



УДК 669.187.25

Д.В. Туманов, А.Л. Кузьминов,  
А.В. Цуркан, В.П. Виноградов, П.А. Салиханов  
ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет»  
г. Череповец, Россия  
E-mail: alkuzminov@chsu.ru  
Дата поступления 17.10.2023

## ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ГРАФИТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ МЕТОДОМ ВОДО-ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

### Аннотация

Выполнен анализ работы установки «печь-ковш» ПАО «Северсталь» (УПК), в части возможности повышения стойкости графитированных электродов. С этой целью исследовано распределения температур на поверхности графитированного электрода и её влияние на изменение его структуры. На основе результатов исследований проведена модернизация оборудования на УПК, которая направлена на снижение расхода электродов, и в конечном итоге - уменьшение себестоимости продукции. В процессе опытно - промышленной реализации мероприятий по совершенствованию оборудования были опробованы несколько конструкций систем испарительного охлаждения. Выявлена зависимость температуры поверхности электрода в пределах контакта с крышкой от суммарного расхода воды. Максимальный эффект увеличения стойкости графитированного электрода в 6% наблюдается при расходе воды в составе водо-воздушной смеси в диапазоне от 4 до 5 м<sup>3</sup>/час./электрод.

**Ключевые слова:** установка «печь-ковш» (УПК), графитированный электрод, электрическая дуга, крышка установки, боковая поверхность, температура, окисление, охлаждение, расход воды.

### Введение

Анализ затрат на производство стали в рамках технологического передела на установке «печь-ковш» ПАО «Северсталь» (УПК), показал основные статьи расходов: материалы на десульфурацию, легирование, модифицирование стали (32%), электроэнергия (28%), и графитированные электроды (23%).

В статье рассматриваются конструктивные мероприятия по модернизации оборудования на УПК, направленные на снижение расхода графитированных электродов, и в конечном итоге на снижение себестоимости продукции.

### Основная часть

Основное количество тепла, определяющее весь технологический режим плавки, выделяется в печи электрическими дугами [1]. При преобразовании электрической энергии в тепловую в дугах сталеплавильной печи присутствуют все три фактора, вызывающие интенсивное излучение

дуг: высокие значения плотности тока; горение дуги в парах металлов; электромагнитные явления при протекании переменного тока. По данным [2] в печной дуге только 10-15% мощности выделяется в приэлектродных областях, а 85-90% электрической мощности преобразуется в столбе дуги в поток излучения. Дуга излучает тепло в жидкий металл и шлак, но из-за всех видов теплоотдачи, присутствующих при данном процессе, тепло переносится также на поверхности футеровки и водоохлаждаемых панелей, стен и свода, и сам электрод.

Распределение температур по средам, граничащим с электродом: электрическая дуга (4000°C), металл (1560°C), шлак (1500°C), печные газы под крышкой (1300°C), газы над крышкой (700°C), представлено на рисунке 1.

Эрозия торца электрода за счет испарения графита в зоне горения дуги (4000°C) из-за сублимации и абсорбции графита и его растворения в жидком шлаке, происходит только в зоне анодного пятна. Это зона

самого интенсивного угара электрода. Наиболее активный процесс окисления электрода происходит при температурах от зоны контакта со шлаком (1560-1500°C) вплоть до температуры над крышкой (600-750°C).

Расход электродов с боковой поверхности в результате окисления зависит от их общей площади, подверженной воздействию печных газов, температуры, химического состава и скорости передвижения газов относительно электрода. Этот процесс сопровождается потерей прочности графита. При окислении относительно крупнозернистых графитов можно визуально наблюдать выгорание кокса, связующего и дальнейшее осыпание зерен наполнителя. Преимущественное выгорание связующего может быть объяснено, как более высокой его реакционной способностью, так и большей пористостью. То есть, при температурах 600-1500°C, происходит изменение структуры электрода по всему его объёму,

а не только на его поверхности. При температурах 400-650°C окислению подвержена только поверхность электрода.

Крышка печь-ковша имеет небольшой радиальный зазор, в который из-за разности давлений, устремляются печные газы. Из-за небольшой площади кольцевой канавки, в этом же месте скорость потока возрастает, происходит контакт электрода с воздухом. Эти два фактора приводят к локальному увеличению температуры электрода. Визуально оценить боковое окисление можно из-за конической формы электрода с характерной «ступенькой» на уровне высоты крышки, как это показано рисунке 2.

Выше по электроду процесс значительно замедляется, и в районе электрододержателя при температуре до 400°C окисление отсутствует.

Автор работы [1], предлагает зависимость убыли массы электрода  $V(t)$  от температуры  $(t)$  контактной среды, которая представлена на рисунке 3.

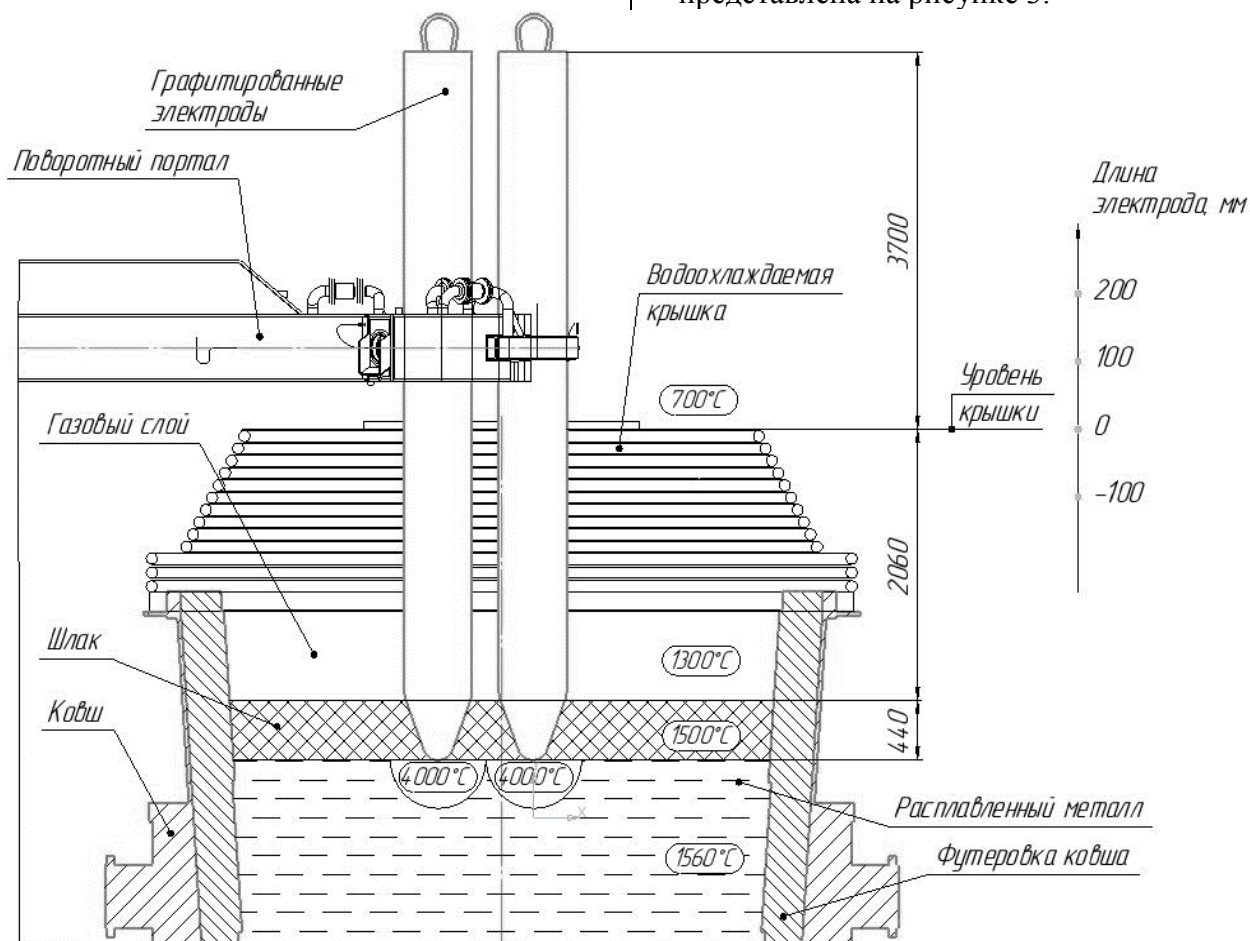


Рисунок 1. Распределение температуры по средам, граничащим с электродом



Граница электрода с  
крышкой «после» и  
«до» наращивания

Рисунок 2. «Ступенька» на границе контакта электрода с крышкой УПК

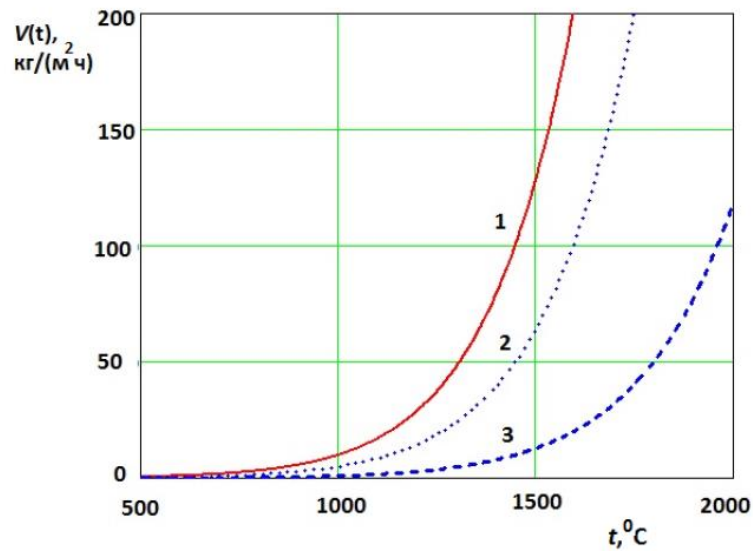


Рисунок 3. Зависимость убыли массы с поверхности графитированного электрода за счет термического износа от температуры при разной термической стойкости материала [1]

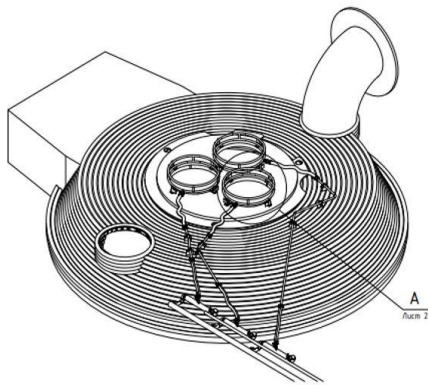


Рисунок 4. Опытно-промышленная установка испарительного охлаждения

Одним из путей снижения температуры электрода и экранирования его от окисления является использование системы испарительного охлаждения, позволяющей осуществлять подачу воды орошением на боковую поверхность цилиндрического электрода [3-6].

Измеренная пирометром, температура электрода показала, что зона с температурой в  $600^{\circ}\text{C}$  начинается в 200-300 мм от верха крышки, поэтому опробование системы испарительного охлаждения было произведено непосредственно на крышке УПК.

Спроектированная опытно - промышленная установка, конструкция которой показана на рисунке 4, состоит из трубы, сформированной в виде тора, к которой подключен вводной патрубков, и также конструктивно оформленной в виде тора трубы диаметром 42 мм, в который врезаны четыре форсунки, обеспечивающие конусный угол раскрытия струи охладителя. Между верхним и нижним торами установлены четыре переключки диаметром 10 мм. Нижний тор выступает ресивером, а переключки - дросселями. Такая конструкция позволяет получить равномерный расход воды в каждой из форсунок при одиночном подводе охладителя. Общий расход воды регулируется вентилем на входе.

Опыт использования опытно-промышленной установки выявил ряд негативных моментов: четыре точки недостаточны для равномерного охлаждения электрода, при увеличении расхода воды образуются её излишки, которые стекают по поверхности электрода под крышку, на выходном отверстии форсунки образуется накипь, требующая периодического удаления.

Стойкость электродов оценивалась путем нахождения остаточного теоретического веса по результатам оценки линейных размеров электродов, с охлаждением и без него, после каждой плавки. Значимого увеличения стойкости графитированного электрода, превышающей статистическую погрешность в ходе эксперимента, получено не было.

В ходе разработки более эффективного варианта испарительного охлаждения, рассмотрели возможность применения инжекционной форсунки. Преимуществом ее использования является существенное увеличение диспергирования распыления воды, сопровождающееся, кроме того, большим факелом раскрытия. Это обеспечивает более равномерную и большую теплоотдачу электрода, минимизирует процесс формирования накипи и снижает вероятность попадания воды под крышку установки «печь-ковш».

В разработанной конструкции инжекционной форсунки воздух с давлением 0,3-0,5 МПа подается через вентиль регулировки расхода на штуцер форсунки. При прохождении камеры смешения воздуха и воды, из-за перепада диаметров, возникает разрежение в канале подвода воды, которая через соответствующий штуцер, поступает из бака. Вода в баке находится под атмосферным давлением. Регулировка соотношения вода-воздух осуществляется в узле регулировки, путем изменения площади проходного сечения воздушного канала. Таким образом, вода поступает в форсунку не под избыточным давлением, а забирается основной средой – воздухом, в необходимом количестве.

В результате формируется мелкодисперсная взвесь воды в сжатом воздухе, что является эффективным средством для охлаждения боковой поверхности электрода. Угол раскрытия струи формируется углом внутреннего конического отверстия форсунки.

Спроектированная установка, представлена на рисунке 5. Она состоит из двух сформированных в виде торов труб диаметром 40 мм, причем в нижнюю трубу подается вода, в верхнюю – воздух. Воздух подавался от верхнего коллектора металлургавами на два ряда форсунок, общим их количеством шестнадцать штук. Расстояние между рядами форсунок составляло 115 мм. С учетом угла раскрытия струи вертикальный охлаждаемый участок электрода составляет ориентировочно 200 мм. Увеличенная площадь охлаждения и снижение вероятности попадания распыляемой воды

под крышку достигается тем, что форсунки направлены вверх под углом  $20^\circ$  от горизонтальной плоскости.

Регулирование расхода воды, согласно данным источников [7], для печи сопоставимой мощности, рекомендуется производить в диапазоне в диапазоне 1-5 м<sup>3</sup>/час на электрод.

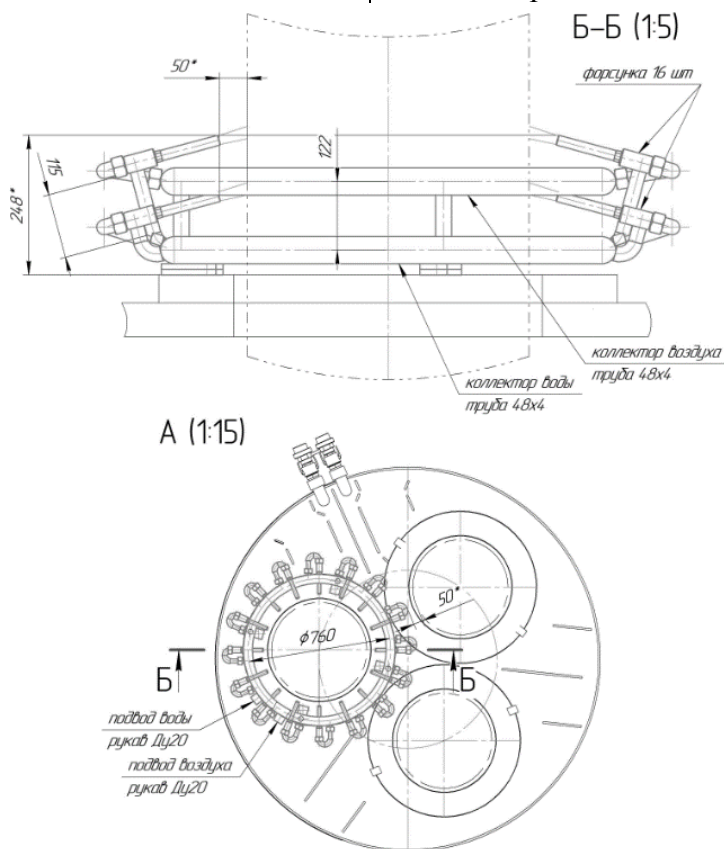


Рисунок 5. Установка водо-воздушного охлаждения электрода

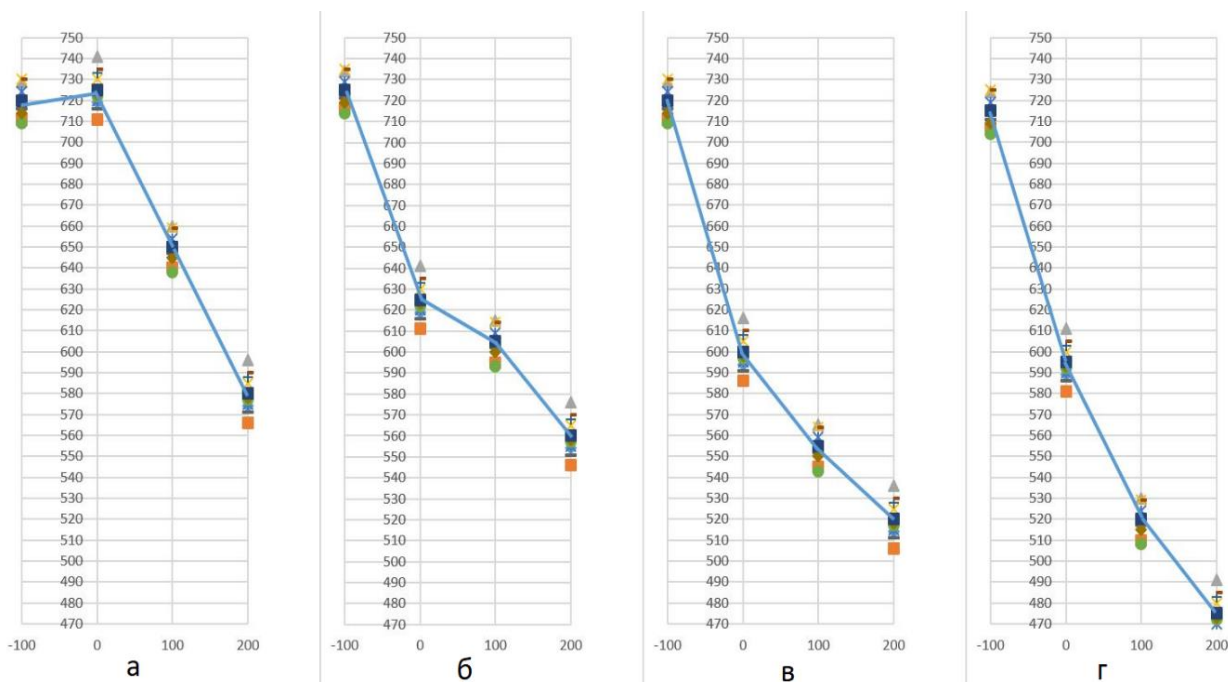


Рисунок 6. Поле температур поверхности электрода и среднесуточная температура

При опытно-промышленной апробации технологии и оборудования охлаждения по разработанному варианту производили на одном электроде из трех. Это позволило визуально оценить результаты эксплуатации установки водо-воздушного охлаждения. Исследование процесса охлаждения производилось на 10 плавках каждые сутки с различными расходами воды, подаваемой на электрод. Суммарный расход воды на электрод менялся также ежедневно в количестве: первые сутки - без подачи воды, вторые сутки –  $1,5 \text{ м}^3/\text{час}$ ; третьи сутки –  $3 \text{ м}^3/\text{час}$ ; четвертые сутки –  $4,5 \text{ м}^3/\text{час}$ . По окончании плавки отключалась вода. Выдвигалась площадка обслуживания установки печь-ковш, электрод поднимался до совпадения ступеньки на элект-

троде (высота контакта с крышкой) с нулевым делением линейки, закрепленной на площадке. Замеры производились по следующей схеме: ниже ступеньки на 100 мм – первый замер (температура электрода под крышкой), в месте ступеньки (на высоте крышки) – второй замер, 100 мм над крышкой – третий замер, 200 мм над крышкой – четвертый замер. Привязка точек замера по длине электрода может быть определена по рисунку 1, а результаты измерений представлены на рисунке 6 (а,б,в,г).

Замеры производились пирометром FLUKE 572-2 с погрешностью измерения  $\pm 0,5\%$

На рисунке 7 представлены значения средних температур в точках измерения при разных расходах воды (б,в,г) и без подачи воды (а).

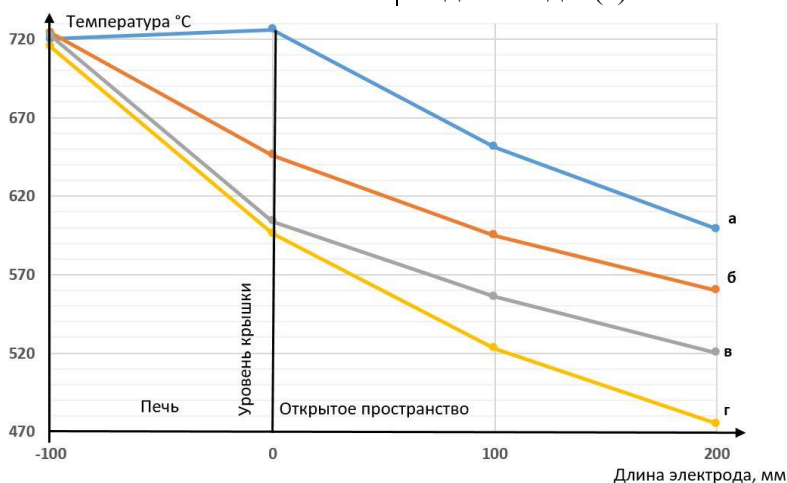


Рисунок 7. Средняя температура поверхности электрода без водо-воздушного охлаждения (а), с расходом воды  $1,5, 3, 4,5 \text{ м}^3/\text{час}$  (б, в, г)

Из представленных данных следует, что:

- температура электрода эффективно снижается на границе с крышкой (зафиксировано уменьшение на  $\Delta = 130^\circ\text{C}$ ). Максимальное снижение температуры наблюдается до расхода воды  $3 \text{ м}^3/\text{час}$ , далее процесс замедляется. После суток работы с охлаждением, по визуальной оценке, «ступенька» на границе контакта электрода с крышкой УПК (рисунок 2), становится менее выраженной;
- снижение температуры над крышкой ( $\Delta = 120\text{-}130^\circ\text{C}$ ) происходит во

всем диапазоне расхода воды, причём зависимость температуры от расхода обратно пропорционально последнему. Граничная температура начала процесса окисления  $500^\circ\text{C}$  достигается в 150 мм над крышкой при расходе  $4,5 \text{ м}^3/\text{час}$ . Дальнейшее увеличение расхода воды может привести к ее попаданию в пространство ковша, что недопустимо из соображений безопасности.

- водо-воздушное охлаждение не оказывает влияние на температуру электрода под крышкой.

По результатам предварительных испытаний оборудования было принято решение продолжить эксплуатацию опытно-промышленной установки с максимально допустимым расходом 4,5 м<sup>3</sup>/час в течение 20 суток.

Итоговым результатом опытно-промышленного использования описанной системы охлаждения является ориентировочное увеличение стойкости графитированных электродов в 6 %, которое рассчитывалось из количества сменных вставок, установленных на обычный электрод и электрод с охлаждением.

### Заключение

Применение водо-воздушного охлаждения привело к увеличению стойкости графитированных электродов на УПК ПАО «Северсталь». Максимальный эффект увеличения стойкости в 6 % наблюдается при расходе воды в составе водо-воздушной смеси в диапазоне от 4 до 5 м<sup>3</sup>/ час на электрод. Наиболее эффективным является охлаждение области контакта электрода с крышкой и выше.

### Библиографический список

1. Ячиков И.М., Портнова И.В., Быстров М.В., Утемисова А.А.. Эффективность использования испарительного охла-

ждения для снижения расхода графитированных электродов в дуговых печах малой емкости. Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия», 2022. С 67-77.

2. Огороков Н.В. Дуговые электросталеплавильные печи. М.: Metallurgia, 1971. С 332-345
3. Макаров А.Н. Теория теплообмена излучением в дуговых печах для плавки стали. Автореферат. Санкт –Петербург, 1994. С 16-18
4. В.А.Маточкин, Д.Н. Андрианов, В.Н. Прохоренко, А.А. Козлов, С.А. Лукашевич. Совершенствование охлаждения графитированных электродов. Вестник БНТУ. 2001. С 47-52.
5. Лопухов Г.А. Эффективные технологии электросталеплавильного производства. М., Электрометаллургия 2000. №7.. С100-101.
6. Грудницкий О.М., Исхаков Р.А., Коробов В.К. Пути снижения удельного расхода графитизированных электродов на электросталеплавильных печах. Литье и металлургия. 2011. №1. С 35-37.
7. Ячиков И.М., Портнова И.В., Быстров М.В. Моделирование теплового состояния графитированных электродов при испарительном охлаждении. Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия», 2018. С 203-207.

---

### *Information about the paper in English*

**D.V. Tumanov, A.L. Kuzminov, A.V. Tsurkan,  
V.P. Vinogradov, P.A. Salikhanov**  
Cherepovets State University  
Cherepovets, Russia  
E-mail: alkuzminov@chsu.ru  
Receipt date: October 17, 2023

### INCREASING THE DURABILITY OF GRAPHITE ELECTRODES USING WATER-AIR COOLING OF THE SURFACE

#### Abstract

On the basis of the analysis of the operation of the ladle furnace of PJSC "Severstal" (LFI), namely: temperature distribution on the surface of graphitized electrode and its impact on the change of the electrode structure, constructive measures for modernization of the equipment at UFL are carried out. The measures are focused at reducing the consumption of electrodes and, ultimately, reducing the cost of production. Several designs of evaporative cooling systems were tested in the process. The dependence of the electrode surface temperature within the contact with the cover on the total water consumption was revealed. The maximum effect of 6 % increase of graphitized electrode resistance is observed at water flow rate in the composition of water-air mixture in the range from 4 to 5 m<sup>3</sup>/hour on electrode.

**Keywords:** ladle furnace installation (LFI), graphite electrode, electric arc, installation cover, side surface, temperature, oxidation, cooling, water consumption.

---