

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГРАФИТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ

Аннотация. Графитированные электроды (ГЭ) являются расходуемым материалом в электродуговой плавке. Их расход в структуре себестоимости стали в некоторых случаях достигает 30%, поэтому его снижение является актуальной задачей. Доказано, что основными статьями расхода ГЭ считается окисление его боковой поверхности под воздействием температуры и термомеханическое разрушение и износ, то есть расход материала электрода существенно зависит от его теплового состояния. Существуют разные способы решения данной проблемы. Наиболее перспективный с точки зрения затрат на изготовление и технологии использования для отечественных металлургических и литейных предприятий является способ испарительного охлаждения (ИО) боковой поверхности ГЭ. Целью работы является обзор различных конструкций и определение практических рекомендаций для применения и изготовления систем испарительного охлаждения ГЭ. Проведен патентный поиск существующих систем ИО. На основе литературного обзора рассмотрены различные варианты их конструкций. Впервые проведены опытные работы на руднотермической печи вместимостью 100 т. Установлено, что использование ИО приводит к снижению температуры и окислению боковой поверхности ГЭ. Расход электродов сокращается в среднем на 15%. Эффективность ИО зависит от конструкции кольца охлаждения и технологических параметров системы, таких как расход воды и время включения ее подачи. Даны рекомендации по изготовлению и использованию систем испарительного охлаждения. В результате изучения различных источников определено, что в РФ данная технология используется только на дуговых печах зарубежного производства (Danieli, Fuchs) вместимостью более 80 т, т.к. там она поставляется вместе с печью. В России нет ни одного предприятия, разрабатывающего и внедряющего такие системы. Для предприятий, которые имеют в своем составе дуговые печи разной вместимости, рациональное использование ИО электродов позволит сократить удельные расходы на производство стали, а для предприятий-производителей этих печей повысить уровень оснащенности, автоматизации и, в конечном счете, продаж.

Ключевые слова: дуговая печь, графитированные электроды, испарительное охлаждение, оросительное охлаждение, расход графитированных электродов, моделирование теплового состояния, кольцо испарительного охлаждения

Введение

Электродуговая плавка металлов и сплавов невозможна без применения графитированных электродов (ГЭ). Они служат для передачи тока в рабочее пространство печи, являются дорогостоящим расходным материалом. В себестоимости стали в некоторых случаях их доля достигает 30% [1]. Высокая стоимость связана в первую очередь с технологией изготовления, которая включает долгий (более 100 ч) и энергоемкий процесс графитизации ($\approx 4,3$ МВт·ч/т) [2]. Также крупные металлургические предприятия часто применяют ГЭ зарубежного производства, что в современных экономических условиях существенно увеличивает их стоимость.

Основная часть расхода приходится на окисление (37,8%) и термомеханическое разрушение и износ (35%), что говорит о том, что тепловое воздействие вносит существенный вклад в их потребление [3]. Все это приводит к необходимости поиска решений, позволяющих сократить температуру поверхности ГЭ, экранировать его от окисления и, как следствие, снизить материальные затраты на производство металлов и сплавов в дуговых печах.

Анализом причин расхода ГЭ и возможных способов его снижения, а также применением полых ГЭ занимались и занимаются многие ученые ведущих российских и зарубежных научных школ: Агапитов Е.Б., Калмыков В.А., Кабанова Т.В., Маслов Д.В.,

Грудницкий О.М., Бойков Д.В., Губарева В.И., Козырев Н.А., Давыдович Б.И., Ячиков И.М., Кузнецов Д.М., Zhang De-ming, Schwabe W.E., Jaccard L. R., Rafiei R., Gorlani C. и др.

Наиболее распространенным в литературе способом является нанесение покрытий, которые снижают окисление ГЭ, однако он влечет за собой высокие затраты на материалы и технологичное нанесение, что во многом снижает экономический эффект от его применения. В 1912 году были запатентованы комбинированные электроды. Верхняя часть металлическая, а наконечник графитированный. Недостаток комбинированного электрода с водяным охлаждением заключается в том, что нет защиты от короткого замыкания дуги, возникающей между ломом и металлическими электродами. Это приводит к образованию отверстий в металлическом электроде, через которые вода уходит на расплавленный металл. Таким образом, этот метод, имеющий риск возникновения серьезных аварий, оказался невостребованным. В дальнейшем разработанный способ был снабжен электродами длиной около 4–5 м, изолированными высокотемпературным керамическим материалом, верхние части которого также охлаждаются водой. Активная часть между металлической частью и дугой выполнена из графита. В результате не стало проблем с коротким замыканием, пока электрическая и теплоизоляционная керамика выдерживает коррозию, возникающую от воздействия шлака. Но через короткое время после использования охлажденный шлак образует толстые слои на охлажденном керамическом изоляционном материале

и может вызывать коррозию и повреждения. При этом чрезвычайно высок риск того, что целые участки изоляции упадут, и свободная металлическая поверхность может вызвать короткое замыкание.

Одним из перспективных путей снижения расхода электродов является технология испарительного охлаждения водой их боковой поверхности. Эта технология с научной точки зрения остается малоизученной, а также практически не используется в РФ на металлургических и литейных предприятиях среди дуговых печей разной вместимости (от 0,5 – 200 т).

Материалы и методы исследования

Существует несколько патентов, связанных с изобретением различных систем ИО. Рассмотрим некоторые из них. Опыт разработки конструкции систем принудительного охлаждения ГЭ берет свое начало с 1989 года [4]. Изобретение относится к охлаждающему устройству для ГЭ дуговой печи, в котором сопла распыляют воду и охлаждают поверхности ГЭ выше свода печи, тем самым предотвращая их окисление. Устройство ИО служит для поддержания температуры ГЭ ниже 600°C путем охлаждения их наружных поверхностей вне печи. Поток воды регулируется таким образом, что вода, стекающая вниз по ГЭ, испаряется перед входом в отверстие свода для обеспечения максимальной экономии графита и высокого уровня безопасности (рис. 1). Конструкция включает распылительные кольца, выполненные из нержавеющей стали в незакрытой круглой форме для предотвращения индукционного нагрева. На внутреннем их диаметре сделаны сопла. Каждое из этих колец прикреплено к нижней части электрододержателя. Количество, размер и взаимное расстояние сопел зависят от температурного профиля ГЭ. Расход воды колеблется от 1,4 до 5 м³/ч. Давление воды от 1,5 до 3,5 кг/см² на входе в систему водяного охлаждающего устройства печи [4].

Операция распыления включается и выключается автоматически с помощью концевых выключателей, реагирующих на движение ГЭ вверх и вниз. Охлаждающая жидкость распыляется из форсунок 1 на поверхности ГЭ 2 над сводом печи 3, влага испаря-

ется и ГЭ за счет этого охлаждаются. Когда ГЭ 2 над сводом печи 3 охлаждаются, ГЭ 2 внутри печи охлаждаются тоже.

В рамках патента [4] были проведены опытные работы на двух дуговых печах различной вместимости. На печи вместимостью 90 т по стали, диаметром корпуса 5800 мм, трансформатором 45/54 МВА и диаметром ГЭ 20 дюймов (508 мм) снижение расхода ГЭ составило 0,4 кг/т. Снижение расхода футеровки свода 0,05 кг/т. Для печи вместимостью 190 т по стали, диаметром корпуса 8000 мм, трансформатором 70/82 МВА и диаметром ГЭ 24 дюйма (610 мм) снижение расхода ГЭ составило 0,3 кг/т. Снижение расхода футеровки свода 0,19 кг/т.

Авторами Тарасовым В.К., Резниковым О.Л., Корченковым Ю.И. и др. в 1992 году в РФ опубликовано изобретение, относящиеся к оросительному охлаждению водой ГЭ [5]. Предлагаемое устройство для охлаждения электрода (рис. 2) содержит кольцевую трубу орошения 1, закрепленную через шарнирное соединение 2 под головкой электрододержателя кронштейном 3. К кольцевой трубе орошения 1 посредством металлического рукава 4, трубопровода 5, разъемного фланцевого соединения 6 подсоединен напорный золотник (регулятор давления) 7, соединенный с другой стороны, как с напорной, так и со сливной магистралями. Принцип действия данного устройства следующий. После включения печи по напорной магистрали в напорный золотник 7 подается под давлением жидкость. Напорный золотник настраивается на давление, обеспечивающее необходимый расход.

Для печи ДСП-100, например, расход жидкости составит 0,450 м³/ч на один электрод при давлении 4,5 атм. При перемещении электрода вверх-вниз давление в системе регулируется напорным золотником 7 и переливом части жидкости в сливную магистраль, и благодаря этому остается постоянным. При установке электрода в печь, в случае упора его в кольцевую трубу орошения, последняя благодаря шарнирному соединению наклоняется, пропуская электрод.

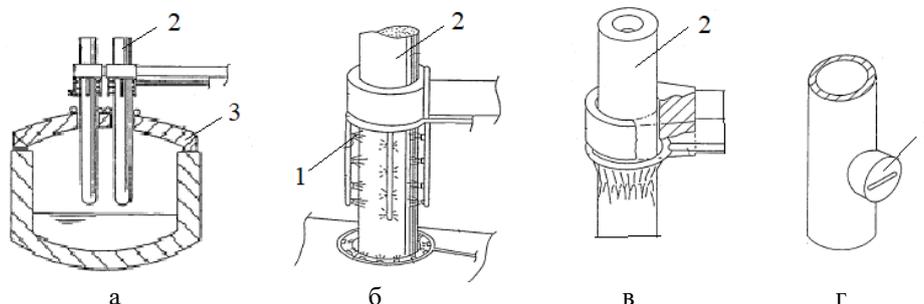


Рис. 1. Виды типичных вариантов исполнения изобретения:

а – общий вид; б – увеличенный вид основной части устройства; в – облегченный вариант устройства; г – увеличенный вид сопла устройства

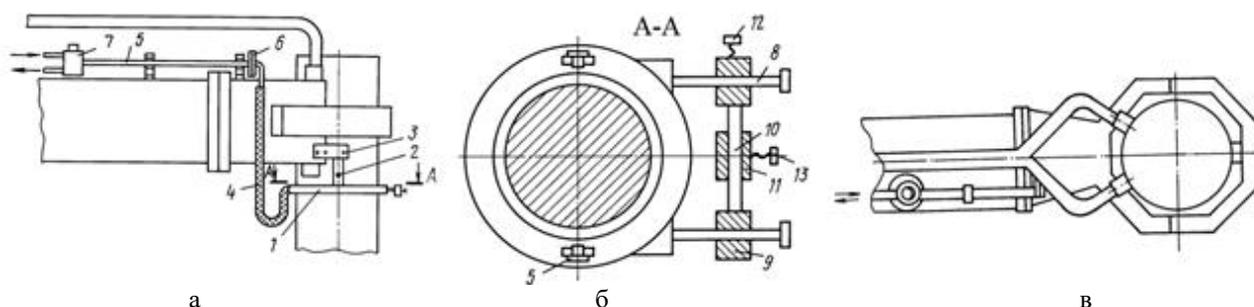


Рис. 2. Устройство оросительного охлаждения:
а – общий вид; б – сечение А-А; в – вид сверху

В горизонтальное положение кольцевая труба орошения возвращается при помощи системы уравновешивания, состоящей из траверсы, перемещающейся в ползунах по стойкам, и груза, подвижно расположенного на траверсе. Таким образом, предложенное в [5] техническое решение обеспечивает по сравнению с известными устройствами [4] следующие преимущества: сохраняется постоянный расход жидкости независимо от положения электрода, что обеспечивает эффективное его охлаждение. Исключаются поломки устройства при установке электрода.

В 1998 году в Германии было предложено к использованию изобретение [6] (рис. 3). В отличие от предыдущих устройств, оно состоит из металлической рубашки в виде трубы из немагнитной нержавеющей стали 5, расположенной вокруг электрода вдоль всей его поверхности. Основной его функцией, помимо охлаждения ГЭ, является поглощение радиальных механических нагрузок, что снизит риски поломок ГЭ. Вся конструкция крепится несколько ниже электродержателя 3. Вода и воздух подаются через отверстия 1 и 2, образуя газозводную смесь, которая охлаждает электрод. Зазор между трубой и ГЭ 20–30 мм. Предпочтительно, чтобы нижняя часть зазора, образованного между рубашкой и электродом, обращенным к натяжному устройству, была газонепроницаема.

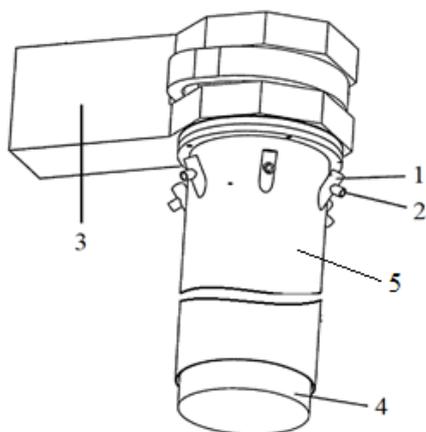


Рис. 3. Устройство оросительного охлаждения

Количество подаваемой воды подбирается таким образом, чтобы она полностью испарялась в кольцевом зазоре кожуха 5, не попадая внутрь печи. В нижнем конце выходит только пар или паровоздушная смесь. При диаметре ГЭ 700 мм и длине 6–10 м расход подаваемой воды ≈ 15 л/мин ($0,9$ м³/ч). Водяной пар, выходящий из кольцевого зазора с высокой скоростью, направлен в осевом направлении вниз к свободному торцу электрода с определенной скоростью, и обволакивает свободный конец электрода, не прикрытый обсадной трубой 5. Этот свободный конец электрода также охлаждается, и его окисление снижается за счет изоляции от кислорода воздуха и других окислительных компонентов. Еще одним эффектом струи пара, направленной в сторону дуги, является разворот горячих газов, термически поднимающихся из области дуги. Они возвращаются в лом для плавления и нагрева, что повышает общий тепловой КПД печи. Следует отметить, что при высоких температурах, преобладающих в области расплава, пар экзотермически реагирует со сталью, обеспечивая тем самым дополнительное количество энергии для плавления. Тем не менее данное изобретение фактически не имеет промышленного применения, так как предлагаемую конструкцию сложно обслуживать в процессе работы печи.

В 1999 году в Германии было предложено устройство испарительного охлаждения [7] (рис. 4). Устройство имеет две полукруглые трубки 1, 2 из нержавеющей стали диаметром от 500 до 1000 мм каждая, только с одним входным отверстием 3, 4 и скрепленными болтом 5, и от 10 до 20 полноконических трубок. Данное изобретение решает задачу излишнего разбрызгивания воды при соприкосновении с ГЭ. Это достигается за счет того, что сопла 6 диаметром от 1 до 5 мм, расположенные поочередно на верхней или нижней стороне трубок или, при необходимости, либо на верхней, либо на нижней стороне трубок. Вода стекает равномерно по поверхности и обеспечивает необходимое охлаждение. Неочищенная вода под давлением от 2 до 10 бар подается на оба входа и распыляется на ГЭ 9 из сопел, направленных к оси электрода. Первоначальные испытания этой разработки показали, что электрод, нагретый до 500°С, может быть охлажден примерно до 80°С.

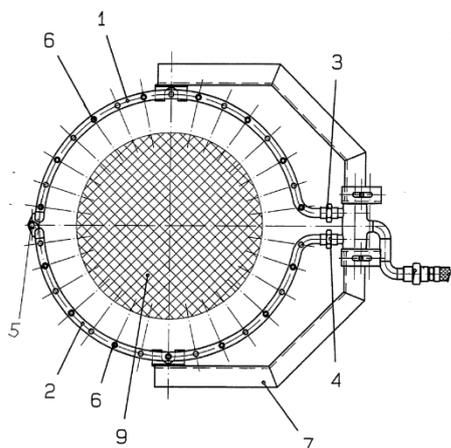


Рис. 4. Устройство оросительного охлаждения

На рис. 5 представлено следующее устройство ИО, описываемое патентом [8]. Изобретение позволяет улучшить распылительное действие сопел, а также действует как защитный тепловой экран для электрододержателя, и благодаря этому может существенно повысить срок его службы.

Чтобы обеспечить возможность монтажа устройства охлаждения на электроде, кольцевая деталь 1 устройства охлаждения выполнена разъемной. Подвод воды к кольцевой детали 1 осуществляется через трубопроводы 2 и 3. В стенке 10 расположены сопловые отверстия 6 и 7, через которые происходит разбрызгивание на поверхность электрода 5 охлаждающей воды.

щей воды, которая находится под избыточным давлением во внутреннем пространстве устройства охлаждения 1. В отверстие 6 под углом выходит отверстие 7, отходящее от канала 8 сжатого воздуха, который приварен к внутреннему периметру стенки 10 возле ряда распылительных отверстий 6. Этот канал соединен не показанным здесь образом с трубопроводом 3 подачи сжатого воздуха (рис. 5, а), который электрически изолирующим образом подсоединен к устройству 1 охлаждения. Подвод сжатого воздуха к распылительным соплам 6 способствует распределению охлаждающей воды и образованию раздробленных (распыленных газом) струй. В этом случае поверхность электрода 5 лучше смачивается и, соответственно, повышается охлаждающий эффект.

На рис. 5, б можно видеть, что нижняя стенка 9 по внутреннему периметру кольцевой детали 1 устройства охлаждения сильнее выступает внутрь за стенку 10. Благодаря этому устья сопловых отверстий 6 и 7 гораздо лучше экранированы снизу и защищены от брызг, которые могут привести к их закупорке.

Далее, в 2004 году, в Белоруссии, зарегистрировали патент [9] на устройство для охлаждения ГЭ, содержащее трубопровод и кольцевой коллектор для подачи охлаждающей воды (рис. 6). Отличается тем, что дополнительно содержит трубопровод и кольцевой коллектор для подачи воздуха оригинальной конструкции. Воздух создает защитный поток для удержания струи воды.

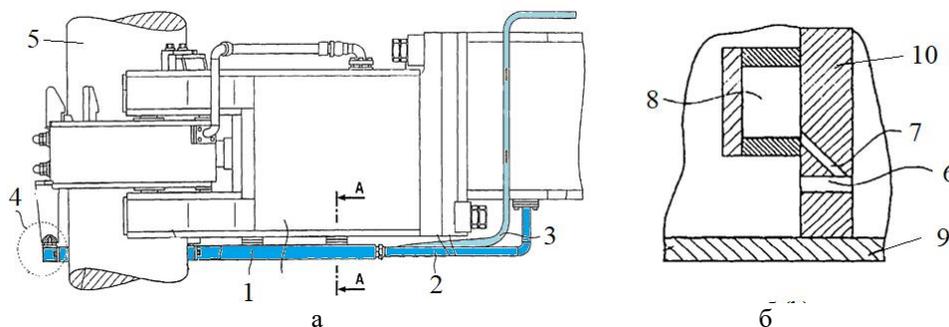


Рис. 5. Устройство оросительного охлаждения:

а – вид сбоку электрододержателя с устройством охлаждения; б – конструкция сопла

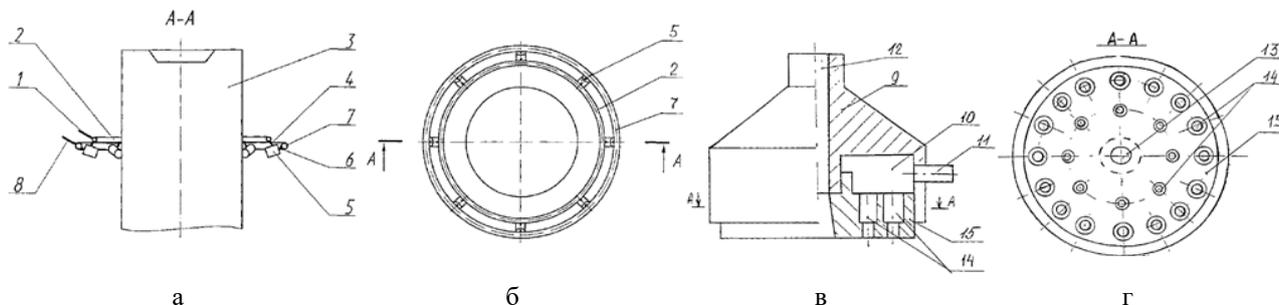


Рис. 6. Устройство оросительного охлаждения:

а – общий вид; б – вид сверху; в – общий вид форсунки; г – разрез форсунки

Устройство содержит кольцевые коллекторы: 2 – для распределения воздуха и 7 – для подачи охлаждающей воды и форсунки 5 для охлаждения графитированного электрода 3. А также включает трубопроводы: 1 – для подачи воздуха к распределительному коллектору и 8 – для подачи охлаждающей воды в коллектор, патрубки: соединительные 6 – для подачи воды на форсунки и 4 – для подачи воздуха на форсунки. Форсунка для подачи охлаждающей воды в воздушном круговом защитном потоке (рис. 6, в) содержит корпус 9, камеру распределения воздуха 10, штуцер для подвода воздуха 11, канал для подачи охлаждающей воды 12, отверстие для подачи воды на графитированный электрод 13, отверстия для подачи воздуха 14, сопло форсунки 15.

Устройство для охлаждения графитированных электродов дуговой сталеплавильной печи опробовано на Республиканском унитарном предприятии «Белорусский металлургический завод» в сталеплавильном цехе. Работает следующим образом: вода поступает из системы охлаждения элементов печи по трубопроводу 8, попадает в коллектор 7, с которого по патрубкам 6 непосредственно направляется к форсункам 5. С форсунок 5 вода поступает на охлаждение электродов через отверстие в форсунке 13. Воздух поступает из общей системы снабжения цеха по трубопроводу 1 к коллектору 2, а затем через соединительный патрубок 11 воздух выходит и образует кольцо (ореол), которое защищает струю воды от разбрызгивания, оттолкнувшись от графитированного электрода.

Струя воды, взятая в воздушное кольцо, обеспечивает всему объему воды возможность испариться на электродах, не попадая на футеровку малого свода и в печь на металл, а главное, защитить от исходящих газов и мелкодисперсной пыли водяное сопло. Изготавливается устройство из цветных металлов, бронзы БрЖ-9 и нержавеющей стали. Трубы для подвода воды и воздуха изготавливаются из нержавеющей стали, чтобы исключить отложение солей, окиси и закиси железа.

В 2006 году данное устройство для охлаждения графитированных электродов было усовершенствовано [9]. Устройство [10] представлено на рис. 7 и отличается от [9] тем, что кольцевой коллектор для распределения воздуха расположен внутри кольцевого коллектора для подачи воды, а форсунки приварены к внутренней стороне коллектора для подачи воды, соплом наружу, со стороны, обращенной к охлаждаемому электроду. Может быть использовано в среде с инертным газом. Задача, решаемая полезной моделью, состоит в создании конструкции устройства для более эффективного охлаждения ГЭ и обеспечении воздушной защиты водяной струи, выходящей из форсунки, от разбрызгивания и воздушного коллектора от действия высоких температур.

Вода поступает из системы охлаждения элементов печи по трубопроводу 3, попадает в кольцевой коллектор для подачи воды 1, из которого по каналу для подачи охлаждающей воды 8 форсунки 6 вода поступает на охлаждение электрода 5. Вода кольцевого коллектора для подачи воды охлаждает кольцевой коллектор для распределения воздуха. Воздух поступает из общей системы снабжения цеха по трубопроводу 2 к кольцевому коллектору для распределения воздуха 4, а затем через соединительный патрубок 7 (рис. 7, б) воздух поступает на форсунку 6. Через каналы подачи воздуха 10 форсунки 6 воздух выходит и образует кольцо (ореол), которое и защищает струю воды от разбрызгивания ее по сторонам при отталкивании от графитированного электрода. Струя воды, взятая в воздушное кольцо, обеспечивает всему объему воды возможность испариться на электродах, не попадая на футеровку малого свода и в печь на металл, а главное, позволяет защитить от исходящих газов и мелкодисперсной пыли водяное сопло.

Использование данного устройства позволяет обеспечить эффективное охлаждение графитированных электродов, снизить расход электроэнергии, раскислителей, легирующих и расход электродов на 10–15%, увеличить стойкость малого свода и срок службы медных держателей электродов.

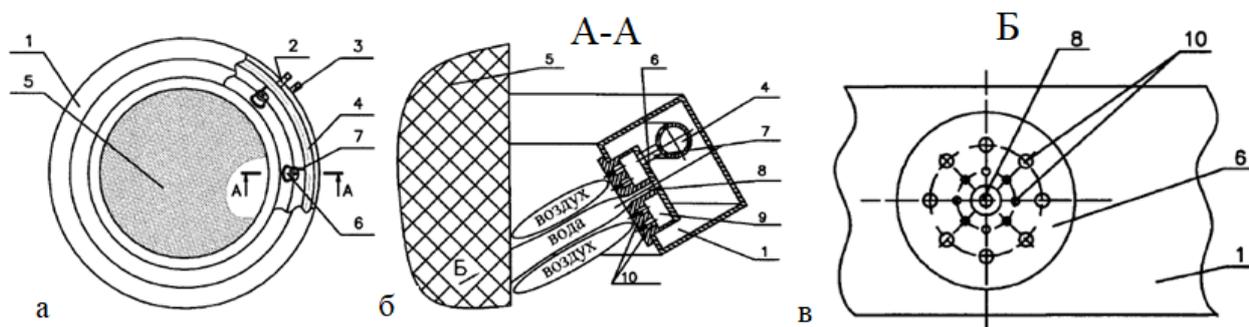


Рис. 7. Устройство оросительного охлаждения

В апреле 2020 года американскими учеными было опубликовано международное изобретение [11], в котором они предложили использовать поверхностно-активные вещества (далее ПАВ) в качестве добавки к воде при испарительном охлаждении ГЭ. При охлаждении электрода распылением молекулы ПАВ заменяют молекулы воды на границе твердого тела и жидкости между поверхностью электрода и охлаждающей жидкостью и, таким образом, создают более высокую концентрацию молекул ПАВ на межфазной границе. С точки зрения смачиваемости присутствие ПАВ уменьшает свободную энергию охлаждающей жидкости, позволяет ей растекаться по поверхности электрода и вытеснять воздух на межфазной границе. Это дает как минимум три преимущества:

1) более тесный контакт между электродом и охлаждающей жидкостью улучшит охлаждающую способность системы за счет улучшенной теплопередачи;

2) образование тонкой пленки охлаждающей жидкости на электроде позволит уменьшить площади электрода, подвергающиеся воздействию кислорода воздуха, тем самым снижая окислительный потенциал;

3) управление характеристиками кипения воды (то есть пузырьковое и пленочное кипение), тем самым управляя динамикой охлаждения жидкости.

Охлаждающая жидкость может состоять преимущественно из воды более 99,5% мас. В некоторых вариантах реализации вода может представлять собой рециркулируемую техническую воду или городскую воду. Добавление ПАВ и антиоксидантов в систему ИО позволяют снизить расход ГЭ в среднем на 2% в зависимости от характеристики печи и вида добавок.

Не все из вышеописанных конструкций систем ИО [4–10] нашли свое применение на работающих либо вновь разрабатываемых дуговых печах. Многие из патентов остались не действующими. Тем не менее зарубежный опыт показывает, что именно предприятия, занимающиеся изготовлением печей, такие как *Danielli*, *Fuchs*, берут на себя ответственность за разработку и внедрение технологий, повышающих эффективность работы печей. Это подтверждает опыт применения данных систем на печах *VAI Fuchs* вместимостью 180 т, введенных в эксплуатацию в 2006 году в ПАО «ММК». Эти печи в момент поставки оборудования уже имели в своем составе систему испарительного охлаждения ГЭ, включающую в себя кольцо ИО с поводящими трубками и клапанный стенд для динамического регулирования подачи воды и воздуха (рис. 8).

Электрическое управление электромагнитными клапанами интегрировано в систему программируемых контроллеров и человеко-машинных интерфейсов ДСП. Кольцо ИО и гибкие участки трубопроводов встроены в рукава-консоли. Все остальные трубопроводы расположены в периферии. Расход воды 3,5 м³/ч на три ГЭ. Производители данных систем заявляют, что применение ИО приводит к снижению потре-

ния ГЭ на 15%. Данные системы установлены по всему миру на более 40 заводах.

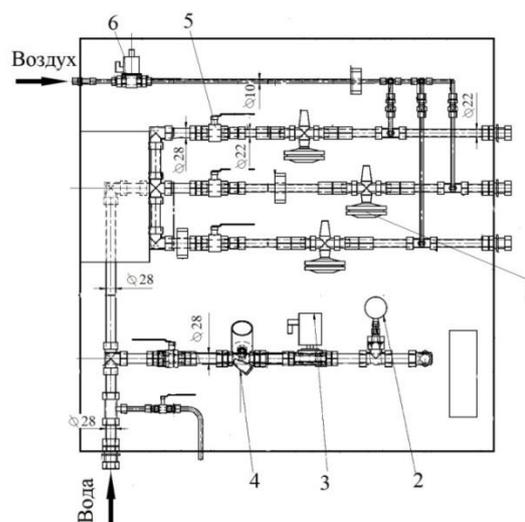


Рис. 8. Клапанный стенд системы испарительного охлаждения на ДСП–180 ПАО «ММК»:

- 1 – регулятор давления воды; 2 – механический манометр; 3 – электромагнитный клапан; 4 – реле протока; 5 – шаровой кран

В странах Европы данная технология наиболее распространена. Например, итальянская компания *Smartec* занимается разработкой и изготовлением усовершенствованных систем для повышения эффективности дуговых печей, в число которых входит и система ИО ГЭ [12]. Фотографии промышленного применения и конструкций данных систем приведены на рис. 9. Эти системы динамически регулируют поток воздуха/воды через охлаждающие кольца под управлением собственным программным обеспечением. Этот динамический контроль во время каждой фазы плавления значительно повышает эффективность охлаждения ГЭ по сравнению со стандартной практикой использования фиксированного количества охлаждающей воды.



Рис. 9. Фотографии промышленного применения системы ИО

Испарительное охлаждение ГЭ может осуществляться двумя основными вариантами [13,14]. Первый, более простой с точки зрения технологии, когда на ГЭ под давлением подается вода без замешивания в ней воздуха (рис. 10, б). И второй вариант, когда охлаждающая вода распыляется на электрод с помощью сжатого воздуха, образуя эффект орошения, который равномерно распределяет охлаждающую воду по поверхности электрода (рис. 10, в).

В РФ не так много примеров использования этой технологии (металлургические комбинаты, Магнитогорск, Старый Оскол), и все они были штатно установлены производителями зарубежных печей. В настоящее время ни один отечественный производитель дуговых печей не разрабатывает такие системы. Для предприятий, которые имеют в своем составе дуговые печи разной вместимости, использование технологии ИО позволит сократить удельные расходы на производство стали, но им попросту не хватает времени и доступной информации в литературе для разработки и внедрения таких систем. Многие металлургические и литейные предприятия, использующие дуговые печи для плавки металлов и сплавов настороженно относятся к использованию водяного охлаждения ГЭ, так как считают, что это взрывоопасно, так как «металл и вода не совместимы». В данной работе показан промышленный опыт применения этой технологии и сформулированы рекомендации по разработке систем испарительного охлаждения ГЭ для дуговых печей разной вместимости.

Проведены экспериментальные исследования по применению ИО на предприятии «АВИСМА» (г. Березники). Оно в своем составе имеет три дуговые руднотермические печи (РТП) вместимостью 100 т для получения титанового шлака. С учетом выданных специалистами предприятия технических и ценовых характеристик процесса было проведено моделирование температурного поля ГЭ при расходе воды от 0,5 до 2,5 м³/ч в компьютерной программе «Моделирование теплового состояния электрода ДСП» [15]. Она позволяет на первом этапе до изготовления системы ИО и проведения опытных работ рассчитать прогнозируемое снижение расхода ГЭ и удельную экономию средств при использовании охлаждения [16]. Понятно, что чем больше расход воды, тем ниже средняя температура ГЭ и, значит,

меньше его унос (рис. 11, а). Это справедливо, если вся вода, которая попадает на ГЭ, отбирает от него тепло, а не падает просто в печь. Толщина образующейся водяной пленки зависит от свойств поверхности ГЭ, поверхностного натяжения воды и обычно не превышает 1–1,5 мм. Были проведены расчеты, определяющие толщину водяной пленки по длине ГЭ от места подачи воды в зависимости от расхода подаваемой воды (рис. 11, б). Исходя из этого, оптимальным расходом воды для РТП является 1,5 м³/ч, при котором теоретическое снижение расхода составит около 25%. Время включения ИО зависит от стоимости килограмма ГЭ и стоимости кВт·ч электроэнергии с учетом того, что для испарения 1 м³ воды требуется 675 кВт·ч электроэнергии. Исходя из этого, рекомендуемое время включения было определено как 5–15 мин в зависимости от начальных параметров электрода.

По результатам расчетов специалистами «АВИСМА» принято решение об изготовлении системы ИО и проведении опытных работ на одном из трех электродов РТП. Опытная установка ИО состоит из двух секций, навешиваемых по обе стороны от ГЭ. Каждая секция состоит из двух полуколец, выполненных из труб с форсунками (рис. 12, а). Верхнее полукольцо служит для подачи воды в зону охлаждения электродов и имеет четыре форсунки. Нижнее кольцо предназначено для подачи воздуха, имеет четыре форсунки, создающие плоскую горизонтально расположенную струю воздуха. Форсунки для воды сделаны съемными на резьбе для возможности оперативной замены в случае засорения. Диаметр подводящих труб составляет 32 мм, диаметр отверстий в водяных форсунках составляют 5 мм. Для регулирования количества подаваемой воды и воздуха предусмотрены шаровые регулирующие краны. Расход воды на охлаждение ГЭ предусмотрен в диапазоне 0–3 м³/ч. Для регистрации количества воды на охлаждение установлен прибор учета воды ВСХН-50. Для моментального прекращения подачи воды на электрод в случае аварийной ситуации или возникновения ее угрозы предусмотрена отсечная арматура. Для сравнительного анализа расхода охлаждаемых и неохлаждаемых ГЭ устройство ИО смонтировано на одном из трех электродов РТП-1 (рис. 12, б). Эксперимент проводили в феврале 2023 года.

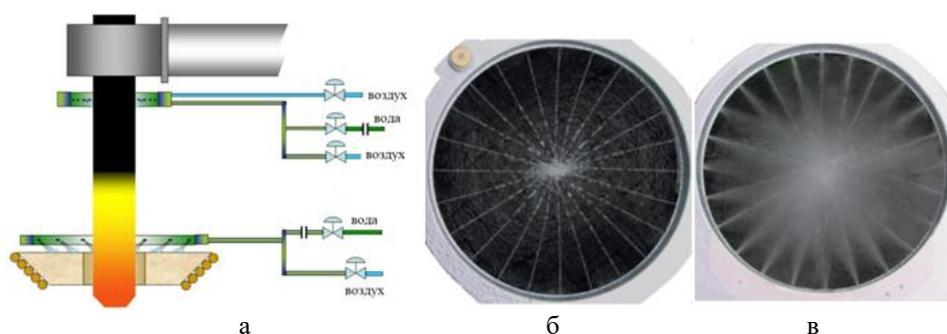


Рис.10. Варианты ИО:
а – общий вид; б – без воздуха; в – с воздухом

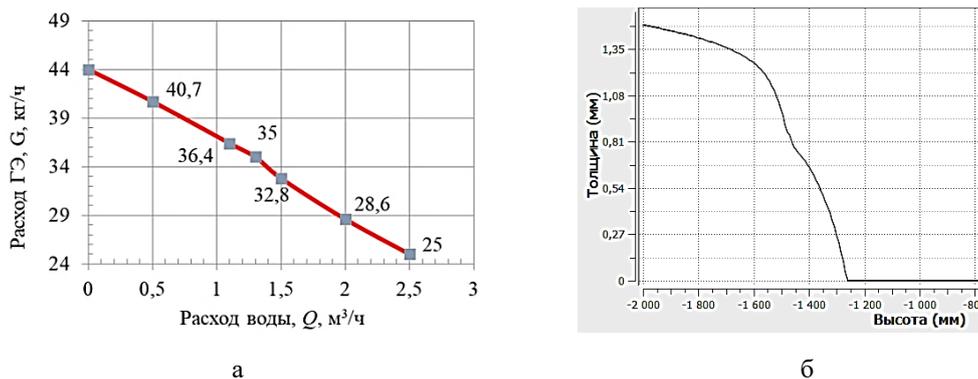


Рис. 11. Результаты расчетов:
 а – расход ГЭ в зависимости от расхода воды на ИО;
 б – толщина водяной пленки по длине ГЭ при расходе воды 1,5 м³/ч

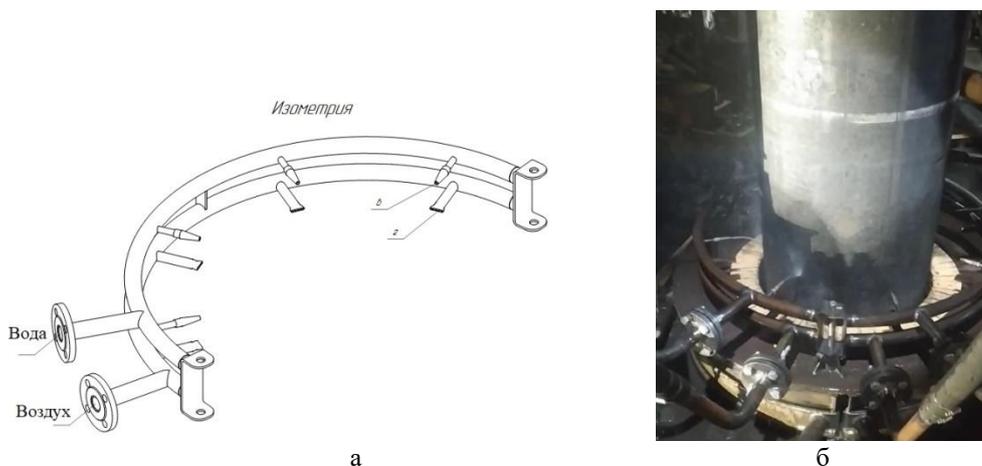


Рис. 12. Секция системы ИО:
 а – проект системы ИО; б – фотография смонтированной на ГЭ системы ИО

В результате промышленных испытаний получены промежуточные результаты. На основе измерений пирометром в зоне охлаждения водой температура ГЭ не превышала 500°C. При этом известно, что интенсивное окисление и расход ГЭ значительно увеличивается, начиная с 600°C [17]. Визуально наблюдалось значительное разбрызгивание воды при попадании ее на ГЭ, в результате на своде образуются большие ее скопления. Расход воды в течение всего периода работ составил 0,2 м³/ч. Выше поднимать было нецелесообразно в связи с большим разбрызгиванием воды. Использование «воздуха» совместно с водой привело к значительному уменьшению диаметра ГЭ в зоне крепления системы ИО.

По результатам были сформулированы следующие рекомендации:

1. Для уменьшения разбрызгивания воды необходимо снизить скорость ее вытекания из сопел и изменить направление ее подачи. Для этого рассчитаем скорость воды по формуле

$$W = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_{\text{отв}}^2 \cdot n}, \quad (1)$$

где W – скорость вытекающей из сопел воды, м/с; Q – расход воды на охлаждение ГЭ, м³/с; $d_{\text{отв}}$ – внутренний диаметр сопла, мм; n – количество сопел, шт.

2. Понятно, что с увеличением внутреннего диаметра и количества сопел скорость вытекающей воды снижается. Увеличение количества сопел приведет к более равномерному распределению воды по поверхности ГЭ. Рекомендуемая скорость воды не более 1 м/с. Все сопла необходимо расположить под углом $\approx 45\text{--}65^\circ$ к оси ГЭ.

3. Расход воды 0,2 м³/ч слишком незначительный для снижения температуры ГЭ в дуговых печах такой мощности, поэтому после корректировки конструкции кольца ИО необходимо постепенно поднимать расход до 1–1,5 м³/ч.

4. Для исключения дополнительного окисления электрода в восстановительной атмосфере печи продолжить работы только на водяном контуре без воздушного охлаждения.

5. Для чистоты эксперимента по снижению расхода электродов использовать ГЭ одного производителя и одной марки.

6. С учетом этих корректировок специалистами «АВИСМА» принято решение об изменении конструкции системы ИО, в том числе и разработке автоматической системы регулирования давления воды и воздуха, так как это сделано на зарубежных аналогах. Была спроектирована новая система. В бюджете предприятия заложены финансовые средства на ее реализацию в 2024 году. После чего промышленные испытания новой системы ИО ГЭ будут продолжены.

Суммарную удельную экономию средств с ДЭ учетом стоимости ГЭ при расчетном снижении расхода ГЭ на 25%, количества энергии, требуемой на испарение заданного объема воды, стоимости электроэнергии определим как

$$\Delta G = G(V_b) - G_0, \quad (2)$$

где $G(V_b)$ – расход ГЭ при заданном расходе воды V_b , кг/ч; G_0 – расход ГЭ при $V_b = 0$.

Удельную суммарную экономию ДЭ, руб./ч, рассчитываем следующим образом:

$$\Delta \text{Э} = \Delta G \cdot C_r - V \cdot E_1 \cdot C_э, \quad (3)$$

где C_r – цена ГЭ, руб./кг; $E_1 = 675 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ – количество электроэнергии, которая требуется для испарения 1 м^3 воды; $C_э$ – цена электроэнергии, руб./кВт·ч.

Цена ГЭ – 337712 руб./т, цена электроэнергии 2993,94 руб./тыс. кВт·ч. Учитывая прогнозируемое снижение расхода ГЭ на 25% при расходе воды $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$, суммарная экономия составит около $\Delta \text{Э} = 1217$ руб./ч на один ГЭ. Стоимость изготовления новой системы ИО на «АВИСМА» составит 536129 руб. Экономия материала электрода за одну восьмичасовую плавку составит около 9736 руб. Таким образом, вложения на проектирование и изготовление системы ИО окупятся за 55 плавков или 19 суток при трехсменном режиме работы. Цены расходников для расчета предоставлены специалистами «АВИСМА», г. Березники, и актуальны на первый квартал 2023 года.

Заключение

Рекомендации для проектирования и использования систем ИО:

1. Система ИО должна состоять из кольца ИО, сделанного из нержавеющей стали, с отверстиями либо соплами по диаметру, направленными к оси ГЭ. Для ДСП и ДППТ кольцо монтируют несколько ниже электрододержателя. Подвод воды и воздуха к кольцу ИО осуществляется через металлические рукава.

2. Для РТП с высокими свечами ГЭ кольца проектировать разъемными для удобства монтажа и обслуживания. Кольца монтировать на высоте, где температура ГЭ во время их работы превышает 500°C .

3. Возможны два варианта использования систем ИО. Испарительное охлаждение орошением, когда используют смесь воды с воздухом и стандартное

испарительное охлаждение, когда на электрод подается вода без замешивания в ней воздуха. В любом случае воздух используется для прочистки сопел от накипи при остановке подачи воды.

4. Для обеспечения ламинарного потока воды по поверхности ГЭ и уменьшения ее разбрызгивания угол наклона сопловых отверстий должен составлять $45-65^\circ$ к оси электрода.

5. Необходимо учитывать скорость вытекания воды из сопел, которая определяется сечениями подводящих трубок/кольца ИО и диаметром отверстий в соплах. Рекомендуемое значение – не более 1 м/с.

6. Контроль за расходом воды и воздуха осуществляется на клапанном стенде с использованием редуктора давления и контроллеров. Учитывается давление питающих сетей, расход воды и воздуха, а также эффективность распылительных колец. **Электрическое управление электромагнитными клапанами интегрируется в систему программируемых контроллеров и человеко-машинных интерфейсов ДСП.**

7. В зависимости от технических характеристик дуговой печи расход воды и время включения системы ИО рассчитывается в компьютерной программе и составляет от 0,1–1,5 $\text{м}^3/\text{ч}$ и 2–15 мин от начала подачи тока соответственно [18–21]. Для экономической оценки необходимо учитывать цены на расходные материалы и количество/цену электроэнергии, затраченной на испарение воды.

Список источников

1. Журавлев А.А., Мысик В.Ф., Жданов А.В. Расчет материальных и энергетических балансов при выплавке стали в дуговых сталеплавильных печах: учеб.-метод. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 128 с.
2. Левашова А.И., Кравцов А. В. Химическая технология углеродных материалов: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 112 с.
3. Моделирование теплового состояния графитированных электродов дуговых печей / И.М. Ячиков, И.В. Портнова, А.Н. Веселовский, Е.А. Крылов // Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации: Всероссийская науч.-техн. конференция. 2005. С. 175–178.
4. Пат. US 4852120 (A) Америка, US07/268.446. Cooling apparatus for electric arc furnace electrodes / Eigi Udo. Заявл. 08.11.1988. Опубл. 25.07.1989.
5. Пат. 5034877/07 Российская Федерация, RU 2007896 МПК H05B7/12. Устройство орошения электрода дуговой сталеплавильной печи / В.К. Тарасов, О.Л. Резников, Ю.И. Корченков, И.А. Хафизов, Б.П. Крикунов, И.И. Таланов; патентообладатель предприятие «Пионер»; заявл. 31.03.1992; опубл. 15.02.1994.

6. Пат. 19624481 Германия, МПК F27D 11/1 H05B7/101 H05B7/105 CPC: H05B7/101 H05B7/12. Опорное устройство для электрода дуговой печи / Koester Volkwin, Paul Guenter; заявл. 19.06.1996; опубл. 02.01.1998.
7. Пат. DE19806332A1 Германия, DE F27D 9/00. Electrode spray cooling arrangement for electro-melting furnace / Helmut Wolfram; заявл. 05.02.1998; опубл. 19.08.1999.
8. Пат. 2005106283/06 Российская Федерация, RU 2293450 МПК H05B7/12. Устройство охлаждения электрода / Карк У.; патентообладатель Карк АГ (DE); заявл. 08.08.2003; опубл. 10.02.2007.
9. Пат. u20040005 Белоруссия, BY 1500 U C 21C 5/52, H 05B 7/12. Устройство для охлаждения графитированных электродов / В.А. Яцко, В.Н. Прохоренко; патентообладатель Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод»; заявл. 08.01.2004; опубл. 30.09.2004.
10. Пат. u20050523 Белоруссия, BY 2517 U C 21C 5/52, B 21D 19/00. Устройство для охлаждения графитированных электродов / Н.В. Андрианов, В.А. Маточкин, В.Н. Прохоренко, В.Ю. Гуненков; патентообладатель Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод»; заявл. 30.08.2005; опубл. 28.02.2006.
11. Пат. 2020/081559 A1 Международный, PTU/US2019/056317. Spray cooling furnace electrodes with a cooling liquid that contains surfactants / Strasser Joseph S., Tanski Jeffrey R. WO2020081559A1; заявл. 15.10.2019; опубл. 23.04.2020.
12. Итальянский производитель систем испарительного охлаждения. URL: <http://www.more-oxy.com/smarteca-technological-package-to-reduce-electrode-consumption/>. (Дата обращения: 13.05.2021).
13. Система испарительного охлаждения ГЭ орошения. <https://www.kark.de/cms/en/welcome/> (дата обращения: 04.01.2024).
14. Liquid steel level measurement at electric arc furnaces without increasing the power off time / Vicente A., Gutierrez J.A., Artech J.A., Macaya I. // Conference: 11 Th European Steelmaking Conference and Expo, 2016.
15. Моделирование теплового состояния электрода ДСП: свидетельство РФ о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017617959 / Ячиков И.М., Быстров М.В., Портнова И.В.
16. Эффективность использования испарительного охлаждения для снижения расхода графитированных электродов в дуговых печах малой емкости / И.М. Ячиков, И.В. Портнова, М.В. Быстров и др. // Металлургическая теплотехника и теплоэнергетика, Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2022. Т.22. №1. С.67-77.
17. Schwabe W.E. The Mechanics of Consumption of Graphite Electrodes in Electric Steel Furnaces // Electric Furnace Proceedings, 1971. P. 140-148.
18. Yachikov I.M., Portnova I.V., Bystrov M.V. Efficiency of Application of Evaporative Cooling of Graphite Electrodes to Reduce their Consumption in Arc Furnaces // Materials Science Forum, Vol. 946, pp. 444-449, 2019. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.444>
19. Ячиков И.М., Портнова И.В., Быстров М.В. Моделирование теплового состояния графитированных электродов при испарительном охлаждении // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности: сб. докл. II Междунар. науч.-практ. конференции. Екатеринбург: УрФУ, 2018. С. 203-208.
20. Ячиков И.М., Быстров М.В., Портнова И.В. Компьютерное моделирование угара графитированного электрода при его испарительном охлаждении в дуговых печах // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сб. докл. VIII Всероссийск. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. Екатеринбург: УрФУ, 2019. С. 192-196.
21. Bystrov M.V., Yachikov I.M. Portnova I.V. Modelling of the thermal state and the melting loss of a graphite electrode in the conditions of the evaporative cooling in the arc furnace // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 966. 2020. P. 1-6. doi:10.1088/1757-899X/966/1/012019

Сведения об авторах

Быстров Михаил Викторович – инженер-технолог, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: ping.w1n@mail.ru. ORCID 0009-0008-9410-1393

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

PRACTICAL RECOMMENDATIONS FOR THE DESIGN OF EVAPORATIVE COOLING SYSTEM FOR GRAPHITIZED ELECTRODES OF ARC FURNACES

Bystrov Mikhail V. – engineer, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: ping.w1n@mail.ru. ORCID 0009-0008-9410-1393

Abstract. Graphitized electrodes (GE) are a consumable material in electric arc melting. Their consumption in the steel cost structure in some cases reaches 30%, so reducing it is an urgent task. It has been proven that the main consumption items of GE are the oxidation of its side surface under the influence of temperature and thermo mechanical destruction and wear, i.e. the consumption of electrode material significantly depends on its thermal state. There are different ways to solve this problem. The most promising method in terms of manufacturing costs and technology of use for domestic metallurgical and foundry enterprises is the method of evaporative cooling (EC) of the side surface of the GE. The purpose of the work is to review various designs and determine practical recommendations for the application and manufacture of evaporative cooling systems for GE. A patent search for existing EC systems was conducted. Based on a literature review, various options for their designs are considered. For the first time, experimental work was carried out on an ore-smelting furnace with a capacity of 100 tons. It was established that the use of artificial insulation leads to a decrease in temperature and oxidation of the side surface of the GE. Electrode consumption is reduced by an average of 15%. The efficiency of the EC depends on the design of the cooling ring and the technological parameters of the system, such as water flow and the time it is turned on. Recommendations are given for the manufacture and use of evaporative cooling systems. As a result of studying various sources, it was determined that in the Russian Federation this technology is used only on foreign-made arc furnaces (*Danieli, Fuchs*) with a capacity of more than 80 tons, because there it is supplied with the oven. There is not a single enterprise in Russia that develops and implements such systems. For enterprises that have arc furnaces of different capacities, the rational use of artificial electrodes will reduce the specific costs of steel production, and for enterprises producing these furnaces, increase the level of equipment, automation and, ultimately, sales.

Keywords: arc furnace, EAF, graphite electrode, evaporative cooling, spray cooling, graphite electrode consumption, thermal state modeling, spray ring.

Ссылка на статью:

Быстров М.В. Практические рекомендации по конструкции системы испарительного охлаждения графитированных электродов дуговых печей // Теория и технология металлургического производства. 2024. №2(49). С. 16-26.
Bystrov M.V. Practical recommendations for the design of evaporative cooling system for graphitized electrodes of arc furnaces. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 49, no. 2, pp. 16–26.