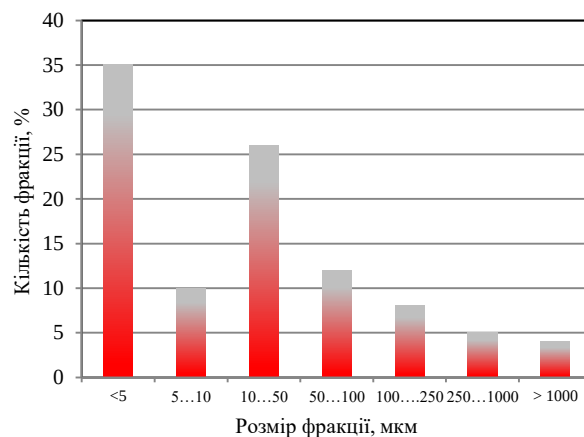
Таким чином регулюючи подачу порошку за допомогою дозуючого пристрою і швидкість подачі дроту можна отримувати композиційні металокерамічні покриття з різною концентрацією порошкових частинок в напиленому шарі.

2.3 Дослідження порошку червоного шламу МГЗ

Перед напиленням покриттів провели дослідження гранулометричного складу порошку червоного шламу з шламосховища МГЗ металографічним методом. Для запобігання конгломерації частинок застосовували спиртовий розчин. Знімки частинок шламу (рис. 2.4а) отримували за допомогою цифрової камери Delta Optical HDCE-20C, що укомплектована програмним забезпеченням для обробки зображень Score Image 9.0, на оптичному металографічному мікроскопі ММУ-3. Розмірна лінійка на знімках встановлювалася за допомогою об'єкт мікрометра ГОСТ 7513-55, який знімався на тому ж збільшенні, що й відповідна мікроструктура. Результати досліджень наведено на рис. 2.4 б.



а



б

Рисунок 2.4 - Загальний вид порошку червоного шламу з додаванням спиртового розчину (а) та результати визначення його гранулометричного складу (б)

Аналіз наведених даних показує, що частинки червоного шламу мають розмір у широкому діапазоні від 1 мкм до 1000 мкм. Найбільша кількість частинок менша за 5 мкм (35%) та з розміром від 10 до 50 мкм (26%). Для

газотермічного напилення покриттів використовується порошок розміром 40...80 мкм, тому для їх отримання можна застосовувати лише до 20% червоного шламу після операцій сушки та ситової класифікації.

2.4 Формування композиційних електродугових покриттів з додаванням червоного шламу та дослідження їх мікроструктури

Сушку виконували в сушильній шафі ШСВ 3,5.3,5.6 / 3,5 при температурі 250 ° С протягом 3 годин. Ситову класифікацію проводили на віброситі СО-130У2, використовуючи сітку номерів 004 і 008 по ГОСТ 6613-86. В результаті просівання виділено порошок фракцією 40 ... 80 мкм, який і застосовувався для отримання композиційного електродугового покриття. Застосування більш дрібнодисперсного порошку при напиленні зазвичай супроводжується покращенням заповнення покриття, що призводить до збільшення щільності та зменшення пористості. Будова покриття стає більш однорідною. Однак на практиці мінімальний розмір часток при газотермічного напилення повинен бути не менше 40 мкм, що обумовлено рядом причин введення порошку в розпилювач. Дисперсні частинки більш схильні до утворення конгломератів при подачі їх потоком транспортуючого газу. Такі частинки можуть випаровуватися при напиленні в результаті попадання у високотемпературну зону дугового розряду, швидко втрачають свою швидкість і не досягають напилюваної поверхні. Великі частинки погано прогріваються у високотемпературному потоці, що також негативно позначається на якості газотермічних покриттів. Напилення порошку з різним гранулометричним складом викликає порушення однорідності покриття через неоднакову швидкість руху і проплавлення дрібних і великих частинок, що знаходяться у високотемпературному потоці.

Підготовку поверхні зразків здійснювали безпосередньо перед напиленням за допомогою установки струменево-абразивної обробки марки 026-7 "Ремдеталь". Як абразив використовували електрокорунд марки 7Б, шліфзерно номер 125. Контроль якості обробленої поверхні проводився

візуально. Струменево-абразивну обробку поверхні проводили на наступному технологічному режимі:

- Тиск стисненого повітря, МПа	0,4 ... 0,6
- Відстань від зрізу сопла до оброблюваної поверхні, мм	100 ... 150
- Діаметр сопла, мм	12
- Кут падіння струменя на оброблювану поверхню, град	60 ... 90
- Лінійна швидкість переміщення пістолета, мм / хв.	50 ... 200

Обробка проводилася в кілька проходів.

Електродугові композиційні покриття наносили шляхом розпилення дроту з алюмінієвого сплаву системи Al-Si марки ER4043 та порошку червоного шламу за допомогою установки КДМ-2, що укомплектована апаратом ЕМ-14М з модернізованим ковпаком розпилювальної голівки, що оснащений вузлом безперервної подачі порошку у високотемпературну зону дугового розряду. Напилення здійснювали на сталеві пластини, виготовлені з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45 розміром 50×20×5 мм і циліндричні зразки, діаметром 15 мм, висотою 4 мм. Товщину покриттів визначали вимірами зразків до і після напилення штангенциркулем. Товщина напилених покриттів становила 1,5 ... 2,0 мм. Параметри режиму напилення обиралися, виходячи з попередніх досліджень щодо формування композиційних керметних покриттів [66] та становили: сила струму - 120А, напруга на дузі - 30В, тиск стисненого повітря - 0,6 МПа, тиск транспортуючого газу – 0,02 МПа, дистанція напилення – 100 мм.

Для дослідження мікроструктури композиційних покриттів виготовлялися мікрошліфи. Металографічні дослідження проводили за допомогою того ж обладнання, що використовувалося для визначення гранулометричного складу червоного шламу. Визначення пористості покриттів та кількості червоного шламу проводили планіметричним методом за отриманими мікроструктурами. Вибір даного методу пояснюється тим, що він у металографічній практиці достатньо ефективний при малому вмісті аналізованої фази (порядку декількох відсотків), та у таких випадках являється

надійнішим за точковий та лінійний методи. Вимір мікротвердості в композиційних електродугових покриттях здійснювали за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 на поперечних шліфах при навантаженні на індентор 20г.

На рис. 2.5 представлено мікроструктуру отриманих композиційних електродугових покриттів.

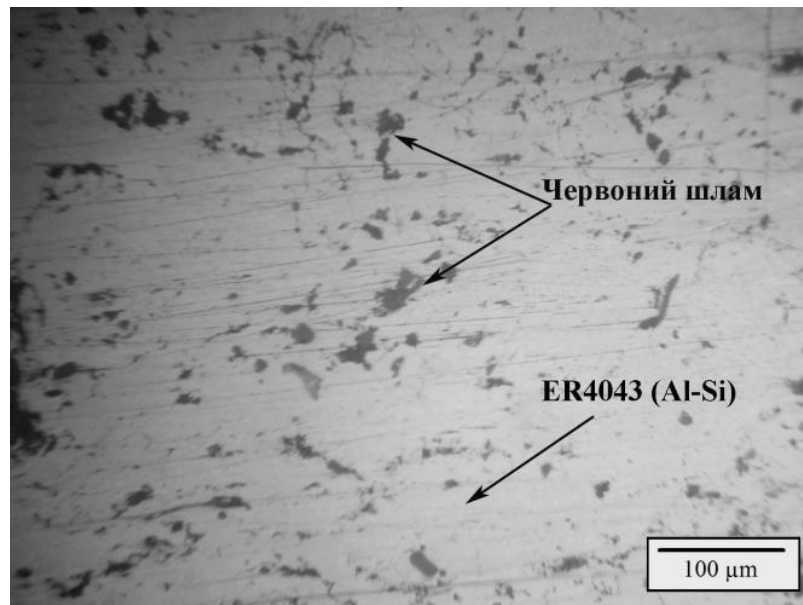


Рисунок 2.5 - Мікроструктура електродугового покриття композиції дрiт ER4043(Al-Si)– червоний шлам

Металографічний аналіз наведених мікроструктур показав, що електродугові композиційні покриття системи дрiт ER4043(Al-Si) – червоний шлам характеризуються досить низькою пористістю, яка становить близько 6%, в структурі добре диференціюються частинки темної (імовірно частинки червоного шламу) і світлої (сплав Al-Si) фаз.

РОЗДІЛ 3. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ФАЗ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ЧЕРВОНОГО ШЛАМУ У ОТРИМАНИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТЯХ. ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ЗЧЕПЛЕННЯ

3.1 Ідентифікація фаз у композиційному покритті

Ідентифікацію фаз в композиційному покритті проводили шляхом вимірювання їх мікротвердості на мікротвердомірі ПМТ при навантаженні на індентор 20 г (рис. 3.1).

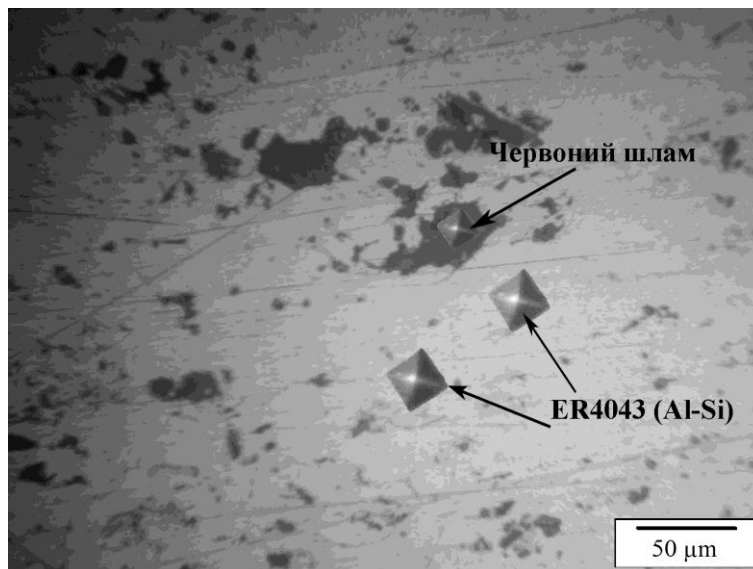


Рисунок 3.1 - Знімок відбитків індентора на різних фазах при вимірюванні мікротвердості

Середня мікротвердість світлої фази (сплав Al-Si) склала 526 МПа; темної 658 МПа, що відповідає мікротвердості червоного шламу [19]. Більш легкі напилювані частинки виносяться на периферію високотемпературного струменя при напиленні та рідше закріплюються у сформованому покритті.

3.2 Визначення вмісту червоного шламу у сформованих покриттях

Визначення вмісту карбідної фази проводили планіметричним методом за отриманими мікроструктурами. Вибір даного методу пояснюється тим, що він у металографічній практиці достатньо ефективний при малому вмісті аналізованої фази (порядку декількох відсотків), та у таких випадках являється надійнішим за точковий та лінійний методи. Планіметричний метод ґрунтується на точному вираженні:

$$\sum V_{\alpha} = \sum F_{\alpha} = \sum h_{\alpha} = \sum z_{\alpha} / z \quad (2.1)$$

де $\sum V_{\alpha}$ – доля фази α у сплаві або сумарний об'єм усіх мікрочастинок цієї фази в одиниці об'єму мікроструктури, $\text{мм}^3/\text{мм}^3$; $\sum F_{\alpha}$ – середня сумарна величина площі, що зайнята фазою α на одиниці площі двовірної структури, $\text{мм}^2/\text{мм}^2$; $\sum h_{\alpha}$ – середня сумарна довжина відрізків, що проходять по фазі α , на одиницю довжини січної, $\text{мм}/\text{мм}$; $\sum z_{\alpha} / z$ – середнє сумарне відношення точок, що потрапляють на α фазу до загальної кількості точок.

Згідно цього рівняння об'ємна частка структурної складової дорівнює частці площі, займаної нею на шліфі. Тому планіметричний метод зводиться до заміру сумарної площі перетинів мікрочастинок даної структурної складової на певній площі металографічного шліфа (рис. 3.2).

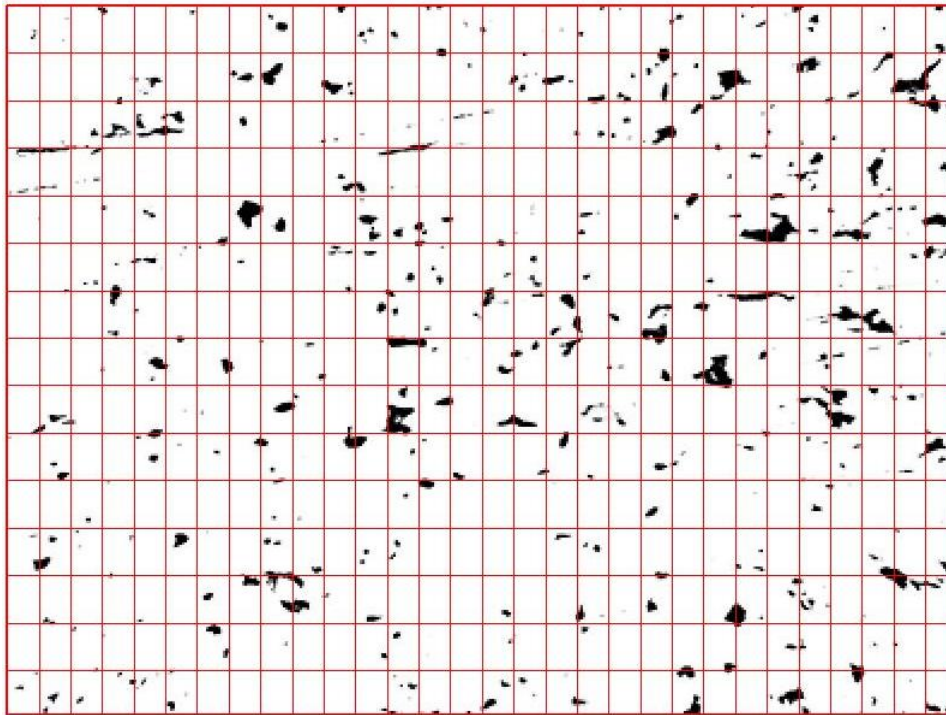


Рисунок 3.2 – Оброблена мікрофотографія композиційного електродугового покриття з ЧШ з накладеною сіткою 30×15 клітинок

При обробці зображення мікроструктури частинки ЧШ потрапили на 68 клітинок з 450. Таким чином вміст ЧШ у покритті складає 15,1% об.

3.3 Дослідження міцності зчеплення нанесених покриттів

У літературі, присвяченій питанням дослідження когезійної і адгезійної міцності газотермічних покриттів, основна увага приділена останній. Це, очевидно, пов'язано з тим, що при експлуатації газотермічних покриттів, мають місце їх відшарування від матеріалу основи, і тому сформувалося переконання, що адгезійна міцність є лімітуючим параметром. Методи прямої кількісної оцінки забезпечують оцінку адгезійної міцності в фізичних одиницях, розуміючи під міцністю зчеплення роботу або зусилля, мінімально необхідні для повного видалення покриття з контактної поверхні.

Одним з основних способів визначення міцності зчеплення покриття з основним металом вважається штифтовий метод, який дозволяє оперативно проводити випробування безпосередньо після нанесення покриття на зразки, тому його й використовували у даній роботі. Зразком служить бобишка, в отвір якої встановлюється штифт таким чином, що його торцева поверхня знаходиться врівень з площиною основи – бобишки (рис. 3.3). На загальну поверхню торця штифта і бобишки після відповідної підготовки наноситься покриття. Випробування проводять шляхом витягування конусного штифта з бобишки із записом зміни зусилля, після відриву штифта від покриття визначають відношення максимального навантаження до площі торця штифта. Це відношення є кількісною характеристикою з'єднання покриття з основою.

Для розтягування зразків використовували розривну машину УММ-5. Зразки для визначення міцності зчеплення виготовляли з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45.



Рисунок 3.3 – Зразок для визначення міцності зчеплення покриттів з основою

Перед нанесенням покриттів поверхню, яка підлягала напilenню, обезжирювали технічним етанолом та піддавали струменево-абразивній обробці. Товщина нанесених покриттів складала 0,5...0,6 мм. Для отримання результатів міцності зчеплення покриттів з основою напilenня на одному режимі виконували в один прохід на 3 зразки. Результати визначення міцності зчеплення напilenних покриттів зі зазначених матеріалів наведено на рис. 3.4.

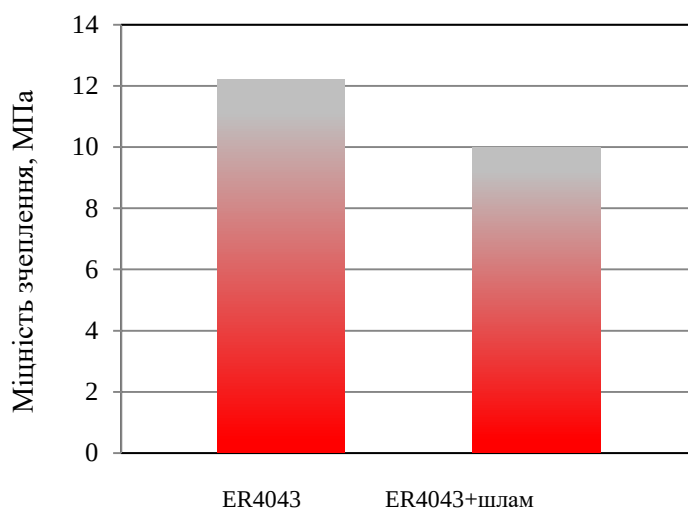


Рисунок 3.4 - Результати визначення міцності зчеплення композиційних електродугових покриттів

Згідно з представленими даними, композиційні покриття з червоним шламом характеризуються меншою міцністю зчеплення з основою (-18%) у

порівнянні з покриттями без наповнювача. При електродуговому напиленні більшість частинок червоного шламу не проплавляється та потрапляє до основи в твердому стані, оскільки вони мають високу температуру плавлення а часу їх знаходження в зоні дугового розряду не достатньо для її досягнення. Тому зниження зазначеної характеристики пояснюється зменшенням фактичної площі контакту покриття з основою.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПИЛЕННЯ ВИЩЕВКАЗАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

При розробці технологічних рекомендацій щодо напилення газотермічних покриттів використовували ОСТ 5.9957-85. Технологічний процес отримання газотермічних покриттів з використанням електроімпульсної дії та наступної термічної обробки складається з наступних послідовних робіт:

- вибір і підготовка матеріалів, які застосовуються при нанесенні газотермічних покриттів;
- підготовка поверхні під нанесення газотермічного покриття;
- вибір режиму напилення газотермічного покриття;
- напилення газотермічного покриття;
- механічна обробка напилених покриттів;
- визначення фізико-механічних властивостей напилених покриттів.

Технологічна схема процесу наведено на рис. 4.1.

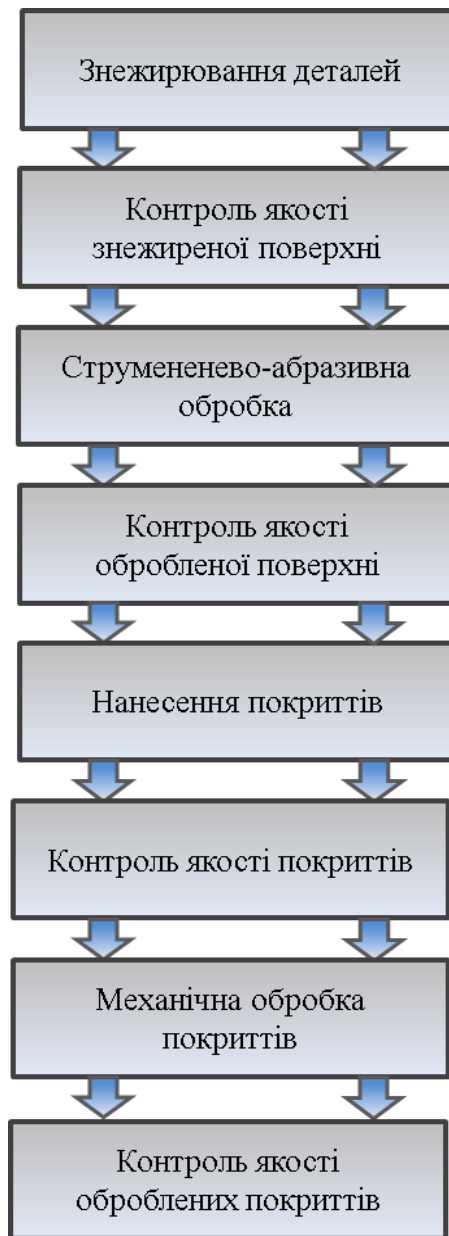


Рисунок 4.1 – Технологічна схема електродугового напилення композиційних покриттів

4.1 Вибір і підготовка матеріалів, які застосовуються при нанесенні газотермічних покриттів

Вихідні матеріали повинні відповідати державним стандартам і технічним умовам на поставку.

Матеріали, які застосовуються при струменево-абразивній обробці, повинні бути сухими, без масляних та інших забруднень.

Стиснуте повітря, яке застосовується при підготовці поверхні під нанесення покриття, не повинно містити вологи і масла. Очистку стисненого

повітря слід проводити шляхом пропускання через вологомастиловідділювач відповідно до ОСТ 5.9829-81. Клас забрудненості стисненого повітря повинен бути непарним по ГОСТ 17433-84.

Визначення ваги порошків слід здійснювати на лабораторних вагах загального призначення – ГОСТ 24104, що забезпечують зважування з похибкою не більше 0,05 г.

Підготовку порошку карбіду хрому перед напиленням виконувати у сушильній шафі з регулюванням температури до 600 °С типу СНОЛ-3,5.3,5.3,5/3,5-ІІМ. При зберіганні порошків в сушильній шафі при температурі 70...90 °С термін зберігання необмежений, в герметичній тарі з водопоглинаючими реагентами – не більше 90 діб. У коморах (при температурі повітря не нижче 18 °С і відносній вологості не більше 50%) в тарі з полімерної плівки – не більше 5 діб.

4.2 Підготовка поверхні під нанесення газотермічного покриття

Підготовка поверхні під нанесення газотермічного покриття складається з наступних операцій:

- знежирення;
- захист поверхні, що не підлягає струменево-абразивній обробці;
- струменево-абразивна обробка;
- захист поверхні, що не підлягає нанесенню покриття.

Знежирення поверхні слід проводити по ОСТУ 5.9582-81 із застосуванням зазначених в стандарті водних лужних розчинів.

Струменево-абразивну обробку слід проводити відповідно до ОСТ 5.9829-81. Поверхні, що не підлягають обробці, повинні бути захищені від впливу абразивних частинок екранами з металу або іншого абразивно-стійкого матеріалу (наприклад, гуми, фторопласту і т.д.). Рекомендований спосіб захисту полягає в нанесенні шару пасти наступного складу: криоліт – 30%, рідке скло – 10%, вода – 60%. В процесі нанесення покриття паста перетворюється на кірку, яка легко видаляється з поверхні щітками.

Для струменево-абразивної обробки слід застосовувати установку марки 026-7 "Ремдеталь" або інший тип обладнання для струменево-абразивної підготовки поверхні з використанням в якості абразива електрокорунду марки 7Б, шліфзерно номер 125.

Струменево-абразивну обробку поверхні необхідно проводити на наступному режимі:

Тиск стисненого повітря, МПа 0,4...0,6;
Відстань від зрізу сопла до оброблюваної поверхні, мм 50...120;
Діаметр сопла, мм 8...12;
Кут падіння струменя на оброблювану поверхню, град 60...90;
Лінійна швидкість переміщення пістолета, мм/хв 50...400.

Обробка ведеться в кілька проходів. Зона струменево-абразивної обробки повинна бути більше зони напилення на ширину не менше 5 мм з кожного боку.

Після струменево-абразивної обробки необхідно видалити металевий пил з обробленої поверхні. Пил слід видаляти пилососом промислового призначення.

На підготовленій до нанесення покриття поверхні не допускається наявності мастила, вологи, пилу, плям від захоплення руками та інших забруднень. Підготовлена поверхня повинна мати сірувато-матовий відтінок. Значення параметрів шорсткості за ГОСТом 9.304-84. Після закінчення процесу підготовки поверхні під напилення категорично забороняється торкатися до підготовленої поверхні руками і брудним інструментом.

При підготовці та транспортуванні, підготовлених до нанесення покриттів деталей, необхідно користуватися знежиреними, чистими інструментами і пристосуваннями, а також чистими брезентовими або бавовняними рукавичками ГОСТ 10354-82.

У разі неможливості нанесення покриття безпосередньо після підготовки, оброблену поверхню необхідно покрити чистою поліетиленовою плівкою для запобігання потрапляння на неї масла, вологи, пилу.

Підготовлені заготовки до нанесення покриття слід зберігати у виробничих приміщеннях при температурі повітря не нижче 15 °С і відносній вологості не

вище 70%, а при необхідності, допускається зберігати на відкритих площах при температурі не нижче +5 °С. Вміст у повітрі корозійно-активних реагентів не допускається.

Термін зберігання заготовок, підготовлених до напилення покриття, тобто перерва між закінченням струменево-абразивної обробки і початком нанесення покриття, не повинен перевищувати 5 годин.

У разі порушення вимог до процесу підготовки, транспортування і зберігання заготовок з обробленою поверхнею рекомендується повторити всю послідовність операцій підготовки.

4.3 Напилення газотермічного покриття

Рекомендований режим напилення композиційного електродугового покриття композиції ER4043-червоний шлам

Сила струму, А120

Тиск стисненого газу, МПа0,5

Дистанція напилення, мм80

Критерії якості нанесених електродугових покриттів: мінімальні показники пористості, кількість несучільностей на лінії підкладки – покриття.

Необхідну товщину покриття отримують переміщенням розпилювача щодо напилюваної поверхні у 3...5 проходів. Покриття наносити з припуском на подальшу шліфовку не менше 0,3 мм.

При нанесенні покриття нагрів підкладки не повинен перевищувати 100 – 150 °С. Для охолодження поверхні допускається короткочасні перерви (до 10 хв.) між закінченням одного і початком іншого проходу розпилювача.

При напиленні необхідно, щоб встановлені значення параметрів режиму напилення не змінювалися. Горіння електричної дуги повинно бути стійким без пульсацій, подача порошку в потік має відбуватися рівномірно, без закупорки отворів для подачі порошку і без потрапляння на напилювану поверхню каплеподібних частинок металу.

У процесі напилення і по його закінченню контролювати стан напилюваної поверхні щодо відсутності сторонніх включень, тріщин, сколів, відшарувань,

здуття, не проплавлених частинок, місць перегріву. При виявленні ділянок з перерахованими дефектами необхідно провести механічну обробку цих ділянок і довколишнього покриття на відстані 20 – 40 мм. При цьому допускається зменшення товщини покриття на 50%. Потім провести підготовку поверхні оброблених ділянок та нанести покриття заново.

Товщину нанесеного покриття визначають вимірами лінійних розмірів (діаметра) до і після напилення мікрометром або штангенциркулем.

Шліфування отриманого покриття проводити за стандартною технологією на круглошліфувальних верстатах 3А423 або круглошліфувальних верстатах іншого типу.

Контроль оброблених покриттів за зовнішнім виглядом проводиться з метою виявлення зовнішніх дефектів – сколів, здуття, відшарувань, тріщин, раковин. Огляд здійснюється за допомогою лупи 10-кратного збільшення ЛІ-3, ЛІ-4 по ГОСТу 25706-83 при коефіцієнті природної освітленості на поверхні виробу не менше 1,5. При висвітленні лампами розжарювання освітленість на рівні робочого місця повинна бути не менше 150 лк, при висвітленні люмінесцентними лампами по ГОСТу 1182-77 не менше 300 лк. При наявності одного із згаданих дефектів виріб бракується.

4.4 Визначення фізико-механічних властивостей напилених покриттів

Контроль мікроструктури здійснюється при збільшенні 150 крат. Пористість напилених покриттів визначається комп'ютерним мікроструктурним аналізом за допомогою програм для металографічного аналізу типу *MEGRAN*, *Jmicrovision*, *Siams*, або за планіметричним методом.

Пористість вказаних електродугових покриттів становить 5...8%.

Міцність зчеплення покриттів визначають методом «витягування штифта». Міцність зчеплення покриттів – 8 ... 12 МПа.

Твердість покриттів за Віккерсом визначати за допомогою приладу типу ТП при навантаженні на індентор 5 кг.

4.5 Висновки до розділу 4

Розроблені технологічні рекомендації та технологічна схема процесу щодо напilenня електродугових композиційних покриттів композиції ER4043-червоний шлам.

РОЗДІЛ 5. ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА НА ДІЛЬНИЦІ НАНЕСЕННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ

5.1 Основні вимоги до дільниці

Підведення живлення до установки електродугового напилення покриттів повинно відповідати "Правилам технічної експлуатації електроустановок споживачами і правилам техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачем"; транспортування, збереження та експлуатація балонів з робочими газами – "Правилам улаштування і безпечної експлуатації ємностей, які перебувають під тиском".

5.1.1 Технічні вимоги до дільниці

Дільниця для електродугового напилення повинна розміщуватися в ізольованих приміщеннях, як правило, на першому поверсі. Проведення повітряних силових і енергетичних магістралей над виробничим приміщенням забороняється. Будівля повинна бути одноповерховою, без горища і підвальних приміщень і мати легку покрівлю вагою не більше 120 кг/м³.

Виробнича дільниця електродугового напилення покриттів повинна мати виробничі і технологічні приміщення:

- **Виробниче приміщення** (звукоізольований бокс, де розміщується джерело живлення, електрометалізатор та інше необхідне обладнання);
- **Технологічні приміщення** (для збереження і підготовки порошків; для підготовки робочої поверхні під напилювання виробів; розміщення обладнання для експрес-аналізу покриттів).

Для електродугового напилення допускається об'єднання виробничих та технологічних приміщень. Розміщення дільниць у підвальних приміщеннях забороняється.

Вибирати місця розміщення виробничих дільниць треба згідно з санітарними вимогами і ГОСТ 12.1.010-76.

Приміщення повинно мати форму, яка не утворює застійних зон, де накопичуються пил, аерозолі і газ.

Стіни і стеля повинні бути оздоблені звукопоглинаючим матеріалом; матеріал покриття підлоги не повинен утруднювати вологе прибирання. Штучне освітлення бажано люмінесцентне. Висота стелі не менше 3,4 м.

5.1.2 Вимоги до освітлення

На підприємствах з нанесення захисних покриттів слід передбачати природне, штучне і поєднане освітлення, а також аварійне освітлення у відповідності до СНіП "Норми проектування. Природне і штучне освітлення".

Штучне освітлення бажано люмінесцентне. Освітленість – не менше 200 лк. Використані неробочі газорозрядні лампи повинні зберігатися в умовах, передбачених “Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачами”.

Контроль освітлення робочих місць слід здійснювати відповідно до вимог розділу СНіП-4-79, ДГСТ "ССБТ. Будівлі і споруди. Метод вимірювання освітленості".

5.1.3 Вимоги до робочих місць

Норма вільної площі на одного робітника – не менше 10 м². Приміщення повинно бути забезпечено вуглекислотними вогнегасниками. Під час виконання робіт з напилювання на робочому місці повинно бути два працюючих .

Конструкція установок для проведення процесу напилення повинна передбачати забезпечення зручної пози при виконанні виробничих операцій, що запобігає статичному перенапруженню рук та ніг, згідно з вимогами «Типової методики за визначенням тяжкої ручної та монотонної роботи в галузях народного господарства» і «Гігієнічної класифікації роботи».

5.1.4 Вимоги до вентиляції приміщення

Напилення необхідно здійснювати у витяжних шафах з примусовою вентиляцією продуктивністю 3000...4000 м³/год. Токсичні і радіоактивні матеріали напилювати тільки у герметичних шафах.

Під час проектування та організації ділянки для електродугового напилювання необхідно визначити:

- номенклатуру і об'єм напилюваних деталей;
- структуру і організацію виробництва;
- економічну доцільність напилювання, склад працівників, площу і планування ділянки, потребу в електроенергії, стиснутому повітрі і т. ін.

У результаті розрахунку та відповідно до нормативно-технічної документації визначаються основні технічні вимоги до проектування ділянки для електродугового напилювання покриттів.

Просторова організація кожного робочого місця ділянки повинна передбачати оптимальне розміщення технологічного обладнання, оснастки, технологічної документації, інструменту і матеріалів, необхідних для виконання основного процесу.

Мінімальні значення відстаней між робочими майданчиками, робочими місцями, установками і елементами будівель наведені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Мінімальні значення відстаней між робочими майданчиками, робочими місцями, обладнанням і елементами будівель.

Найменування	Відстань, м
Прохід між штабелями матеріалів, деталей і т.ін. висотою не більше 1 м	1,0
Проходи між обладнанням	1,5
Відстань між стіною (колоною) та обладнанням	1,0
Проходи навколо робочого місця	1,0
Відстань від стіни (колони) до бокової або тильної сторони верстата	0,8
Ширина проходу між боковими сторонами верстатів:	
при односторонньому русі	1,1
при двосторонньому русі	1,6

5.1.5 Вимоги до захисту від шуму та вібрації

При будівництві ділянок з нанесення електродугових покриттів (з підвищеними рівнями шуму) повинні бути передбачені засоби по захисту від шуму і вібрації відповідно до вимог ДГСТ "ССБТ. Шум. Загальні вимоги

безпеки", "Санітарних норм проектування промислових підприємств" і СНіП по проектуванню захисту від шуму.

Усунення дії на робітників вібрації повинно здійснюватися за рахунок віброізоляції стаціонарного обладнання, використання амортизаторів тощо у відповідності з розділом СНіП і ДГСТ "ССБТ. Методи і засоби вібраційного захисту".

Оцінку рівня шуму на робочих місцях слід виконувати відповідно до "Санітарних норм допустимих рівнів шуму на робочих місцях" і ДГСТ "ССБТ. Шум. Загальні вимоги безпеки" та "Методичних вказівок по проведенню вимірів і гігієнічної оцінки шумів на робочих місцях".

Механізми і устаткування, що генерують шум і вібрацію, повинні систематично контролюватися (не рідше одного разу на рік), а також при введенні їх в експлуатацію та після ремонтування і мати паспорти контрольних вимірів у робочому режимі.

Контроль вібрації на робочих місцях слід проводити відповідно до ДГСТ "ССБТ. Вібрація. Засоби виміру і контролю на робочих місцях. Технічні вимоги", "Методичних вказівок по проведенню вимірів і гігієнічної оцінки виробничих вібрацій", "Методичних вказівок по профілактиці несприятливої дії локальної вібрації".

5.1.6 Вимоги до засобів індивідуального захисту

Робітники підприємств порошкової металургії та дільниць з нанесення захисних покриттів повинні забезпечуватися засобами індивідуального захисту, протипиловими респіраторами, захисними окулярами, протишумами, спецвзуттям, а також спецодягом. Усі робітники повинні бути забезпечені протипиловими респіраторами типу ШБ-1 "Лепесток" або іншими.

Спецодяг робітників повинен знепилюватися. Увесь спецодяг та інші засоби індивідуального захисту повинні знешкоджуватися, підлягають хіміччищенню і пранню не рідше трьох разів на місяць відповідно до ДГСТ "ССБТ. Загальні вимоги до процесу хімічної чистки засобів індивідуального захисту".

5.2 Вибір потрібної кількості обладнання та робочих місць

5.2.1 Визначення і розрахунок партії запуску деталей

Під розміром партії деталей розуміють кількість однакових деталей одночасно оброблених на кожній операції на одному або декількох робочих місцях з одноразовою витратою матеріалу.

$$N_{\text{опт}} = B_{\text{см}},$$

де $B_{\text{см}}$ – денна продуктивність ділянки.

$$B_{\text{см}} = A/D,$$

де A – річна програма виробництва, шт; D – кількість робочих днів у році;

$$B_{\text{см}} = 1500/251 = 5,98 \text{ шт.}, \text{ приймаємо } 6 \text{ шт.}$$

$$N_{\text{опт}} = B_{\text{см}} = 6 \text{ шт.}$$

5.2.2 Розрахунок штучно-калькуляційного часу виготовлення покриття

Штучно-калькуляційний час необхідно розрахувати для визначення необхідної кількості устаткування, кількості основних працівників на ділянці.

$$T_{\text{шт.к}} = t/N,$$

де t – необхідна норма часу на операцію, хв; N – кількість деталей, шт.;

– для сушильної шафи:

$$t = 180 \text{ хв}, \quad N = 6 \text{ шт.}, \quad T_{\text{шт.к}} = 180/6 = 30 \text{ хв.}$$

– для знежирювання поверхні деталі:

$$t = 10 \text{ хв}, \quad N = 1 \text{ шт.}, \quad T_{\text{шт.к}} = 10/1 = 10 \text{ хв.}$$

– для струминнево-абразивної обробки:

$$t = 10 \text{ хв}, \quad N = 1 \text{ шт.}, \quad T_{\text{шт.к}} = 10/1 = 10 \text{ хв.}$$

– для нанесення покриття:

$$t = 10 \text{ хв}, \quad N = 1 \text{ шт.}, \quad T_{\text{шт.к}} = 10/1 = 10 \text{ хв.}$$

- для механічної обробки:

$$t = 15 \text{ хв}, \quad N = 1 \text{ шт.}, \quad T_{\text{шт.к}} = 15/1 = 15 \text{ хв.}$$

5.2.3 Визначення фонду часу роботи устаткування

Календарний фонд часу:

$$\Phi_k = D_k \cdot 24,$$

де D_k – кількість календарних днів у році.

$$\Phi_k = 364 \cdot 24 = 8736 \text{ год.}$$

Номінальний фонд часу роботи устаткування – це кількість робочих днів в році відповідно до певного режиму роботи устаткування без врахування планованих втрат часу на ремонт устаткування:

$$\Phi_n = D_p \cdot T_{zm} \cdot S - (1 \cdot D_{\pi}),$$

де D_p – кількість робочих днів у році;

T_{zm} – тривалість;

S – кількість змін;

D_{π} – кількість передсвяткових днів скорочених на одну годину;

$$\Phi_n = 251 \cdot 8 \cdot 1 - (1 \cdot 6) = 2002 \text{ год.}$$

Ефективний фонд часу роботи устаткування.

При розрахунку ефективного фонду часу планують втрати часу на плановий ремонт устаткування:

$$\Phi_3 = \Phi_n \cdot (1 - \mu),$$

де Φ_n – номінальний фонд часу устаткування; μ – коефіцієнт, який враховує простий устаткування в планово-передбаченому ремонті устаткування;

$$\Phi_3 = 2002 \cdot (1 - 0,24) = 1522 \text{ год.}$$

5.2.4 Розрахунок необхідної кількості устаткування та його завантаженість

Необхідна кількість устаткування на ділянці розраховується по формулі:

$$C_p = TH_i / (\Phi_3 \cdot K_{\text{вн}}),$$

де Φ_3 – ефективний річний фонд часу одиниці устаткування; $K_{\text{вн}}$ – коефіцієнт виконання норм часу; TH_i – річна трудомісткість виготовлення виробів на i -тому устаткуванні;

$$TH_i = t_{\text{шт.к}} \cdot A,$$

де $t_{\text{шт.к}}$ – штучно-калькуляційний час обробки однієї деталі на i -тому устаткуванні; A – річний обсяг випуску деталей.

– для сушильної шафи:

$C_{p1} = (0,5 \cdot 1500) / (1522 \cdot 1,05) = 0,404$ приймаємо одну установку;

– для знежирення поверхні деталі:

$C_{p2} = (0,17 \cdot 1500) / (1522 \cdot 1,05) = 0,16$ приймаємо одну установку;

– для струминно-абразивної обробки:

$C_{p3} = (0,17 \cdot 1500) / (1522 \cdot 1,05) = 0,16$ приймаємо одну установку;

– для нанесення покриття:

$C_{p4} = (0,17 \cdot 1500) / (1522 \cdot 1,05) = 0,16$ приймаємо одну установку.

– для механічної обробки:

$C_{p5} = (0, \cdot 1500) / (1522 \cdot 1,05) = 0,234$ приймаємо одну установку.

Коефіцієнт завантаження устаткування по ділянці визначають по формулі:

$$K_z = C_p / C_{пр} ,$$

де C_p – розрахункова кількість устаткування на ділянці; $C_{пр}$ – прийнята кількість устаткування на ділянці;

– для сушильної шафи:

$$K_{z1} = 0,404$$

– для знежирення поверхні деталі:

$$K_{z2} = 0,16$$

– для струминно-абразивної обробки:

$$K_{z3} = 0,16$$

– для нанесення покриття:

$$K_{z4} = 0,16$$

- для механічної обробки:

$$K_{z5} = 0,234$$

5.3 Компоновка і опис дільниці

Скомпонуємо дільницю для електродугового напилення композиційного металокерамічного покриття з використанням порошку, враховуючи вище наведені розрахунки.

Для нанесення таких покриттів необхідне наступне обладнання:

1 – стелаж для металізованих виробів (1 шт.);

- 2 – касета для дроту (1 шт.);
- 3 – шафи для зберігання матеріалів та спецодягу (1 шт.);
- 4 – тумбочка для інструменту (1 шт.);
- 5 – джерело живлення (1 шт.);
- 6 – електрометалізатор (1 шт.);
- 7 – обертач (1 шт.);
- 8 – вентиляційний зонт (1 шт.);
- 9 – уловлювач пилу (циклон) (1 шт.);
- 10 – вентилятор (1 шт.);
- 11 – манометр (1 шт.);
- 12 – камера для струминно-корундової обробки (1 шт.);
- 13 – компресор (1 шт.);
- 14 – маслотовологовіддільник (1 шт.);
- 15 – монтажний стіл (1 шт.);
- 16 – стелаж для деталей (1 шт.);
- 17 – припливна вентиляційна система (1 шт.).

Для проведення робіт на дільниці електродугового напилення покриттів необхідна присутність двох операторів та помічника. Отже, кількість робочих місць повинно бути три.

Проведемо компоновку дільниці.

Схематично зобразимо дільницю для напилення з розміщенням на ній вище вказаного необхідного обладнання (рис. 5.1).

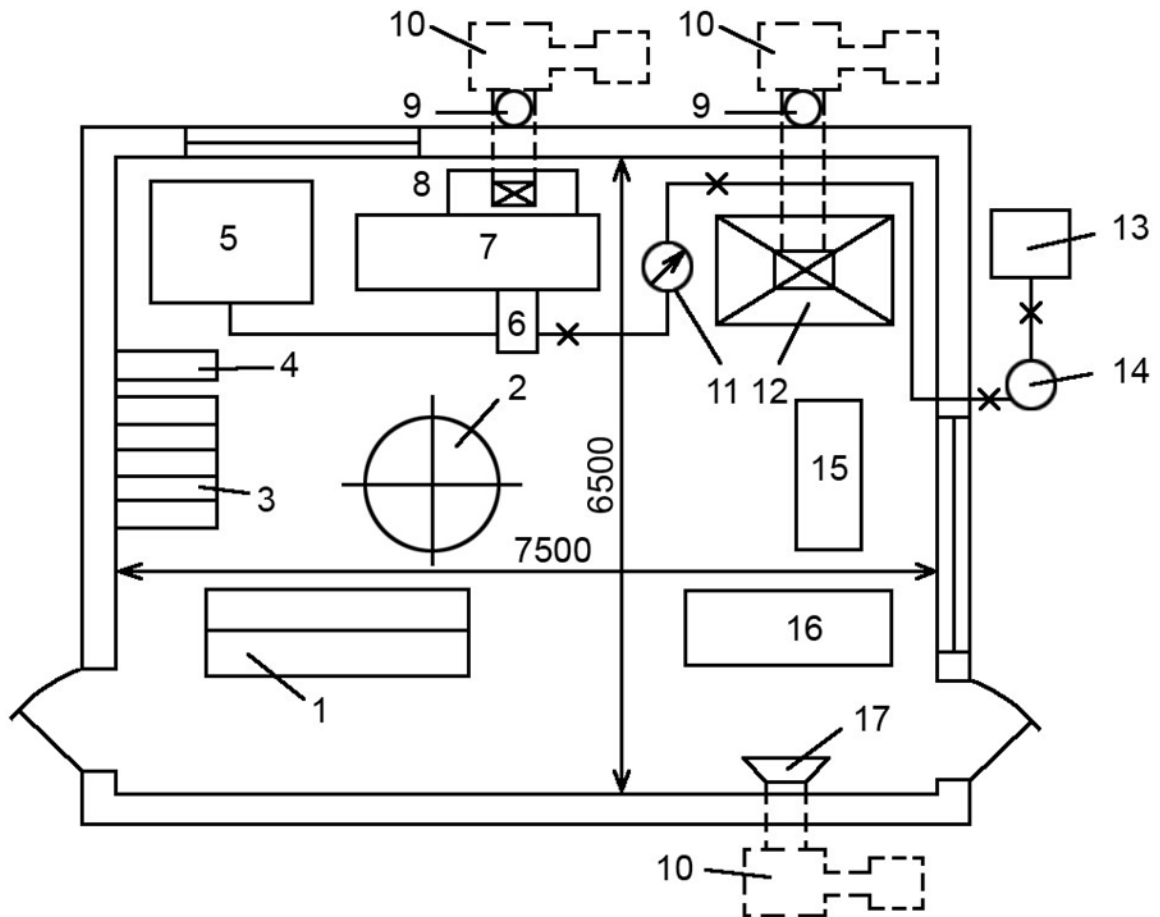


Рисунок 5.1 – Ділянка для електродугового напилення композиційних покриттів:

1 – стелаж для металізованих виробів; 2 – касета для дроту; 3 – шафи для зберігання матеріалів та спецодягу; 4 – тумбочка для інструменту; 5 – джерело живлення; 6 – електрометалізатор; 7 – обертач; 8 – вентиляційний зонт; 9 – уловлювач пилу (циклон); 10 – вентилятор; 11 – манометр; 12 – камера для струминно-корундової обробки; 13 – компресор; 14 – масловологовіддільник; 15 – монтажний стіл; 16 – стелаж для деталей; 17 – припливна вентиляційна система

5.4 Висновки до розділу 5

Таким чином, у даному розділі було спроектовано дільницю для електродугового напилення композиційного покриття з використанням порошку червоного шламу та річної програми по виготовленню виробів у кількості 1500 шт.

РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК СОБІВАРТОСТІ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДАНОЇ РОЗРОБКИ

Перспективним напрямком підвищення терміну служби виробів є утворення поверхневого шару, що контактує з зовнішнім середовищем, із поліпшеними властивостями. Одним з інтенсивно розвинутих напрямків є газотермічне напилювання (ГТН) покриттів: газополуменеве, плазмове, детонаційне, електродугова металізація. При ГТН поверхня деталі, на яку наноситься покриття, нагрівається нижче температури відпуску. Тому для процесів ГТН характерні малі теплові деформації та в багатьох випадках відсутність структурних змін у деталі. Це обумовлює ефективність ГТН-методів для поліпшення експлуатаційних характеристик виробу.

У даній дипломній роботі виконано розрахунок технологічної собівартості виробництва композиційного металокарбідного покриття (1 м² товщиною 0,5 мм) з композиції ER4043-ЧШ напиленого електродуговим методом.

6.1 Вхідні дані

Вхідні дані наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Вхідні дані для проведення розрахунку

Найменування показників	Одиниці виміру	Значення
Обсяг продукції	1 м ² товщиною 0,5 мм	1
Дріт марки ER4043 діаметром 1,2 мм	грн.	100
Порошок червоного шламу	грн.	50
Потужність устаткування:		
- струменево-абразивної обробки	кВт	7
- електродугової установки КДМ-2	кВт	25
- токарський верстат типу ІК-62	кВт	11
- компресор СБ4/3-50АВ.360	кВт	2,2
Ціна за 1 кВт/год	грн.	1,8
Рівень додаткової заробітної плати	%	36,67
Норма амортизації	%	40
Норма витрат на поточний ремонт	%	5

6.2 Розрахунок зміни собівартості

Розрахунок зміни собівартості проводять на річний обсяг продукції за всіма статтями витрат, які підлягають зміні в результаті нового технологічного процесу. Розрахунок робиться за наступними статтями витрат:

- матеріал робітника шару;
- витрати на електроенергію;
- основна заробітна плата;
- додаткова заробітна плата;
- відрахування від заробітної плати;
- амортизаційні витрати;
- витрати на поточний ремонт.

6.3 Розрахунок одночасних витрат на впровадження композиційних, отриманих електродуговим методом

До одночасних витрат відносяться:

- додаткове оснащення, яке необхідно для впровадження нової технології.

Вартість додаткового устаткування наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Найменування й вартість додаткового оснащення

Найменування устаткування	Одиниці виміру	Ціна однієї установки	Кількість установок	Ціна установки
Установка для струменево-абразивної обробки	грн.	12000	1	12000
Установка для електродугового напилювання покриттів КДМ-2	грн.	160000	1	160000
Компресор СБ4/3-50АВ.360	грн.	11000	1	11000

Витрати на покупку устаткування складають:

$$12000 + 160000 + 11000 = 183000 \text{ грн.}$$

6.4 Розрахунок технологічної собівартості

Технологічна собівартість містить у собі витрати на основні матеріали, електроенергію, амортизацію, основну та додаткову заробітну плату, нарахування на основну й додаткову заробітну плату.

Вартість основних матеріалів наведена в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Вартість матеріалів

Найменування матеріалів	Маса матеріалу на один виріб, кг	Річна програма, шт.	Маса матеріалу для виготовлення річної програми, кг	Ціна 1 кг матеріалу, грн.	на виготовлення річної
Дріт 65Г $\varnothing$ 1,2 мм	4	1	4	100	400
Порошок Амперит 580.3	1	1	2	50	50

Витрати матеріалів становлять $100 + 400 = 500$ грн.

Розрахунок заробітної плати основним робітникам

На ділянці для електродугового напилювання покриттів установлена почасово-преміальна система оплати. Розрахунок річної суми тарифної заробітної плати при цій системі наведений у таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Розрахунок основної заробітної плати

Необхідний персонал	Розряд	Кількість працівників	Почасовий тариф грн.	Робочих годин у році	ЗП на одного працівника грн.	Річна заробітна плата на робітників грн.
Інженер – технолог	2	1	25	1	25	25
Оператор	5	1	22	1	22	22
Технік з налагоджувальник устаткування	4	1	22	1	22	22

Підсобний робітник	2	1	22	1	22	22
-----------------------	---	---	----	---	----	----

Витрати на заробітну плату складають:

$$25 + 22 + 22 + 22 = 91 \text{ грн.}$$

Розрахунок витрат на основну й додаткову заробітну плату

Розрахунок витрат основної й додаткової заробітної плати, наведений у таблиці 6.5 згідно з формулою:

$$\text{Додаткова ЗП} = \frac{\text{Основний фонд ЗП}}{250} \cdot 24 \text{ дні.}$$

Таблиця 6.5 – Розрахунок витрат на основну й додаткову заробітну плату

Сума витрат на основну заробітну плату, грн.	Сума витрат на додаткову заробітну плату, грн.
91	0,37

Відрахування від заробітної плати складають 0,37 (грн).

Розрахунок відрахувань від заробітної плати

Таблиця 6.6 – Розрахунок відрахувань від заробітної плати

Сума витрат на основну та додаткову ЗП, грн	Рівень відрахувань, %	Сума відрахувань, грн
91,37	37,5	34,26

Відрахування від заробітної плати становлять 34,26 грн.

Розрахунок витрат на амортизацію

Таблиця 6.7 – Витрати на амортизацію

Найменування устаткування	Кількість установок, шт.	Первинна ціна, грн.	Норма амортизації, %	Сума витрат на амортизацію, грн.
Установка для струменево-абразивної обробки	1	12000	40	4800
Установка електродугового о напилювання КДМ-2	1	160000	40	64000
Компресор СБ4/3-50АВ.360	1	11000	40	4400

Витрати на амортизацію становлять:

$$4800 + 64000 + 4400 = 73200 \text{ грн.}$$

Розрахунок витрат на потоковий ремонт

Таблиця 6.8 – Розрахунок витрат на потоковий ремонт

Найменування встаткування	Первинна ціна, грн.	Кількість установок, шт.	Норма витрат на ремонт, %	Сума витрат на ремонт, грн.
Установка для струйно- абразивної обробки	12000	1	5	600
Установка електродугового напилювання КДМ-2	160000	1	5	8000
Компресор СБ4/3-50АВ.360	11000	1	5	550

З розрахунку видно, що на ремонт устаткування необхідно

$$600 + 8000 + 550 = 9150 \text{ грн.}$$

Розрахунок витрат на електроенергію

Таблиця 6.9 – Витрати на електроенергію

Найменування споживача електроенергії	Одиниці виміру	Витрати на одиницю устаткування	Кількість устаткування	Тривалість включення за зміну, година	Витрати на добу	Ціна електроенергії за добу, грн.	Витрати на річну програму, грн.
1	2	3	4	5	$6 = 3 \cdot 4 \cdot 5$	$7 = 6 \cdot 0,24$	$8 = 7 \cdot 250$
Установка для струменево- абразивної обробки	кВт	7	1	1	7	12,6	12,6

Установка електродугового напилювання КДМ-2	кВт	25	1	1	25	45	45
Компресор СБ4/3-50АВ.360	кВт	2,2	1	1	2,2	3,96	3,96

Загальні витрати на електроенергію становлять:

$$12,6 + 45 + 3,96 = 61,56 \text{ (грн)}$$

6.5 Техніко-економічні показники нанесення композиційних покриттів електродуговим методом

Таблиця 6.10 – Технологічна собівартість продукції

№ п.п.	Найменування статей витрат	Витрати на одиницю виробу, грн. (традиційна технологія)	Витрати на одиницю виробу, грн. (удосконалена технологія)
1	Використовувані матеріали: дріт марки 65Г $\varnothing$ 1,2 мм	400	360
2	Використовувані матеріали: Порошок червоного шламу	—	50
3	Устаткування	183000	183000
4	Електроенергія	61,56	61,56
5	Основна заробітна плата	91	91
6	Додаткова заробітна плата	0,37	0,37
7	Відрахування від заробітної плати	34,26	34,26
8	Витрати на амортизацію	73200	73200
9	Витрати на потоковий ремонт	9150	9150

Собівартість ненаповненого електродугового покриття з дроту ER4043 (1 м² товщиною 0,5 мм) – 587,2 грн. Собівартість композиційного покриття (1 м² товщиною 0,5 мм) з композиції ER4043-ЧШ напиленого електродуговим методом без врахування покупки обладнання та витрат на потоковий ремонт і

амортизацію складає 597,2 грн. Економічний ефект від впровадження розробки слід очікувати за рахунок підвищення зносостійкості покриттів.

РОЗДІЛ 7. ПИТАННЯ ОХОРОНИ ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ ТА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

Статистичні дані про виробничий травматизм свідчать про те, що його рівень у цілому світі безперервно зростає та становить, за даними МОП, біля 125 мільйонів випадків щорічно. У розвинених країнах із високим технічним рівнем він значно менший, ніж у країнах, що розвиваються, в тому числі в Україні. В країнах Євросоюзу від нещасних випадків та професійних захворювань потерпають щорічно близько 10 мільйонів осіб, з яких майже 8000 гине. В цілому по всіх країнах земної кулі кожні 3 хвилини гине людина, а кожні 2 секунди травмуються 8 осіб. Ціна помилки однієї людини безперервно зростає: якщо відразу після другої світової війни від помилки однієї людини гинуло в середньому 2...4 особи, то сьогодні ця цифра наближається до 10.

За статистикою, в Україні щоденно на виробництві травмуються 80...85 осіб, із них до 10% стають інвалідами і до 2% гине.

За даними американських учених, виростити, навчити і підготувати до самостійної праці людину коштує в середньому від 120 до 400 тисяч доларів. В Україні ця цифра значно менша, але досить вагома: 56...200 тисяч. Такої суми недораховується суспільство, якщо людина втрачає працездатність у період найбільш активного й продуктивного віку – 18...40 років, при цьому суспільство додатково витрачає кошти на її утримання та лікування. Крім того, така людина не приносить матеріальної користі суспільству (яку важко підрахувати) так, якби вона працювала і віддавала свої знання та працю людям.

Основні причини смертельних травм в машинобудуванні:

- невиконання вимог посадових інструкцій – 13%;
- порушення трудової й виробничої дисципліни – 10%;
- допуск до роботи без навчання та перевірки знань – 6%.

Найбільша кількість нещасних випадків пов'язана з організаційними (64%), технічними (27%), психофізіологічними (9%) причинами.

7.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів, що впливають на персонал під час напilenня електродугових покриттів

Умови роботи визначаються двома загальними показниками: впливом виробничого процесу, пов'язаним з робочою позою, нервово-психічним станом, напруженістю м'язів і виробничими обставинами під час роботи, що впливають на стан здоров'я людини, нервово-м'язову та психологічну діяльність.

Складовими виробничих обставин є:

- організаційні форми виробничих процесів;
- прийнятий регламент;
- темп і ритм роботи;
- режим роботи та відпочинку;
- санітарно-гігієнічні умови у виробничому приміщенні та на робочому місці;
- умови, які забезпечують безперебійну високопродуктивну роботу (організація робочих місць, виробничий інструктаж та ін.);
- форми керування виробничим процесом;
- соціальний мікроклімат у виробничому колективі.

Несприятливі умови роботи примушують організм людини витрачати енергію на переборювання впливу шкідливих факторів. Внаслідок чого, зростає втома організму, що підвищує ймовірність нещасного випадку, оскільки виснажений організм не може ефективно реагувати на зміни, які відбуваються навколо, навіть якщо ці зміни небезпечні для нього. Дія несприятливих умов роботи може бути також причиною захворювань робітників – професійно або виробничо обумовлених.

До фізичних небезпечних і шкідливих виробничих факторів на ділянці нанесення покриттів електродуговим методом відносять:

- Ємності, які працюють під тиском.

Небезпечними при електродуговому напилюванні є ресивери, балони з робочим газом (повітрям), які перебувають під тиском:

- Підвищена запиленість (металевий пил) і загазованість повітря робочої зони.

У процесі нанесення покриттів електродуговим методом металевий дріт плавиться електричною дугою високої температури, яка має (до 5000 °C), що призводить до випару й вигоряння металевого дроту, тим самим, створюючи металевий пил. Крім того, отримані частки розплавленого металу із дротів–електродів переносяться вбік напилюваної поверхні стисненим газом (повітрям), що також приводить до створення металевого пилу й загазованості робочого місця.

- Підвищений рівень шуму, вібрацій, інфразвукових коливань, ультразвуку, що іонізують випромінювання, статичної електрики, електромагнітних випромінювань.

Робота устаткування для електродугового напилювання створює високий рівень шуму й вібрації, що перевищує припустимі норми й стає причиною виникнення професійних захворювань. Робота розпилювачів, які використовуються при електродуговому напилюванні, супроводжується світловим випромінюванням електричної дуги;

- Підвищений або знижений барометричний тиск, рухомість повітря.

Під час напилювання транспортуєчий газ (повітря) подається під тиском і розігрівається, що призводить до виникнення рухомості повітря;

- Небезпечне значення напруги в електричному ланцюзі;

Електродугові розпилювачі працюють при високій силі струму й напрузі, що небезпечно для життя.

- Відсутність або недолік природного світла, недостатня освітленість робочої зони, підвищена яскравість світла.

Проблеми освітлення робочої зони приводять до захворювань органів зору.

- Пряме й відбите випромінювання, що створює сліпучу дію.

Випромінювання електричної дуги й розплавлених часток металу створює сліпучу дію, тому дивитися на сформований двофазний струмінь незахищеним оком небезпечно.

Дія окремих несприятливих факторів виробничого середовища може привести до виробничої травми – порушенню анатомічної цілісності організму людини або його функцій внаслідок впливу виробничих факторів.

Часто травма є наслідком нещасного випадку. Нещасний випадок на виробництві – раптовий вплив на працівника небезпечного виробничого фактора або середовища, внаслідок якого заподіяно шкоди здоров'ю або наступила смерть.

Освітлення виробничих приміщень – один з основних факторів зовнішнього виробничого середовища, що впливає на людину в процесі роботи. Безпечна й високопродуктивна робота може бути лише при умовах гарного висвітлення робочих місць.

Недостатнє й нерівномірне освітлення робочих місць призводить до перенапруги зору, перевтоми організму й виникненню надмірної нервової дратівливості, ослаблення уваги.

Негативно впливає на зір не тільки недостатня освітленість, а й занадто яскраве освітлення. Перевищення норм яскравості веде до зниження функцій зору, викликає роздратування та різі в очах, головний біль.

Низький рівень освітленості, нерівномірність висвітлення, світлові промені, які б'ють в очі, відблиски від блискучих поверхонь можуть бути причиною нещасних випадків, браку продукції та низької продуктивності праці.

Використовується як природне, так і штучне освітлення виробничих приміщень. Природне освітлення характерно для світлого часу доби й при роботі в приміщеннях, де є прорізи в стінах і даху будов. При штучному освітленні застосовуються відповідні освітлювальні установки штучного світла.

Система освітлення повинна забезпечити:

- достатню освітленість і рівномірний розподіл світлового потоку на робочій поверхні;

- сталість величини освітлення;
- виключення глибоких тіней;
- відсутність різкого розходження в яскравості робочих поверхонь і навколишнього тла (стіни, стелі);
- відсутність сліпучої дії джерела світла великої яскравості.

Основним документом, що визначає необхідні норми освітленості робочих поверхонь, є діючі будівельні норми й правила СНиП II– 4 – 79 (зі змінами й доповненнями 1986 р.).

Цих норм необхідно дотримуватися при проектуванні освітлення приміщень будинків і споруджень різного призначення, місць проведення робіт поза будинками, а також зовнішнього освітлення.

7.2 Вимоги техніки безпеки при напилюванні покриттів електродуговим методом

До роботи на установках електродугового напилювання допускаються особи не молодші 18 років, що мають кваліфікацію електрозварювальника та пройшли інструктаж з техніки безпеки.

Перш ніж приступитися до роботи з нанесення покриттів з металів і їхніх сплавів, з якими раніше робота не проводилася, необхідно одержати довідку від служби техніки безпеки підприємства, де проводяться роботи, про їхню токсичність і додаткові заходи, необхідні для забезпечення безпеки, а також дозвіл на проведення зазначених робіт на металізаційній ділянці. Все електроустаткування, застосовуване для процесу електрометалізації, повинне бути надійно заземлено.

Особи, які працюють на електродугових металізаційних установках, повинні:

- Проходити періодично (кожні 1...2 роки) медичні огляди.
- Пройти курс навчання, здати іспити й одержати свідчення на право роботи на установках і за "Правилами розташування й безпечної експлуатації ємностей, що перебувають під тиском" пройти інструктаж на робочому місці.

– Бути забезпечені спецодягом, спецвзуттям і засобами індивідуального захисту.

При нанесенні покриттів оператор повинен бути одягнений у спеціальний брезентовий одяг з вогнестійким просоченням із захищеними накладками зі спилка по ТУ 17-08-69-77, взуттям за ДСТ 12.4. 010-75, рукавицями за ДСТ 12.010-75, рукавичками за ДСТ 1108-74 або ДЕРЖСТАНДАРТ 5007-75.

Для захисту обличчя та очей працівника від світлового випромінювання електричної дуги – щитки захисні за ДСТ 12.4. 035-78, устатковані світлофільтрами типу Э-2, Э-3 за ДСТ 12.4. 080-79.

Для зниження звуку в стаціонарних умовах роботи з напилювання варто працювати в закритих кабінах, облицьованих вогнестійкими звуковбирними матеріалами.

Як індивідуальні засоби захисту органів слуху металізаторів рекомендується застосовувати протишумові навушники, каски противошумні та антифони-вкладиші за ДСТ 12.4. 051-78.

Як індивідуальні засоби захисту органів дихання необхідно застосовувати респіратори за ДСТ 12.4. 028-76 (в умовах високої запиленості – маски з примусовою подачею повітря).

Ділянка напилювання повинна розміщатися в ізольованих приміщеннях, як правило, на першому поверсі. Розміщення металізаційних ділянок у підвальних приміщеннях забороняється. Приміщення повинно бути з природним або штучним освітленням, мати форму, що виключає утворення застійних зон, у яких може накопичуватися пил, аерозолі та газу. Стіни та підлога повинні бути оброблені звукопоглинаючим матеріалом; матеріал покриття підлоги не повинен ускладнювати вологе збирання. Штучне висвітлення бажано люмінесцентне. Освітленість – не менш 200 лк; висота стін 3,4 м.

Приміщення повинно бути забезпечене вуглекислотними вогнегасниками марок ОУ-2 і ОУ-8.

Установка устаткування, підведення комунікацій повинні відповідати “Правилам технічної експлуатації електроустановок споживачами й правилами техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачем”; транспортування, зберігання й експлуатація балонів з робочим газом – “Правилам розташування та безпечної експлуатації ємностей, що перебувають під тиском”.

Транспортування, зберігання й експлуатація балонів з робочими газами повинні відповідати "Правилам розташування та безпечної експлуатації ємностей, що перебувають під тиском".

Рампу для балонів з робочими газами розміщують за приміщенням.

Джерела комунікацій повинні бути винесені з робочих приміщень, а пульти керування – перебувати на робочих місцях.

7.3 Вимоги техніки безпеки при роботі з порошком ЧШ

Робота з порошком червоного шламу вимагає дотримання вимог в трьох основних сферах: охорона праці, довкілля і техніка безпеки. Червоний шлам містить токсичні елементи (зокрема, важкі метали та луги), які можуть негативно впливати на здоров'я працівників, навколишнє середовище та підвищують ризик нещасних випадків при роботі з ним.

Основними вимогами з охорони праці при роботі з порошком червоного шламу є:

Захист органів дихання: використання спеціальних респіраторів (категорії FFP2 або FFP3), які забезпечують фільтрацію дрібнодисперсних часток.

Захист шкіри і очей: працівники повинні носити захисні костюми, рукавиці, окуляри, щоб уникнути прямого контакту з шламом, який може спричинити подразнення або опіки.

Навчання і інструктажі: регулярні інструктажі з безпеки для всіх працівників, а також ознайомлення з потенційними ризиками і заходами реагування.

Контроль допустимих концентрацій: згідно з вимогами ДСН (Державних санітарних норм) в робочій зоні мають контролюватися концентрації

шкідливих речовин, щоб не перевищувати гранично допустимі рівні для пилу і токсичних елементів.

Червоний шлам є небезпечним відходом, що вимагає спеціальних заходів для запобігання його негативному впливу на навколишнє середовище:

Система утилізації: червоний шлам необхідно зберігати у відповідних контейнерах для токсичних відходів та утилізувати відповідно до затверджених екологічних стандартів (згідно з Наказом Міністерства захисту довкілля України).

Контроль забруднення повітря: обладнання та вентиляційні системи мають бути оснащені фільтрами, які здатні затримувати дрібнодисперсні частки, щоб запобігти їхньому потраплянню в атмосферу.

Захист водних ресурсів: уникати потрапляння шламу в ґрунтові води або водойми, оскільки він може призвести до забруднення водних ресурсів важкими металами та лугами. Необхідно організовувати зберігання у відповідних резервуарах або відстійниках з підвищеним рівнем захисту.

Техніка безпеки при роботі з червоним шламом передбачає мінімізацію ризиків для працівників і зниження ймовірності нещасних випадків:

Захист робочих зон: на виробництві необхідно облаштувати місця для роботи з порошком червоного шламу з локальними витяжками і вентиляційними системами.

Спеціалізоване обладнання: використовувати закриті транспортні та розвантажувальні системи для мінімізації пилу при переміщенні матеріалу.

Аварійні процедури: кожен об'єкт повинен мати аварійний план на випадок розливу або значного витоку шламу. Він включає евакуацію, локалізацію забруднень, застосування засобів нейтралізації.

Пожежна безпека: хоча червоний шлам не є легкозаймистим, обладнання повинно відповідати стандартам пожежної безпеки, а персонал — бути навченим користуванню вогнегасниками та іншими протипожежними засобами.

Ці заходи, прописані у відповідних нормативно-правових актах, зокрема у Законі України "Про охорону праці", Державних санітарних нормах та Санітарних правилах захисту атмосферного повітря, **знижують** ризики для здоров'я, безпеки і довкілля при роботі з червоним шламом.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Показано, що особливо актуальною проблема утилізації відходів виробництва бокситу, а саме червоного шламу, є для Миколаївській області, оскільки на її території розташований МГЗ, на шламосховищах якого на початок 2019 року зберігається близько 43,5 мільйони тон небезпечної сировини. Аналіз науково-технічної літератури стосовно сучасного стану питання переробки та утилізації червоного шламу показав, що в основному їх суть полягає у відновлювальному відпалі та магнітній сепарації с різними домішками та додаванні при виробництві цементу та цегли. Встановлено, що перспективним є напрям пов'язаний із використанням червоного шламу в якості напилюваного матеріалу при нанесенні плазмових покриттів.

2. Досліджено гранулометричний склад порошку червоного шламу МГЗ за допомогою металографічного аналізу. Показано, що частинки червоного шламу мають розмір у широкому діапазоні від 1 мкм до 1000 мкм. Найбільша кількість частинок менша за 5 мкм (35%) та з розміром від 10 до 50 мкм (26%). Для газотермічного напилання покриттів використовується порошок розміром 40...80 мкм, тому для їх отримання можна застосовувати лише до 20% червоного шламу після операцій сушки та ситової класифікації.

3. Отримано експериментальні зразки композиційних електродугових покриттів шляхом розпилення дроту з алюмінієвого сплаву системи Al-Si марки ER4043 та порошку червоного шламу МГЗ за рахунок використання модернізованого розпилювача ЕМ-14М. Аналіз мікроструктури покриттів показав, що вони характеризуються досить низькою пористістю, яка становить близько 6%, в структурі добре диференціюються частинки червоного шламу та сплаву Al-Si.

4. Отримано експериментальні зразки композиційних електродугових покриттів шляхом розпилення дроту з алюмінієвого сплаву системи Al-Si марки ER4043 та порошку червоного шламу МГЗ за рахунок використання модернізованого розпилювача ЕМ-14М. Аналіз мікроструктури покриттів показав, що вони характеризуються досить низькою пористістю, яка становить

близько 6%, в структурі добре диференціюються частинки червоного шламу та сплаву Al-Si.

5. Проведено ідентифікацію фаз шляхом визначення їх мікротвердості на поперечних шліфах при навантаженні на індентор 20г. Встановлено, що мікротвердість металевої матриці складає 526 МПа; червоного шламу – 658 МПа. за планіметричним методом встановлено кількість червоного шламу у покриттях, що склала 12,2% об. штифтовим методом визначено міцність зчеплення традиційних з дроту ER4043 (12,1 МПа) та композиційних ER4043(Al-Si)– червоний шлам (10 МПа) покриттів.

6. Розроблені заходи щодо охорони праці та охорони навколишнього середовища при електродуговому напиленні. Запропоновано подальшу модернізацію розпилювача щодо захисту напилюваного матеріалу від окиснення та підвищення коефіцієнту його використання.

7. Розрахована собівартість ненаповненого електродугового покриття з дроту ER4043 (1 м² товщиною 0,5 мм) – 587,2 грн. Собівартість композиційного покриття (1 м² товщиною 0,5 мм) з композиції ER4043 – червоний шлам напиленого електродуговим методом без врахування покупки обладнання та витрат на потоковий ремонт і амортизацію складає 597,2 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhang R., Zheng S., Ma S., Zhang Y. Recovery of alumina and alkali in Bayer red mud by the formation of andradite-grossularhydrogarnet in hydrothermal process // Journal of Hazardous Materials. 2011. Vol. 189. P. 827- 835.
2. Evan K. The history, challenges and new developments in the management and use of bauxite residue // Journal of Sustainable Metallurgy. 2016. Vol. 2. P. 316 - 331.
3. Anton A., Rekasi M., Uzinger N. etc. Modelling the potential effects of the hungarian red mud disaster on soil properties // Water, Air, & Soil Pollution. 2012. Vol. 223. No. 8. P. 5175 - 5188.
4. Boily R. Twenty cases of red hazard, an inventory of ecological problems caused by bauxite residue from alumina production // Conference paper in Inforex on October 3. 2012. Larval, Quebec. Canada.
5. Mayes W.M., Jarvis A.P., Burke I.T. Dispersal and attenuation of trace contaminants downstream of the Ajka bauxite residue (red mud) depository failure. Hungary // Environmental Science & Technology. 2011. Vol. 45. No. 12. P. 5147 - 5155.
6. Grenerczy G. Wegmuller U. Persistent scatterer interferometry analysis of the embankment failure of a red mud reservoir using ENVISAT ASAR data // Natural Hazards. 2011. Vol. 59. P. 1047 - 1053.
7. Turi, David; Pusztai, Jozsef; and Nyari, Istvan, "Causes and Circumstances of Red Mud Reservoir Dam Failure In 2010 at MAL Zrt Factory Site in Ajka, Hungary" (2013). International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 10.
8. Сколько опасных отходов накопил НГЗ за последние 10 лет: С 28 млн тонн красного шлама — до 43”, НикВести, . [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nikvesti.com/news/photoreportage/179475>.
9. Tsakiridis P.E., Agatzini-Leonardou S., Oustadakis P. Red mud addition in the raw meal for the production of Portland cement clinker // Journal of Hazardous Materials. 2004. Vol. 116. No. 1 - 2. P. 103 - 110.

10. Cakici A.I., Yanik J., Karayildirim S.U.T., Anil H. Utilization of red mud as catalyst in conversion of waste oil and waste plastics to fuel // Journal of material cycles and waste management. 2004. Vol. 6. No. 1. P. 20 - 26.
11. Power G., Grafe M., Klauber C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices // Hydrometallurgy. 2011. Vol. 108. No. 1 - 2. P. 33 - 45.
12. Klauber C., Grafe M., Power G. Bauxite residue issues: II. Options for residue utilization // Hydrometallurgy. 2011. Vol. 108. No. 1 - 2. P. 11 - 32.
13. Grafe M., Power G., Klauber C. Bauxite residue issues: III. Alkalinity and associated chemistry // Hydrometallurgy. 2011. Vol. 108. No. 1 - 2. P. 60 - 79.
14. Grafe M., Klauber C. Bauxite residue issues: IV. Old obstacles and new pathways for in situ residue bioremediation // Hydrometallurgy. 2011. Vol. 108. No. 1 - 2. P. 46 -59.
15. Zhang P.X., Zhou X.L., Shangguan C.C. Recovering iron from red mud with high gradient magnetic separator //Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 644 - 650. P. 5447 - 5450.
16. Fofana M., Kmet S., Jakabsky S. Treatment of red mud from alumina production by high-intensity magnetic separation // Magnetic and Electcal Separation. 1995. Vol. 6. P. 243 - 251.
17. Li Y., Chen H., Wang J. Research on red mud treatment by a circulating superconducting magnetic separator // Environmental Technology. 2014. Vol. 35. No. 10. P. 243 - 249.
18. Podgorodetskii G.S., Gorbunov V.B., Korovushkin V.V. etc. Structure of the red mud from Ural Aluminum Plant after heat treatment in reducing gas // Steel in Translation. 2012. Vol. 42. No. 5. P. 379 - 386.
19. Chun T. J., Zhu D. Q., Pan J. etc. Preparation of metallic iron powder from red mud by sodium salt roasting and magnetic separation // Canadian Metallurgical Quarterly. 2014. Vol. 53. No. 2. P. 183 –189.

20. Zhu D.Q., Chun T.J., Pan J. etc. Recovery of iron from high-iron red mud by reduction roasting with adding sodium salt // Journal of Iron and Steel Research International. 2012. Vol. 19. No. 8. P. 1 - 5.
21. Rao M.J., Zhuang J.Q., Li G.H. etc. Iron recovery from red mud by reduction roasting-magnetic separation // Proceedings of the symposia TMS Light Metals on March 3 - 7. 2013. San Antonio. Texas. USA. P. 125 - 130.
22. Li G.H., Liu M.X., Rao M.J. Stepwise extraction of valuable components from red mud based on reductive roasting with sodium salts // Journal of Hazardous Materials. 2014. Vol. 280. P. 774 - 780.
23. Huang Z.C., Cai L.B., Zhang Y.B. etc. Reduction of iron oxides of red mud reinforced by Na_2CO_3 and CaF_2 // Journal of Central South University (science and technology). 2010. Vol. 41. No. 3. P. 838 - 844.
24. Liu W.C., Yang J.K., Xiao B. Application of Bayer red mud for iron recovery and building material production from aluminosilicate residues // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 161. No. 1. P. 474 - 478.
25. Liu W.C., Yang J.K., Xiao B. Recovering iron and preparing building material with residues from Bayer red mud // The Chinese journal of nonferrous metals. 2008. Vol. 18. No. 1. P. 187 - 192.
26. Liu Y., Zhao B., Yang T. Recycling of iron from red mud by magnetic separation after co-roasting with pyrite // Thermochimica Acta. 2014. Vol. 588. P. 11 - 15.
27. Liu Y.J., Zuo K.S., Yang G. Recovery of ferric oxide from Bayer red mud by reduction roasting-magnetic separation process // Journal of Wuhan University of Technology Material Science Edition. 2016. Vol. 31. No. 2. P. 404 - 407.
28. Bhoi B., Rajput P., Mishra C.R. Production of green direct reduced iron (DRI) from red mud of Indian Origin: A Novel Concept. Conference paper on: Proceedings of 35th International ICSOBA Conference, 2 - 5 October. 2017. Hamburg, Germany.

29. Cong Y.L., He Z.J., Zhang J.H., Pang Q.H. Experimental study on iron recovery by microwave carbon heat reduction-magnetic separation from red mud // *Metalurgija*. 2018. Vol. 57. No. 1 - 2. P. 75 - 78.
30. Pat. 657170 US. Gas-solid reaction / Ban T.E., Goetzman H.E. 1967.
31. Ning G., Zhang B., Liu C. etc. Large-scale consumption and zero-waste recycling method of red mud in steel making process // *Minerals*. 2018. Vol. 8. No 102. P. 1 - 16.
32. Borra C.R., Blanpain B., Pontikes Y. etc. Smelting of bauxite residue (red mud) in view of iron and selective rare earths recovery // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2016. Vol. 2. No. 1. P. 28 - 37.
33. Kaussen F., Sofras I. A., Friedrich B. Carbothermic reduction of red mud in an EAF and subsequent recovery of aluminium from the slag by pressure leaching in caustic solution // Conference paper in: Bauxite residue valorisation and best practices, 5 - 7 October. 2015. Leven, Belgium.
34. Kaben F.M., Friedrich B. Phase characterization and thermochemical simulation of (landfilled) bauxite residue ("red mud") in different alkaline processes optimized for aluminum recovery // *Hydro-metallurgy*. 2018. Vol. 176. P. 49 - 61.
35. Yagmurlu B., Alkan G., Xakalashe B. etc. Combined SAF smelting and hydrometallurgical treatment of bauxite residue for enhanced valuable metal recovery. Travaux 46. Proceedings of 35th International ICSOBA Conference 2 - 5 October. 2017. Hamburg, Germany.
36. Mukherjee P.S., Bhoi B., Mishra C.R. etc. Production of pig iron from NALCO red mud by application of plasma smelting technology // Chapter in Book: *Light Metals*. TMS. 2012. P. 99 - 103.
37. Bhoi B., Behera P.R., Mishra C.R. Production of green steel from red mud: a novel concept // Conference paper on: 6th International symposium on high-temperature metallurgical processing 15-19 March. 2015. Walt Disney World, Orlando, Florida, USA.
38. Sun, Z.; Sun, Z. The basic properties of red mud and its application in cement and concrete. *Coal Ash* 2014, 26, 15–19.

39. Wang, L. An effective way to utilize red mud. *World Nonferrous Met.* **1998**, 8, 43–45.
40. Qi, H. A brief discussion on the disposal method of alumina red mud. *Nonferrous Met. Eng. Res.* 2007, 1, 121–125.
41. Varghese, V.; Akhil, K.; Ramesh, M.R.; Chakradhar, D. Investigation on the performance of alumina and alumina coated cemented carbide inserts during end milling of maraging steel under dry, wet and cryogenic environments. *J. Manuf. Process.* 2019, 43, 136–144.
42. Zheng, X.; Hu, J.; Jiang, M.; Xue, Z. Study on optimization of low temperature Bayer Red mud lime dealkalization process. *Light Met.* **2010**, 4, 21–23.
43. Xu, Z. Comprehensive recovery and utilization of alumina red mud. *Shandong Metall.* **2010**, 32, 8–12.
44. Lyu, F.; Hu, Y.; Wang, L.; Sun, W. Dealkalization processes of bauxite residue: A comprehensive review. *J. Hazard. Mater.* **2020**, 123671.
45. Li, Y.; Min, X.; Ke, Y.; Liu, D.; Tang, C. Preparation of red mud-based geopolymer materials from municipal solid waste fly ash and red mud by mechanical activation. *Waste Manag.* **2019**, 83, 202–208.
46. Zhang, L. Production of bricks from waste materials—A review. *Constr. Build. Mater.* **2013**, 47, 643–655.
47. Ramos Huarachi, D.A.; Gonçalves, G.; de Francisco, A.C.; Canteri, M.H.G.; Piekarski, C.M. Life cycle assessment of traditional and alternative bricks: A review. *Environ. Impact Assess. Rev.* **2020**, 80, 106335.
48. Sglavo, V.M.; Maurina, S.; Conci, A.; Salviati, A.; Carturan, G.; Cocco, G. Bauxite ‘red mud’ in the ceramic industry. Part 2: Production of clay-based ceramics. *J. Eur. Ceram. Soc.* **2000**, 20, 245–252.
49. USGS. Mineral Commodity Summaries 2020. Available online: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2020>
50. Gu, M. Research progress on key technologies of comprehensive utilization of Al_2O_3 red mud. *Light Met.* **2014**, 4, 10–16.

51. Zibo Tianzhirun Ecological Technology Co. LTD. Environmental Protection Permeable Brick and Its Preparation Method; Zibo Tianzhirun Ecological Technology Co. LTD.: Zibo, China, 2018.
52. Wang, L. Discussion on non-discharge of red mud of Shandong aluminum company. *Light Metals* **1997**, 6, 15–18.
53. A. Satapathy, H. Sutar, S.C. Mishra, S.K. Sahoo, “Characterization of Plasma Sprayed Pure Red Mud Coatings: An Analysis”, *American Chemical Science Journal*, vol. 3(2), pp. 151-163, 2013.
54. A. Satapathy, S.C. Mishra. Development of ceramic coatings using red mud – A solid waste alumina plants. *Proceedings of the 21st International Conference on Solid Waste Technology and Management, Widener University*, pp. 232-240, 2007.
55. H. Sutar, S.C. Mishra, S.K. Sahoo, A. Satapathy, “Morphology and solid particle erosion wear behavior of red mud composite coating”, *Natural Science*, vol. 4 (11), pp. 832-838, 2012.
56. Fauchais, P., et al. (2019). "Thermal Sprayed Coatings Used Against Corrosion and Corrosive Wear." In *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM International.
57. Kumar, R., et al. (2021). "Microstructure and mechanical properties of multi-component coatings produced by arc spraying." *Journal of Materials Science*, 56(5), 2358-2370.
58. Agarwal, R., et al. (2020). "Enhanced wear resistance of arc-sprayed coatings through alloying elements." *Surface Engineering*, 36(5), 599-605.
59. Deng, H., et al. (2020). "Corrosion behavior of arc-sprayed coatings in aggressive environments." *Journal of Coatings Technology and Research*, 17(2), 455-467.
60. Sharma, A., et al. (2021). "Recent advancements in arc-sprayed composite coatings: A review." *Journal of Thermal Spray Technology*, 30(1), 12-30.

61. Zhigang, W., et al. (2020). *Microstructure and wear properties of Cr3C2-Ni composite coatings deposited by arc spraying*. Journal of Surface and Coatings Technology, 389, 125629.
62. Li, X., et al. (2018). *Effects of current and voltage on the properties of arc sprayed Fe-based alloy coatings*. Materials Science and Engineering A, 739, 131-139.
63. Fauchais, P., et al. (2019). *Thermal Sprayed Coatings Used Against Corrosion and Corrosive Wear*. In Handbook of Thermal Spray Technology. ASM International.
64. Samal, P., et al. (2021). *Nickel-based arc spray coatings for high-temperature corrosion protection*. Surface Engineering, 37(2), 180-192.
65. Li, W., et al. (2020). *Nanocomposite coatings produced by thermal spraying techniques: A review*. Journal of Thermal Spray Technology, 29(1), 1-17.
66. Dubovoy O.M., Karpechenko A.A., Bobrov, M.M., Gerasin, O.S., Lymar, O.O. Electric arc spraying of cermet coatings of steel 65G-TiC system / Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2021, (2), pp. 63 – 68. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/063>