

УДК 621.793.7

Карпеченко А. А.,

*karpechenkoanton@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7543-4159,
Scopus Author ID: 57194341724.*

*к.т.н., доцент кафедри матеріалознавства і технології металів,
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Бобров М. М.,

*laborantmtm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9098-6912,
Scopus Author ID: 57194197238,*

*к.т.н., асистент кафедри матеріалознавства і технології металів,
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Лимар О. О.,

*aleksandr1402aa@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0301-7313,
Scopus Author ID: 57222551369,*

*к.фіз.-мат.н., доцент кафедри тракторів та
сільськогосподарських машин, експлуатації і технічного сервісу,
Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв*

ФОРМУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ З ДОДАВАННЯМ ЧЕРВОНОГО ШЛАМУ

Анотація. Показано, що особливо актуальною проблема утилізації відходів виробництва бокситу, а самчервоного шламу, є для Миколаївської області, оскільки на її території розташований Миколаївський глиноземний завод (МГЗ), на шламосховищах якого на початок 2019 року зберігається близько 43,5 мільйони тон небезпечної сировини. Проаналізовано сучасні способи його переробки, що полягають в основному у відновлювальному відпалі та магнітній сепарації з різними домішками. Встановлено, що перспективним є напрям пов'язаний із використанням червоного шламу в якості напилюваного матеріалу при нанесенні газотермічних покриттів. 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%). На основі отриманих даних встановлено, що для газотермічного напилення можна застосовувати до 20% червоного шламу, оскільки необхідний розмір частинок становить від 40 до 80 мкм. 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 EM-14M. 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 20 г. 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 з металевою основою.

Ключові слова: електродугове напилення, червоний шлам, композиційні покриття, міцність зчеплення, пористість.

Karpechenko A. A.,

karpechenkoanton@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7543-4159,

Scopus Author ID: 57194341724,

Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of

Department of Materials Science and Metal Technology,

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Bobrov M. M.,

laborantmtm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9098-6912,

Scopus Author ID: 57194197238,

Ph.D., assistant of Department of Materials Science and Metal Technology,

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Lymar O. O.,

aleksandr1402aa@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0301-7313,

Scopus Author ID: 57222551369,

Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of Department of Tractors and Agricultural Machinery,

Operating and Maintenance

Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv

FORMATION OF ALUMINIUM COMPOSITE ELECTRIC ARC COATINGS WITH RED MUD ADDITION

Abstract. *It is shown that the problem of bauxite production waste disposal, namely red mud, is especially urgent for the Mykolaiv region, since the Mykolaiv Alumina Plant (MAP) is located on its territory, at the beginning of 2019 about 43.5 million tons of hazardous raw materials are stored in the sludge storage facilities. Modern methods of its processing are analyzed, consisting mainly of reductive annealing and magnetic separation with various impurities. It has been established that the direction associated with the use of red mud as a sprayed material in the application of thermal sprayed coatings is promising. With the help of metallographic analysis, the granulometric composition of the MAP red mud powder was studied. It has been established that they are characterized by a large spread of particle sizes in the range from 1 to 1000 μm . The largest number of them is less than 5 μm (35%), there is also a large amount of a fraction with a size of 10 to 50 μm (26%) and 50 to 100 μm (12%). Based on the obtained data, it was found that up to 20% of red mud can be used for thermal spraying, since the required particle size is from 40 to 80 microns. Experimental samples of composite electric-arc coatings were obtained by spraying wire from an aluminum alloy of the Al-Si system of grade ER4043 and NAP red mud powder using a modernized spraying gun EM-14M. An analysis of the microstructure of the coatings showed that they are characterized by a rather low porosity, which is about 6%; particles of red mud and Al-Si alloy are well differentiated in the structure. The phases were identified by determining their microhardness on cross sections at a load of 20 g on the indenter. It is established that the microhardness of the metal matrix is 526 MPa; red mud – 658 MPa. The planimetric method determined the amount of red mud in the coatings, which amounted to 12.2% vol. The pin method determined the bond strength of conventional from wire ER4043 (12.1 MPa) and composite ER4043 (Al-Si) – red mud (10 MPa) coatings.*

Key words: electric arc spraying, red mud, composite coatings, bond strength, porosity.

JEL Classification: O 14

DOI: <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-30-02>

Постановка проблеми. З підвищенням світового споживання алюмінію збільшується кількість відходів, що утворюються у процесі виробництва глинозему за способом Байєра – червоних шламів. Залежно від складу вихідних бокситів і технології, на 1 т глинозему утворюється від 0,9 до 1,5 т цих відходів [1, 2]. До сих пір червоні шлами не переробляються, а накопичуються в спеціальних шламосховищах. Через високий

вміст лугів та високодисперсність шламу його складування становить небезпеку для людини і навколишнього середовища [3]. Особливо актуальною дана проблема є для Миколаївської 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). Це 82,2% від усіх накопичених відходів IV класу в Миколаївській області.

Червоний шлам на МГЗ зберігається на двох шламосховищах (рис. 2). Перше було введено в експлуатацію в 1980 році з проектною потужністю 20 мільйонів м³ шламу. Шламосховище № 1 знаходиться на першій заплаві Дніпро-Бузького лиману, в дамбах висотою 22 метри з боку лиману і 12 метрів з боку схилів. Шлам складався мокрим методом – для зручності транспортування розбавляли водою. Шламосховище № 2 було введено у роботу у 2007 році. Складування шламів проводиться сухим методом шляхом згущення. Будівництво вели з урахуванням новітніх технологій. Проектна потужність 1,5 мільйона м³ на рік [4].

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

Дослідження по переробці червоних шламів ведуться по всьому світу і в даний час розроблені сотні способів їх утилізації. В останні роки число публікацій по темі рециклінгу червоних шламів значно зросло. Однак незважаючи на численні дослідження, до сих пір лише незначна частина червоних шламів піддається переробці, що обумовлено низькою рентабельністю більшості технологій, високими капітальними витратами на освоєння нових і складністю реалізації виробленої продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [5-7] був вивчений процес відділення заліза з червоного шламу способом прямої магнітної сепарації, проте отримані концентрати міс-

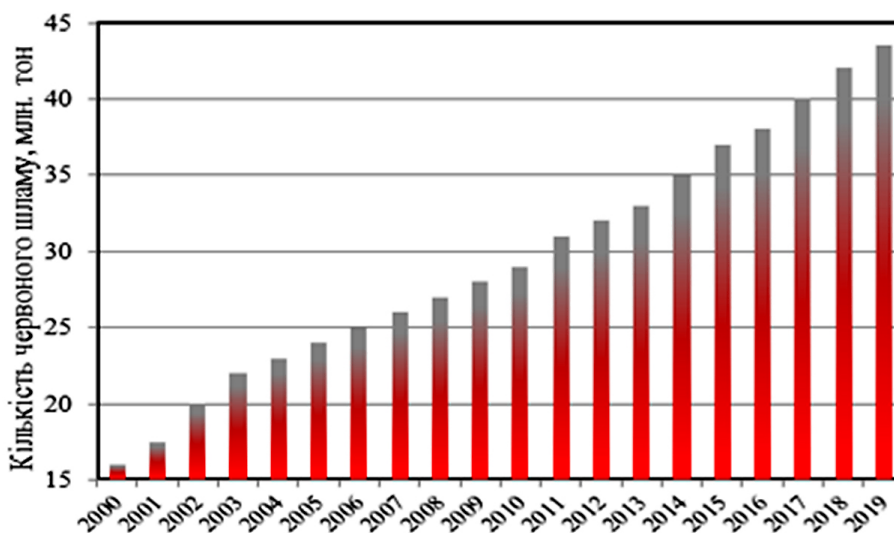


Рис. 1. Накопичення красеного шламу на шламосховищах МГЗ за 2000...2019 роки (станом на 1 січня) [4]



а



б

Рис. 2. Загальний вигляд шламосховищ МГЗ: а – шламосховище № 1; б – шламосховище № 2 [4]

тили не більше 47% заліза при низькому ступені його вилучення. Тому пряму магнітну сепарацію не можна розглядати як спосіб виділення заліза в окремий продукт, а лише як спосіб збагачення червоного шламу.

Низькотемпературне відновлення при температурах 1050...1200 °С дозволяє знизити витрату електроенергії на видобуток заліза, однак при цьому збільшуються необхідні витрати на дроблення спека і сепарацію магнітних фракцій, при цьому видобуток заліза не завжди залишається задовільним. Відділення магнітних фаз після відновного відпалу ускладнено, так як отримані магнітні фази мають занадто маленький розмір і важко відокремлюються від порожньої породи [8]. Для їх укрупнення в ході відновлення використовують різні добавки. Так, у роботі [9] змішували червоний шлам з вуглецем і добавками Na_2SO_4 і 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 і 16% вугілля.

Автори роботи [10] повідомляють, що добавки Na_2CO_3 і CaF_2 також покращують ефективність магнітної сепарації відновленого карботермічним способом заліза з червоного шламу. У дослідно-промисловому масштабі випробувана технологія виробництва з червоного шламу чавуну [11] і мінеральної вати. В роботі [12] описано використання шлаку відновлювальної плавки червоного шламу в якості добавки в портландцемент. У 2009 році алюмінієвий завод Шаньсі (Китайська Народна Республіка) успішно розробив вогнетривку теплоізоляційну цеглу для промислових печей, використовуючи червоний шлам та золу в якості сировини. Коефіцієнт додавання шламу та золи складав більше 50%. Виробнича лінія потужністю 100 000 тонн запрацювала у 2010 році [13]. Інноваційним є рішення авторів роботи [14] застосовувати червоний шлам у якості напилюваного матеріалу при плазмовому нанесенні покриттів. Покриття товщиною до 210 мкм отримували на різних потужностях плазмотрону (6, 9, 12, 16 кВт) на підкладках з вуглецевої та неіржавіючої сталей, алюмінію і міді. Подальші дослідження [15] полягали у формуванні композиційних плазмових 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.

Постановка завдання. Мета роботи полягає у дослідженні можливості формування композиційних електродугових покриттів із додаванням червоного шламу, аналізі отриманої мікроструктури та визначенні їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

Виклад основного матеріалу дослідження. 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 отримували за допомогою цифрової камери Delta Optical HDCE-20С, що укомплектована програмним забезпеченням для обробки зображень Score Image 9.0, на оптичному металографічному мікроскопі ММУ-3. Прожарювання червоного шламу виконували в сушильній шафі ШСВ 3,5.3,5.6/3,5 при температурі 350 °С протягом 3 годин. Ситову класифікацію проводили на віброситі СО-130У2, використовуючи сітку номерів 004 і 008 за ГОСТом 6613-86. В результаті просіювання виділено порошок фракцією 40...80 мкм, який застосовувався для отримання композиційного електродугового покриття. Застосування більш дрібнодисперсного порошку при напиленні зазвичай супроводжується покращеним заповненням покриття, що приводить до збільшення його щільності та зменшення пористості. Будова покриття стає більш однорідною. Однак на практиці мінімальний розмір часток при газотермічному напиленні повинен бути не менше 40 мкм, що обумовлено рядом причин введення порошку в розпилувач.

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

- тиск стисненого повітря, МПа – 0,4–0,6;
- відстань від зрізу сопла до оброблювальної поверхні, мм – 100–150;
- діаметр сопла, мм – 12;
- кут падіння струменя на оброблювальну поверхню, град – 60–90;
- лінійна швидкість переміщення пістолета, мм/хв – 50–400.

Обробка проводилася в декілька проходів.

Контроль якості обробленої поверхні проводився візуально. Оброблена поверхня сталевих

пластин і зразків, призначених для дослідження мікроструктури та визначення міцності зчеплення покриттів з основою відповідно, після струменево-абразивної обробки мала сірвато-матовий відтінок. Величина шорсткості обробленої поверхні складала $R_z = 38-75$ мкм.

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, який оснащений вузлом безперервної подачі порошку у високотемпературну зону дугового розряду [16]. Напилення здійснювали на сталеві пластини, виготовлені з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45 розміром $50 \times 20 \times 5$ мм і на зразки, які призначені для визначення міцності зчеплення з основою. Товщину покриттів визначали вимірами зразків до і після напилення штангенциркулем. Товщина напилених покриттів становила $1,5...2,0$ мм. Параметри технологічного режиму напилення обиралися виходячи з попередніх досліджень щодо формування композиційних керметних покриттів [17] та становили: сила струму – 120 А, напруга на дузі – 30 В, тиск стисненого повітря – 0,6 МПа, дистанція напилення – 100 мм. Порошок червоного шламу подавали у високотемпературну зону дугового розряду за рахунок атмосферної інжекції.

Результати досліджень. Загальний вид порошку червоного шламу з додаванням спиртового розчину (рис. 3 а) та результати визначення його гранулометричного складу (рис. 3 б) наведено на рис. 3.

Аналіз наведених даних показує, що частинки червоного шламу мають розмір у широкому діапазоні від 1 мкм до 1000 мкм. Найбільша кіль-

кість 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 прожарювання та ситової класифікації.

На рис. 4 представлено мікроструктуру отриманих композиційних електродугових покриттів.

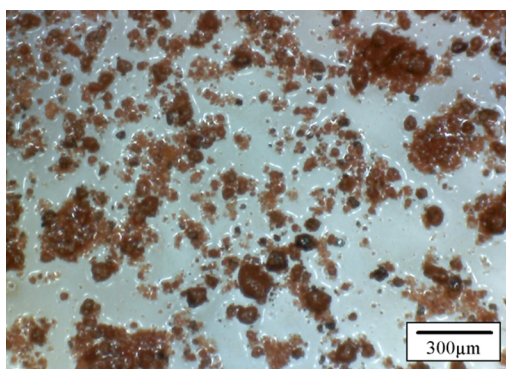
Металографічний аналіз наведених мікроструктур показав, що електродугові композиційні покриття системи дріт ER4043(Al-Si) – червоний шлам характеризуються досить низькою пористістю, яка становить близько 6%, в структурі добре диференціюються частинки темної (імовірно частинки червоного шламу) і світлої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

Ідентифікацію фаз в композиційному покритті проводили шляхом вимірювання їх мікротвердості (рис. 5).

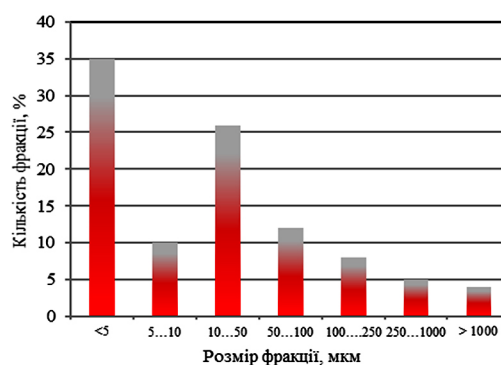
Середня мікротвердість світлої фази (сплав Al-Si) складала 526 МПа; темної 658 МПа, що відповідає мікротвердості червоного шламу [18]. Об'ємний вміст червоного шламу в отриманих покриттях склав 12,2%. У порівнянні з композиційними металокарбідними покриттями системи 65Г-TiC, отриманими на аналогічному режимі напилення у роботі [18], вміст наповнювача нижчий, що пояснюється низькою щільністю червоного шламу.

Більш легкі напилювані частинки червоного шламу виносяться на периферію високотемпературного струменя при напиленні та рідше закріплюються у сформованому покритті.

Основна увага при дослідженні експлуатаційних властивостей газотермічних покриттів приділяється міцності зчеплення їх з основою. Це, очевидно, пов'язано з тим, що при роботі покриттів



а



б

Рис. 3. Результати дослідження порошку червоного шламу: а – загальний вид порошку; б – гранулометричний склад порошку

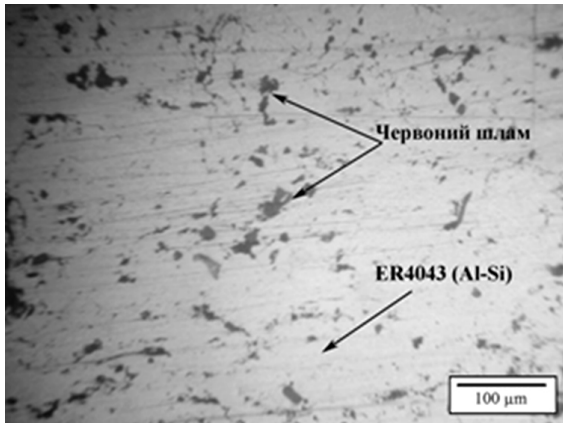


Рис. 4. Мікроструктура електродугового покриття з композиції дріт ER4043(Al-Si) – червоний шлам

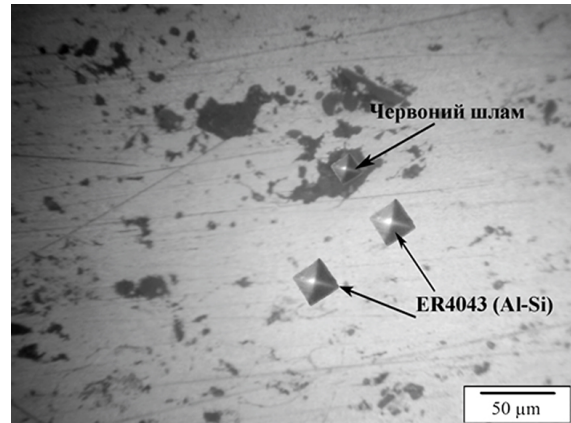


Рис. 5. Знімок відбитків індентора на різних фазах при вимірюванні їх мікротвердості

має місце їх відшарування від матеріалу основи і тому сформувався переконання, що адгезійна міцність є лімітуючим параметром. У даній роботі для визначення міцності зчеплення використовували метод «витягування конусного штифта», оскільки він дозволяє оперативно проводити випробування безпосередньо після нанесення покриттів на зразки. Їх також виготовляли з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45. Перед нанесенням покриттів на поверхню, що підлягає напиленню, її знежирювали технічним етанолом і піддавали струменево-абразивної обробки. Товщина нанесених покриттів не перевищувала 0,5...0,7 мм. Для отримання результатів міцності зчеплення покриттів з основою напилення на одному і тому ж режимі виконували в один прохід на 5 зразків одночасно. Міцність зчеплення покриттів з основою визначали на розривній машині УММ-5. Результати визначення міцності зчеплення електродугових покриттів з дроту ER4043 та з композиції дріт ER4043(Al-Si) – червоний шлам наведено на рис. 6.

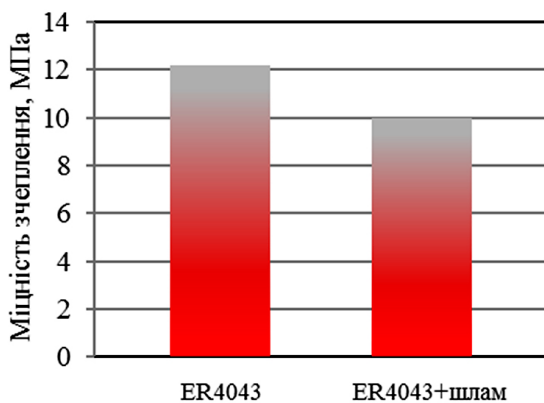


Рис. 6. Результати визначення міцності зчеплення з основою електродугових покриттів

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.

Висновки і перспективи подальших досліджень у даному напрямі. Проаналізовано основні напрямки щодо переробки та утилізації відходів виробництва алюмінію – червоного шламу, вказано на перспективу використання даного матеріалу для нанесення газотермічних покриттів, зокрема композиційних. Отримано композиційні електродугові покриття з композиції дріт ER4043 (Al-Si) – червоний шлам за рахунок використання модернізованого розпилювача EM-14M, проаналізовано їх мікроструктуру. Проведено ідентифікацію фаз шляхом визначення їх мікротвердості. Показано, що пористість композиційного покриття складає близько 6%, а кількість червоного шламу – 12,2% об. Штифтовим методом визначено міцність зчеплення зі сталеву основи ненаповнених з дроту ER4043 (12,1 МПа) та композиційних ER4043 – червоний шлам (10 МПа) покриттів. Зниження адгезійної міцності пояснюється зменшенням фактичної площі контакту покриття з основою за рахунок неповного проплавлення частинок наповнювача при напиленні. Подальші перспективи досліджень полягають у встановленні нових закономірностей і оптимізації процесу нанесення

зазначених електродугових покриттів, а також у визначенні їх зносостійкості.

ЛІТЕРАТУРА:

1. R. Zhang, S. Zheng, S. Ma, Y. Zhang, "Recovery of alumina and alkali in Bayer red mud by the formation of andradite-grossular hydrogarnet in hydrothermal proces", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 189, pp. 827–835, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.004>.

2. K. Evan, "The history, challenges and new developments in the management and use of bauxite residue", *Journal of Sustainable Metallurgy*, vol.2, pp. 316–331, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0060-x>.

3. R. Boily, "Twenty cases of red hazard, an inventory of ecological problems caused by bauxite residue from alumina production", *Conference paper in Inforex*, Larval, Quebec, Canada, 2012, pp. 58–62.

4. «Сколько опасных отходов накопил НГЗ за последние 10 лет: С 28 млн тонн красного шлама – до 43», *НукВесту*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://nikvesti.com/news/photoreportage/179475>. Дата звернення: Лютий. 7, 2020.

5. P. Zhang, X. Zhou, C. Shangguan, "Recovering iron from re mud with high gradient magnetic separator", *Applied Mechanics and Materials*, vols. 644–650, pp. 5447–5450, 2014. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.5447>

6. M. Fontana, S. Kmet, S. Jakabsky, "Treatment of red mud from alumina production by high-intensity magnetic separation", *Magnetic and Electrical Separation*, vol. 6, pp. 243–251, 1995.

7. Y. Li, H. Chen, J. Wang, "Research on red mud treatment by a circulating superconducting magnetic separator", *Environmental Technology*, vol. 35, pp. 243–249, 2014. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.865763>.

8. G. Podgorodetskii, V. Gorbunov, V. Korovushkin, et al. "Structure of the red mud from Ural Aluminum Plant after heat treatment in reducing gas", *Steel in Translation*, vol. 42, pp. 379–186, 2012. <https://doi.org/10.3103/S0967091212050105>

9. T. Chun, D. Zhu, J. Pan, et al. "Preparation of metallic iron powder from red mud by sodium salt roasting and magnetic separation", *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 53, pp. 183–189, 2014. <https://doi.org/10.1179/1879139513Y.0000000114>

10. Z. Huang, L. Cai, Y. Zhang, et al. "Reduction of iron oxides of red mud reinforced by Na₂CO₃ and CaF₂", *Journal of Central South University*, vol. 4, pp. 838–844, 2010.

11. E. Balomneno, D. Kastritis, D. Panias, et al. "The Enxal bauxite residue treatment process: industrial scale pilot plant results", Chapter in Book: *Light Metals*. TMS: 2014.

12. Д.В. Зиновеев, В.Г. Дюбанов, А.В. Шутова, М.В. Зиняева, "Рециклинг красных шламов с получением металла и специальных добавок в цемент", *Металлы*, №1, с. 22–24, 2015.

13. M. Gu, "Research progress on key technologies of comprehensive utilization of Al₂O₃ red mud", *Light Metals*, vol.4, pp.10–16, 2014.

14. 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. <https://doi.org/10.9734/ACSJ/2013/3218>

15. 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. <https://doi.org/10.4236/ns.2012.411111>

16. О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, М.М. Бобров, А.О. Мазуренко, «Пристрій для електродугового напилення композиційних покриттів», *Патент України, МПК C23C 26/02, B05B 7/22*, № 111760, 10.06.2016.

17. O.M. Dubovoy, A.A. Karpechenko, M.N. Bobrov, et al. "Electric arc spraying of cermet coatings of steel 65G-TiC system", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol.2, pp. 63–68, 2021. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/063>

18. H. Sutar, R. Murmu, D. Roy, S. Mirsha, "Plasma Sprayed Mud-Fly Ash Composite coatings on Mild Steel: A Comprehensive Outline", *Physical Science International Journal*, vol 5(1), pp. 61–73, 2015.

REFERENCES:

1. R. Zhang, S. Zheng, S. Ma, Y. Zhang, "Recovery of alumina and alkali in Bayer red mud by the formation of andradite-grossular hydrogarnet in hydrothermal proces", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 189, pp. 827–835, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.004>

2. K. Evan, "The history, challenges and new developments in the management and use of bauxite residue", *Journal of Sustainable Metallurgy*, vol. 2, pp. 316–331, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0060-x>

3. R. Boily, "Twenty cases of red hazard, an inventory of ecological problems caused by bauxite residue from alumina production", *Conference paper in Inforex*, Larval, Quebec, Canada, 2012, pp. 58–62.

4. «Сколько опасных отходов накопил НГЗ за последние 10 лет: С 28 млн тонн красного шлама – до 43», *НукВесту*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://nikvesti.com/news/photoreportage/179475>. Дата звернення: Лютий. 7, 2020.

5. P. Zhang, X. Zhou, C. Shangguan, "Recovering iron from re mud with high gradient magnetic separator", *Applied Mechanics and Mate-*

rials, vols. 644-650, pp. 5447–5450, 2014. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.5447>

6. M. Fontana, S. Kmet, S. Jakabsky, “Treatment of red mud from alumina production by high-intensity magnetic separation”, *Magnetic and Electrical Separation*, vol. 6, pp. 243–251, 1995.

7. Y. Li, H. Chen, J. Wang, “Research on red mud treatment by a circulating superconducting magnetic separator”, *Environmental Technology*, vol. 35, pp. 243–249, 2014. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.865763>

8. G. Podgorodetskii, V. Gorbunov, V. Korovushkin, et al. “Structure of the red mud from Ural Aluminum Plant after heat treatment in reducing gas”, *Steel in Translation*, vol. 42, pp. 379–186, 2012. <https://doi.org/10.3103/S0967091212050105>

9. T. Chun, D. Zhu, J. Pan, et al. “Preparation of metallic iron powder from red mud by sodium salt roasting and magnetic separation”, *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 53, pp. 183–189, 2014. <https://doi.org/10.1179/1879139513Y.0000000114>

10. Z. Huang, L. Cai, Y. Zhang, et al. “Reduction of iron oxides of red mud reinforced by Na_2CO_3 and CaF_2 ”, *Journal of Central South University*, vol. 4, pp. 838–844, 2010.

11. E. Balomnenos, D. Kastritis, D. Panias, et al. “The Enxal bauxite residue treatment process: industrial scale pilot plant results”, Chapter in Book: *Light Metals*. TMS: 2014.

12. Д.В. Зиновеев, В.Г. Дюбанов, А.В. Шутова, М.В. Зиняева, «Рециклинг красных шламов с полу-

чением металла и специальных добавок в цемент», *Металлы*, № 1, с. 22–24, 2015.

13. M. Gu, “Research progress on key technologies of comprehensive utilization of Al_2O_3 red mud”, *Light Metals*, vol. 4, pp. 10–16, 2014.

14. 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. <https://doi.org/10.9734/ACSJ/2013/3218>

15. 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. <https://doi.org/10.4236/ns.2012.411111>

16. О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, М.М. Бобров, А.О. Мазуренко, «Пристрій для електродугового напилення композиційних покриттів», *Патент України, МПК C23C 26/02, B05B 7/22*, № 111760, 10.06.2016.

17. О.М. Dubovoy, A.A. Karpechenko, M.N. Bobrov, et al. “Electric arc spraying of cermet coatings of steel 65G-TiC system”, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol.2, pp. 63–68, 2021. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/063>

18. H. Sutar, R. Murmu, D. Roy, S. Mirsha, “Plasma Sprayed Mud-Fly Ash Composite coatings on Mild Steel: A Comprehensive Outline”, *Physical Science International Journal*, vol 5(1), pp. 61–73, 2015.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2022