



УДК 669.187.25

П.А. Салиханов, С.В. Невежин, Д.В. Туманов,
А.Л. Кузьминов, В.П. Виноградов, А.В. Цуркан
ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет»
г. Череповец, Россия
E-mail: alkuzminov@chsu.ru
Дата поступления 22.11.2023

СНИЖЕНИЕ РАСХОДА ГРАФИТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ УСТАНОВКИ ПЕЧЬ-КОВШ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗАЩИТНЫХ МЕТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация

Приводятся результаты исследования по снижению расхода графитированных электродов установки печь-ковш (УПК) ПАО «Северсталь» с использованием экспериментальных защитных металлизационных покрытий. Для защиты поверхности электрода методом дуговой металлизации на него было нанесено покрытие из материала СвАК5 и проволоки М1. При проведении испытаний на установке печь-ковш показатель снижения расхода графитированных электродов составил 8%, что не соответствовало техническим требованиям и выявило необходимость дальнейшего повышения эффективности процесса металлизации. Совместно с компанией ООО «ВВСТ» (г. Москва) были проведены испытания покрытий из различных металлов. На электроды наносились четыре разных вида покрытия. По итогам проведенных экспериментальных исследований выявлено, что наиболее эффективным является применение двуслойного покрытия электрода из меди и железа. Такое покрытие обеспечило снижение пористости и газопроницаемости электрода. Это привело к замедлению окисления и снижению расхода графитированного электрода в условиях высокотемпературной газовой коррозии. Промышленное применение электродов с данным покрытием подтвердило снижение удельного расхода электродов на 21 – 23 %.

Ключевые слова: установка печь-ковш, графитированный электрод, расход, электрическая дуга, боковая поверхность, температура, окисление, покрытие, металлизация, медь, алюминий, железо.

Введение

Известно, что основными факторами, определяющими расход электродов в процессе их эксплуатации, являются: окисление боковой и торцевой поверхности; растрескивание рабочих концов электродных свечей и опадания огарков, эрозии графитовых частиц; поломки из-за высоких механических, тепловых и токовых нагрузок [1-3]. С целью снижения расхода электродов в промышленных условиях проводятся исследования по модификации их поверхности различными покрытиями.

Одним из способов снижения расхода электродов, является нанесение на боковую поверхность жаростойкого покрытия для защиты от окисления при высоких температурах [4].

Основные требования к покрытию на графите: высокая адгезия, электропроводность, высокая стойкость против окисления, низкая пористость, невысокая себестоимость производства.

Известен способ нанесения покрытия специальным составом в пропиточных камерах [5].

В работах [4,6] отмечено, что покрытия на основе алюминия снижают удельный расход электродов на 10-12%, на основе ферросилиция марки ФС-45 на 20%. В источнике [6] предложено двухслойное покрытие, первый слой – алюминий, второй – железо с последующей обработкой электрода плазменной горелкой. Из исследований [7], направленных на решение проблемы защиты от окисления электрода, в составе защитного покрытия известны ва-

рианты применения оксида алюминия, диоксида кремния, силикомарганца. Все компоненты были в мелкодисперсном состоянии и в виде суспензии в «жидком стекле». Составы наносили на поверхность электрода с последующей сушкой.

В данной работе, в качестве метода нанесения защитных покрытий для снижения окисления и расхода графитированных электродов, работающих в условиях высокотемпературной газовой коррозии, выбрана дуговая металлизация. При дуговой металлизации две проволоки плавятся электрической дугой, горящей между ними, после чего расплавленный материал в виде капель ускоряется сжатым воздухом в направлении обрабатываемой детали и формирует защитное покрытие.

Выбор дуговой металлизации для нанесения защитных покрытий обусловлен простотой реализации, высокой производительностью, а также низкой стоимостью проволочных материалов для нанесения покрытий в сравнении с плазменным напылением и другими методами нанесения порошков, при сопоставимом уровне качества покрытий для защиты от коррозии.

Основная часть

Эксперименты по нанесению защитного покрытия на графитированные электроды были проведены в условиях цеха ремонта прокатного оборудования на ПАО «Северсталь». Для проведения исследований выбирали электроды диаметром 400 мм в общем количестве шесть штук. Перед нанесением покрытия произвели подготовку поверхности. Электроды просушивали в камере и подогрели до температуры 60-70°C. Защиту мест электродов, не подлежащих металлизации, осуществляли путем укрытия кошмой или нанесения огнестойкой пастой, препятствующей попаданию расплавленных частиц. Также выполняли пескоструйную обработку поверхности графитированных электродов для придания им шероховатости и обеспечения прочности сцепления наносимого покрытия с графитом.

Электрод устанавливали на устройство для передачи вращению электрода. Скорость вращения выставляли

до 20 об/мин в зависимости от диаметра электрода. При нанесении двухслойного защитного покрытия для первого слоя устанавливали давление сжатого воздуха 0,45 МПа. Ток дуги при металлизации фиксировали на уровне 200-210 А. Металлизатор устанавливали по нормали от образующей электрода с дистанцией напыления 100-150 мм. Скорость перемещения металлизатора относительно поверхности электрода выбирали таким образом, чтобы обеспечить перекрытие полос «спирали» покрытия при вращении электрода и одновременном перемещении металлизатора вдоль оси электрода.

Напыление первого слоя защитного покрытия осуществляли материалом СвАК5 (Al-94,7%; Si-5%; Fe+Zn+Mn-0,3%). Толщина покрытия составляла от 0,4 до 0,5 мм. Контроль толщины осуществлялся толщиномером.

Для защиты от повреждения медных электрододержателей использовали проволоку М1 с содержанием меди 99,9%. Произвели нанесение второго слоя, при этом увеличив давление сжатого воздуха до 0,5 МПа. Время между нанесением обоих слоев металлизации не превышало 1 часа, чтобы избежать окисления поверхности и уменьшения прочности сцепления наносимого покрытия с графитом. Толщина второго слоя составила 0,2-0,3 мм.

После нанесения второго защитного слоя, произвели нанесение на поверхность электродов тонкого слоя свечной массы (парафина) с дальнейшим оплавлением металлизированной поверхности ацетиленокислородной горелкой в течение 2-3 минут. Данная операция предназначалась для снижения пористости поверхности электрода. Снижение температур, после каждой операции было плавным, путем выдержки электрода в камере металлизации в течение 2 часов, рисунок 1.

Оценка эффективности производилась путем установки на УПК параллельно с обычным электродом, электрода с металлизацией поверхности. Так как объем выборки был значительным, то снижение расхода считалось по разнице установленных вставок, по зависимостям (1) и (2):

Оценка эффективности производилась путем установки на УПК параллельно с обычным электродом, электрода с металлизацией поверхности. Так как объем выборки был значительным, то снижение расхода считалось по разнице установленных вставок, по зависимостям (1,2)

$$Q = \frac{Q_{\text{удел}} - Q_{\text{пр.удел}}^{\text{п}}}{Q_{\text{удел}}} \times 100, \quad (1)$$

где, Q- снижение расхода электродов (%); $Q_{\text{удел}}$ – удельный расход электродов без покрытия (кг/т. стали); $Q_{\text{пр.удел}}^{\text{п}}$ – приведенный удельный расход электродов с покрытием (кг/т. стали)

$$Q_{\text{пр.удел}}^{\text{п}} = Q_{\text{удел}}^{\text{п}} \times \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{н}}^{\text{п}}} \times \frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{н}}^{\text{п}}}, \quad (2)$$

где, $Q_{\text{удел}}^{\text{п}}$ - удельный расход электродов с покрытием (кг/т. стали); $t_{\text{н}}$ и $t_{\text{н}}^{\text{п}}$ – время нагрева стали электродами без покрытия и

с покрытием, соответственно (мин/т. стали); $I_{\text{н}}$ и $I_{\text{н}}^{\text{п}}$ – средний ток по фазам электродов без покрытия и с покрытием, соответственно (кА).

При проведении испытаний на УПК показатель снижения расхода графитированных электродов составил 8%.

При металлизации, коническая поверхность электрода сместилась внутрь печного пространства на 400 мм, а угол образующей конуса стал меньше. Кроме того, у электродов с покрытием отсутствовала видимая ступенька на границе контакта электрода с крышкой. Визуально зафиксированные сравнительные результаты применения металлизации электрода представлены на рисунке 2.

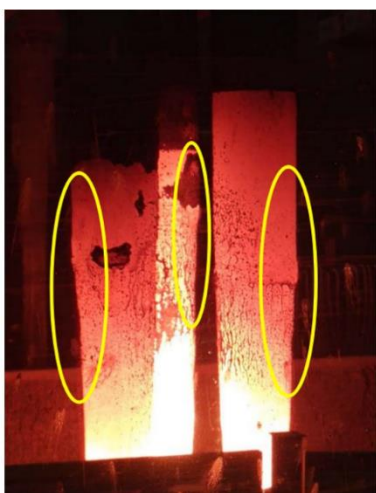


а

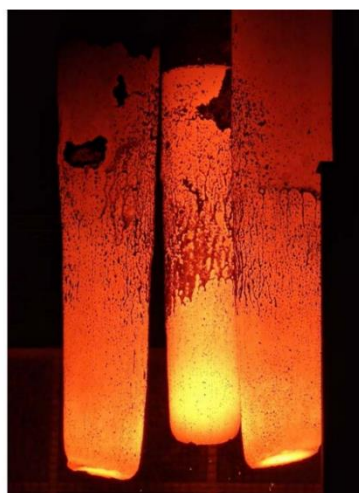


б

Рисунок 1. Нанесение на поверхность электрода:
а – первый слой покрытия, б – второй слой и свечная масса



а



б

Рисунок 2. Окисление боковой поверхности электрода:
а – без покрытия, б – с покрытием

Однако, в описанном случае применения технологии металлизации, значение снижения расхода (около 20%), было ниже ожидаемого по сравнению с аналогичными инновациями на других предприятиях [4-7], а себестоимость двухслойной металлизации – высока и составляет до 10% от стоимости электродов. Также в качестве отрицательного фактора, стоит отметить появление следов коррозии на контактных щечках электрододержателя.

Было принято решение о продолжении исследований с привлечением компании ООО «ВВСТ» (г.Москва). Испытания проводились в четыре этапа с использованием различных технологий и материалов покрытий электродов. При этом в эксперименте участвовали одновременно все три электрода УПК. Для обеспечения идентичности проводимых опытов, все эксперименты выполнялись согласно одной технологической карте.

На первом этапе наносили покрытие на основе алюминия. Масса электродов составляла 14 т. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) сети была без перекосов. При анализе полученных результатов применения данной технологии отслоение покрытия не обнаружено. В процессе эксплуатации электродов отмечены локальные нагревы контактных медных щек электрододержателей УПК, что привело к внеплановой остановке по причине повреждения контактной щетки и течи воды, рисунок 3. Возможной причиной явились пленочные образования окислов алюминия на поверхности щек в результате электрохимической реакции меди и алюминия в зоне контакта с электродом. В связи с тем, что окислы являются диэлектриком, возникло дополнительное электросопротивление, вызвавшее локальный перегрев, а затем и нарушение герметичности.

На следующем этапе наносилось покрытие на основе железа. Масса электродов в данном эксперименте составляла 2,5 т. Обеспечивалась ВАХ сети без перекосов. Как и в предыдущем случае, по завершении опытных плавок отслоение покрытия не обнаружено. При этом дефекты контактных щек не проявлялись. При аналогичных

условиях, соответствующих предыдущему опытному исследованию, на электрод наносилось покрытие на основе меди. Масса электродов 2,5 т. ВАХ сети без перекосов. Однако, в процессе использования данной технологии отмечено отслоение защитной поверхности.



Рисунок 3. «Прогар» электрододержателя

На завершающем этапе промышленных экспериментов на электрод наносили двухслойное медно-железное покрытие, причем первым слоем являлась медь, а вторым железо. Масса электродов в этом опыте составляла 4 т. При анализе результатов опытного использования защитного покрытия в этом варианте отслоение покрытия и дефектов контактных щек не обнаружено.

Данные удельного расхода электродов и режимов плавок сведены в таблицу 1.

Однослойные покрытия из железа и меди из-за малой толщины, которая составляет до 0,6 мм, обладали высокой пористостью и газопроницаемостью, что обуславливало их низкую жаростойкость из-за интенсивного внутреннего окисления при высоких температурах, связанного с активной диффузией кислорода сквозь поры покрытий вплоть до защищаемой основы - графита электрода.

Удельный расход электродов в зависимости от материала покрытия

№ этапа	Электроды	Материал покрытия	Удельный расход электродов	Длительность нагрева	Ток фаза А	Ток фаза В	Ток фаза С	Средний ток по 3 фазам	Приведенный удельный расход электродов	Сокращение удельного расхода
			кг/т. стали	мин/т. стали	КА	КА	КА	КА	кг/т. стали	%
I	с покрытием	алюминий	0,117	0,0405	49,11	47,96	45,7	47,59	0,129	11,4
	без покрытия		0,146	0,0448	49,03	48,02	45,63	47,56		
II	с покрытием	железо	0,113	0,0398	48,04	48,3	46,41	47,58	0,130	11,9
	без покрытия		0,148	0,044	49,41	51,64	47,92	49,66		
III	с покрытием	медь	0,115	0,0401	49,81	50,8	47,3	49,30	0,130	13,9
	без покрытия		0,151	0,045	50,01	51,04	48	49,68		
IV	с покрытием	двухслойное медь+ железо	0,102	0,0394	46,52	47,33	44,7	46,18	0,109	27,3

В то же время, увеличение толщины однослойных покрытий свыше 0,6 мм приводило к уменьшению прочности их сцепления и растрескиванию вследствие увеличения уровня остаточных напряжений в слое металла, что также негативно сказывалось на их жаростойкости.

Для двухслойного покрытия медь-железо удалось обеспечить общую толщину до 1,6 мм, что, по-видимому, обусловлено меньшим уровнем возникающих термических напряжений, приводящих к образованию трещин при использовании меди в качестве первого слоя.

Первый слой защиты, нанесенный из меди, обеспечивает более высокую прочность сцепления покрытия с основой. Это происходит за счет высокой пластичности указанного металла и заполнения расплавом пор на поверхности графитированного электрода. Увеличение толщины защитного покрытия обеспечило снижение его пористости и газопроницаемости, благодаря чему было достигнуто большее снижение окисления и расхода графитированного электрода с защитным металлизационным покрытием в условиях высокотемпературной газовой коррозии.

Заключение

Для снижения окисления и расхода графитированных электродов, работающих в условиях высокотемпературной газовой

коррозии, в качестве метода нанесения защитных покрытий предложена дуговая металлизация.

Результат применения металлизированных электродов на установке печь-ковш ПАО «Северсталь» показал, что наиболее эффективным является применение двухслойного медно-железного покрытия. Опытное-промышленное применение данных электродов в период 2022-2023 г. подтвердило снижение удельного их расхода на 21 – 23 %.

Библиографический список

1. Окорочков Н.В. Дуговые электросталеплавильные печи. М.: Металлургия, 1971. С 332-345.
2. Эффективность использования испарительного охлаждения для снижения расхода графитированных электродов в дуговых печах малой емкости / И. М. Ячиков, И. В. Портнова, М. В. Быстров, А. А. Утемисова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 67-77. – DOI 10.14529/met220107
3. Апалькова Г.Д., Просвирина И.И., Рошин В.Е., Галян В.С., Вдовин С.Е. // Металлургия. 2002. № 10. С. 146– 148.
4. Carbon e.g. graphite electrode for arc furnace - comprises 2nd coating of high melting electroconductive material or mixt. on

- 1st aluminium layer, for steel mfr. // Патент Германии №4136823. 1991. / Adrian Bojilov, Anguel Zaprianov, Penio Penev, Velio Velev
5. Коновалова Е.А., Емяшев А.В., Костарева Т.В. и др. Защита графитированных электродов на основе ферросилиция. Тез. докл. V Всесоюзн. научн.-техн. конф. Электродной пром-ти. Челябинск. 1983.С.302-303.
 6. Вавилова А.Т., Коновалова Е.А., Юзихов Ю.Д., Половой Б.В. Эффективность применения защиты от окисления графитированных электродов. Сб.

- научн. тр. «Формирование свойств электродного графита». Москва. 1991.С.74-77.
7. Дыскина, Б. Ш. Оптимизация состава защитного покрытия от высокотемпературного окисления графитированных электродов / Б. Ш. Дыскина, В. С. Лесюк, Т. В. Кабанова // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58, № 7. – С. 53-55.

Information about the paper in English

**P.A. Salikhanov, S.V. Nevezhin, D.V. Tumanov,
A.L. Kuzminov, V.P. Vinogradov, A.V. Tsurkan**
Cherepovets State University
Cherepovets, Russia
E-mail: alkuzminov@chsu.ru
Receipt date: November 22, 2023

**REDUCING THE CONSUMPTION OF GRAPHITE ELECTRODES IN A LADLE FURNACE INSTALLATION
USING EXPERIMENTAL PROTECTIVE METALLIZATION COATINGS**

Abstract

The results of a study on reducing the consumption of graphite electrodes in the ladle furnace installation of PJSC «Severstal» using experimental protective metallization coatings are presented. To protect the surface of the electrode using arc metallization, a coating of SvAK5 material and M1 wire was applied to it. When testing on a ladle furnace installation, the reduction in consumption of graphite electrodes was 8%, which did not meet the technical requirements and revealed the need to further improve the efficiency of the metallization process. Together with the company VVST LLC (Moscow), tests of coatings made of various metals were carried out. Four different types of coating were applied to the electrodes. Based on the results of experimental studies, it was determined that the most effective is the use of a two-layer electrode coating made of copper and iron. This coating reduced the porosity and gas permeability of the electrode. It provided a slowdown in oxidation and a decrease in the consumption of the graphite electrode under conditions of high-temperature gas corrosion. The industrial use of electrodes with this coating has confirmed a reduction in the specific consumption of electrodes by 21–23%.

Keywords: ladle furnace installation, graphite electrode, electric arc, side surface, temperature, oxidation, coating, metallization, copper, aluminum, iron.
