

УДК 621.793

Роман Кідун¹; Микола Пасько²; Ганна Лаптева², к.т.н.; Олег Биковський³, д.т.н., проф.

¹ ЗСУ, 1 інженерно-саперне відділення інженерно саперного взводу військової частини А7280, Україна

² Національний університет «Запорізька політехніка», Україна

³ Запорізький національний університет, Україна

НАНЕСЕННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОДІВ РУДНОТЕРМІЧНИХ ПЕЧЕЙ

Анотація. Графітовані електроди знаходять своє широке застосування в галузях промисловості зі складними технологічними процесами, пов'язаними з підвищеними температурами. Найчастіше їх використовують при виплавці сталей, спеціальних сплавів, феросплавів, керамік з використанням руднотермічних, сталеплавильних, рафінувальних та інших електродугових печей. Сутність даної роботи полягає в пропозиції способу нанесення захисного покриття для графітованого електроду технологією плазмового напилення струмоведучим дротом. Аналіз його роботи при впливі високотемпературної корозії, здатності стримувати окислення та розрахунок економічного ефекту від застосування обраної технології.

Ключові слова: плазмове напилення, покриття, розрахунок, міцність зчеплення.

Roman Kidun; Mykola Pasko; Hanna Laptieva, Ph.D.; Oleg Bykovskiy, Ph.D., Prof.

APPLICATION OF PROTECTIVE COATINGS TO INCREASE THE SERVICE LIFE OF ELECTRODES OF ORE THERMAL FURNACES

Abstract. Graphite electrodes are widely used in industries with complex technological processes associated with elevated temperatures. They are most often used in the smelting of steels, special alloys, ferroalloys, and ceramics using ore-thermal, steel-smelting, refining, and other electric arc furnaces. The essence of this work is to propose a method of applying a protective coating for a graphite electrode using the technology of plasma sputtering with a current-carrying wire. Analysis of its operation under the influence of high-temperature corrosion, the ability to restrain oxidation and calculation of the economic effect of the application of the selected technology.

Key words: plasma spraying, coating, calculation, bond strength.

У сучасних дугових сталеплавильних печах (ДСП), а також в руднотермічних печах (РТП) для виготовлення електрокорунду використовують графітові електроди різних марок в залежності від матеріалу сировини. Основною перевагою їх є менший питомий опір, що дозволяє застосовувати електроди меншого діаметра порівняно з вугільними та самоспеченими, що полегшує конструкцію стійок, кареток електродотримачів і зменшує електричні втрати в електродах.

При цьому використовують як суцільні, так і трубчасті електроди, які працюють в зоні від струмопідводу до колосника в інтервалі температур від 500° С до 2000° С, та від 2000° С до ≈ 4000° С в просторі печі[1].

В процесі експлуатації можливі механічні (обвал шихти) та термічні (перевищення струмових навантажень) руйнування. Більш суттєвим є бічне зношування, обумовлене окисленням поверхні електроду при високій температурі, яке становить 55-75 % для звичайних ДСП та 40 % для надпотужних [2]. Це пов'язано не тільки з окисленням вуглецю, а й втратою зв'язуючого, внаслідок чого радіус пор і їх кількість (пористість електроду обумовлена специфікою отримання виробу), при

нагріванні збільшується, що призводить до втрати маси з бічної поверхні, тому що в першу чергу до окислення більш схильний кам'яновугільний пек, як зв'язуючий компонент (рис.1) [3].

Тому для запобігання окислювальних процесів треба наносити на бічну поверхню захисне покриття, яке перешкоджатиме взаємодії кисню з графітом шляхом закупорювання пор і проникненню кисню в глиб електроду .

Оптимальним способом нанесення захисного покриття є плазмове напилення струмоведучим дротом марки АК-5 [4]. Використання алюмінію у захисному покритті обумовлено утворенням оксидів, які мають високу температуру плавлення $\approx 2050^\circ\text{C}$ і температуру дисоціації $\approx 3500^\circ\text{C}$. Останній показник наближений до температури випаровування графіту $\approx 3400^\circ\text{C}$. Важливою властивістю оксиду алюмінію Al_2O_3 є висока щільність оксидної плівки і корозійна стійкість аж до температури сублимації графіту. Добавка кремнію знижує поверхневий натяг і в'язкість в алюмінієвому сплаві, що сприяє його розтіканню при нанесенні на поверхню графіту.

Для оцінки розподілу температури в проміжку від електродотримача до колосника та її впливу на захисне покриття був проведений розрахунок в пакеті програмного забезпечення ANSYS WORKBENCH. Так як основним джерелом нагріву електроду є джоулево тепло, то для аналізу було обрано два розрахункові модулі: Electric та Transient Thermal.

При певних граничних умовах для електрода діаметром 300 мм і довжиною 1200 мм при силі струму 2000 А протягом 1 години температура електрода біля електродотримача становить 541°C , а на торці сягає 4000°C . Ці дані приводять до висновку, що захисне покриття потрібне на всій довжині електроду.

Для дослідження поведінки захисного покриття на графітову пластину марки ЕГ товщиною 7 мм, шириною 18 мм, довжиною 150 мм було нанесено плазмове покриття марки АК-5 товщиною 0,4 мм з одного боку. Цю пластину використовували як зварювальний електрод, на постійному струмі прямої полярності при $I_{зв} = 450\text{-}500\text{ А}$, $U_d = 38\text{-}40\text{ В}$ протягом 5 с.

Теоретичний розрахунок розподілу температурних полів показав наближені до наведених в роботі [1] результати.

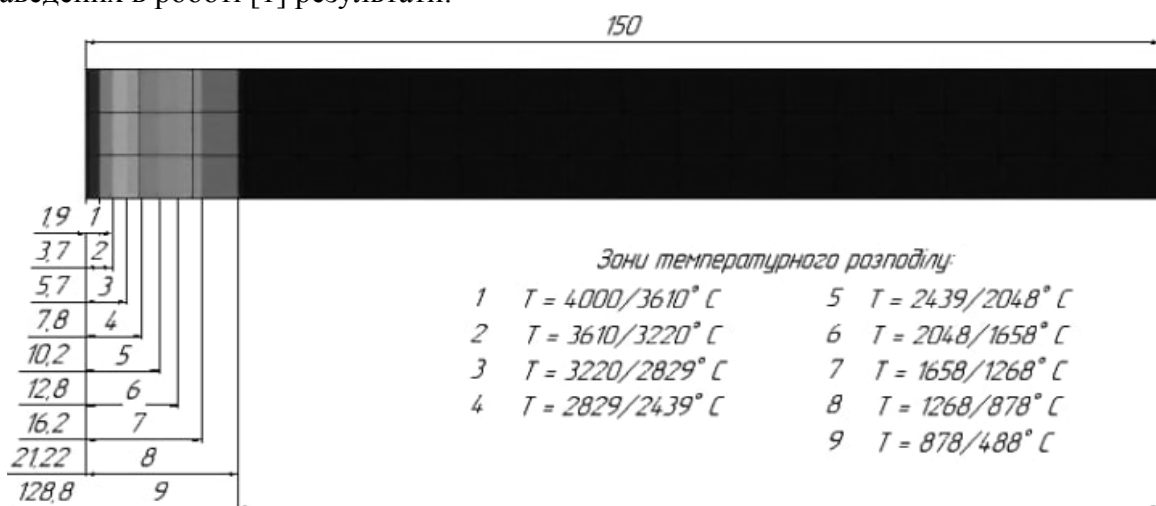


Рисунок 2 – Розподіл температур на графітовій пластині

Після зварювання пластина з обох сторін набула наступний вигляд (рис. 3).

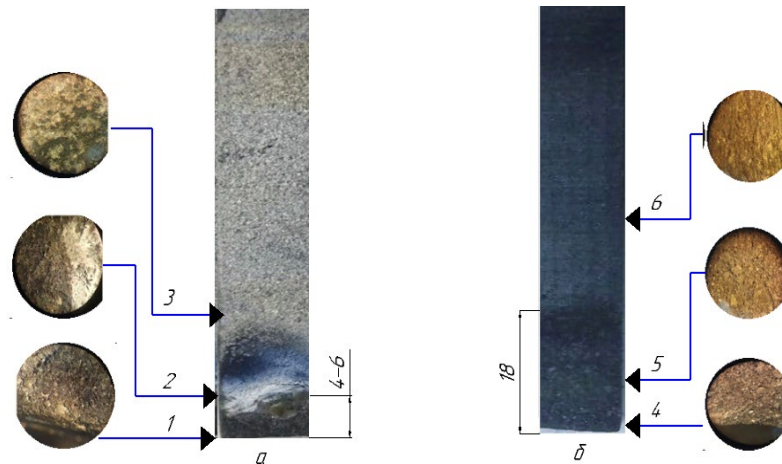


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд графітової пластини після зварювання а – з боку покриття; б – зі зворотнього боку

В зоні 1 (рис. 3) спостерігається вигорання на ділянці 4-6 мм, в той час як із зворотного боку (зона 4-5) окислення розповсюджується на довжину 18 мм. Зона 2 характеризується наявністю фази $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ – високотемпературного оксиду алюмінію з температурою переходу – 1400°C . В перехідній зоні 2-3 спостерігається перетворення $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($1200^\circ - 500^\circ\text{C}$). В зоні 2-3 має місце перехід $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Al}$. Зона 4 схожа із зоною 1, в зоні 5 спостерігаються більш відкрита пористість порівняно з 6 зоною, в якій температура не досягла критичних значень для графітового електрода.

З'єднання напиленого шару покриття залежить від температури нагріву електрода (рис.4)

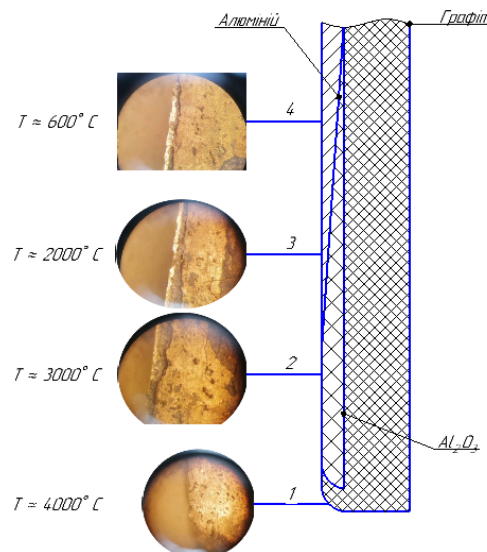


Рисунок 4 – Структура з'єднання покриття-графіт, x50

На самому торці електрода (1) покриття відсутнє, в той час як в зоні 1-2 по мірі віддалення від місця теплового вкладення покриття лишається, але міцність його зчеплення з графітом слабшає (зона 1-2). Дане явище обумовлене різними коефіцієнтами лінійного теплового розширення. Так у графіта та оксида алюмінію вони дорівнюють $8 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, а в чистого алюмінія $22 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, внаслідок чого при нагріванні електрода покриття збільшилося в розмірі і відшарувалося. При структурному переході з алюмінію в Al_2O_3 (зона 3-4 рис. 4), щільність збільшується.

В температурному інтервалі від 2050° до 3500° С спостерігається просочення рідкого розплаву Al_2O_3 в графіт. Кращому просоченню сприяє збільшення середнього радіусу пори та загальної пористості. Відбувається підвищення шорсткості поверхні графіту, що сприяє розтіканню краплі оксиду алюмінію, як по поверхні (1), так і вглиб (2), рис. 5. Так при шорсткості поверхні 8 Rz крайовий кут змочування складає 134°, а при збільшенні цього показника до 13,5 Rz крайовий кут зменшився до 114°.

Завдяки капілярному просочуванню збільшується площа взаємодії розплаву покриття з графітом і міцність зчеплення.

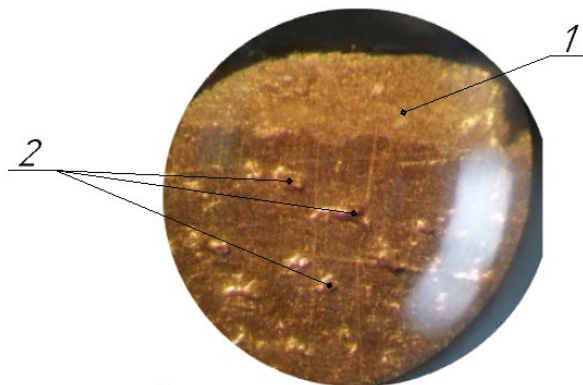


Рисунок 5 - Капілярне просочування графіту при плазмовому напиленні дротом АК-5, x50.

Для нанесення захисного покриття використовувався метод плазмового напилення струмоведучим дротом. Даний спосіб являється оптимальним серед газотермічних способів формування покриттів. До переваг слід віднести більший к.к.д., кращу міцність зчеплення та економічність. Напилення проводилось за наступними параметрами: I_n – 170 А; U_d – 65 В; d_e – 1,2 мм; Q_{Ar} – 30 л/хв; $Q_{повітря}$ – 16,5 м³/год; a – 100 мм, де a – відстань від електроду до напилюваної поверхні; кількість нанесених шарів - 3.

Після нанесення кожного шару виконувалася пошарова зачистка металевою швидко обертовою щіткою поверхні напиленого шару для збільшення когезійної міцності.

Перелік посилань

1. Храпко С. А. Производство стали в ДСП: конспект лекций /С. А. Храпко, Е.Л. Корзун, Ю.В. Костецкий. – Донецкий Национальный Технический Университет – 136 с.
2. Бажин В. Ю. Управление тепловыми и электрохимическими процессами в дуговых печах / В. Ю. Бажин, С. А. Мартынов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 5. – С. 34-37
3. Одейчук А. Н. Моделирование окисления графита в среде кислорода при температурах 400-800о С / А. Н. Одейчук, А. И. Комир // Физика твердого конденсированного тела. – 2015. – Т.12. – №2. – С. 532-542.