

ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н. Нехамина Сергея Марковича на диссертационную работу **Быстрова Михаила Викторовича** «Снижение расхода графитированных электродов в дуговых печах за счет их принудительного охлаждения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2 «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Актуальность темы

Повышение надежности и снижение затрат на электроды дуговых печей является важной составляющей в укреплении конкурентоспособности сталеплавильных производств. В данной работе рассматривается тепловая работа графитированных электродов, которые применяются в дуговых печах постоянного и трехфазного переменного тока как один из важнейших конструктивных узлов дуговых печей и расходных материалов при выплавке стали. Используемые электроды имеют относительно высокую стоимость, обусловленную энергоемкой технологией своего производства (графитизации).

Важными факторами, влияющими на расход графитированных электродов, являются их термомеханическое разрушение 35% и окисление поверхности 37%, интенсивность которых возрастает с повышением температуры. В данной работе анализируется два метода снижения температуры электродов. Это подача в осевой канал полого электрода инертного газа и разбрызгивание воды на боковую поверхность цельного электрода. В исследованиях по снижению температуры электродов нет данных о математическом моделировании теплового состояния электродов при использовании испарительного охлаждения для дуговых печей разной вместимости, что приводит к сдерживанию дальнейшего совершенствования параметров дуговых печей.

В связи с этим, решение задач связанных с научной разработкой методов повышения срока службы графитированных электродов в дуговых печах является **актуальным**.

Соответствие диссертационной работы указанной специальности.

Полученные результаты соответствуют паспорту научной специальности: 2.6.2. – «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Анализ содержания диссертации

Диссертационная работа М.В. Быстрова состоит из введения, 4 глав, основных выводов по работе, списка использованных источников, списка сокращений и 2 приложений. Работа изложена на 139 страницах машинописного текста, включающего в себя 67 рисунков, 13 таблиц, список литературы из 144 наименований на 17 страницах.

В первой главе (стр. 11–50) приводится анализ состояния рассматриваемой проблемы. Проведено сравнение угольных и графитированных электродов (ГЭ), даны их основные физико-механические свойства. Определены основные преимущества ГЭ, имеющих меньшее

значение удельного электрического сопротивления, более высокие механические свойства и устойчивость к агрессивному воздействию печной атмосферы по сравнению с угольными электродами. На основании проведенного рассмотрения технология изготовления ГЭ делается вывод о большой энергоемкости процесса их производства и объективно высокой стоимости.

На основании литературных данных установлено, что на расход электродов в первую очередь влияет их тепловое состояние при работе в печи. Констатируется связь между тепловым состоянием электродов и интенсивностью их окисления и термомеханической эрозии – преобладающими механизмами расхода электродов в дуговой печи. Из известных способов понижения температуры ГЭ в дуговых печах автором определены два, представляющих наибольший интерес: охлаждение ГЭ газом, продуваемым через внутренний канал полых электродов и применение испарительного охлаждения водой боковой поверхности ГЭ.

Проведен анализ трудов отечественных и зарубежных ученых, посвященных математическому моделированию процессов тепломассообмена ГЭ, работающих в дуговых печах. Сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе (стр. 51–63) представлена, разработанная автором математическая модель теплового состояния полого электрода при работе дуговой печи. С использованием разработанной математической модели исследовано тепловое состояние полых ГЭ в условиях работы дуговых печей ДСП-6 и ДСП-50 при подаче различных газов в осевой канал и её отсутствии. Проведены расчеты теплового поля электродов и параметров, характеризующих влияние подачи газа в полость электрода на интенсивность его охлаждения.

Результаты моделирования представлены в виде графиков, анализ которых позволил автору установить, что охлаждение газом незначительно влияет на температуру боковой поверхности электрода, а значит на его термическое разрушение и окисление.

В третьей главе (стр. 64–89) исследовано тепловое состояние цельных ГЭ в условиях работы дуговых печей переменного и постоянного тока различной вместимости. Предложена математическая модель процессов тепломассообмена в ГЭ при его нагреве в работающей печи и наружном испарительном охлаждении водой.

На основании сравнения полученных расчетных значений с практическими данными из литературы сделан вывод об адекватности представленной математической модели.

Проведены оптимизационные расчеты для определения рациональных параметров орошения ГЭ.

Выполнена оценка экономической эффективности использования испарительного охлаждения ГЭ для повышения их стойкости с учетом

стоимости электроэнергии, дополнительно затрачиваемой на испарение охлаждающей воды.

Сделан вывод о технической и экономической целесообразности испарительного охлаждения ГЭ дуговых печей.

В четвертой главе (стр. 90–113) рассмотрено экспериментальное исследование применения водяного испарительного охлаждения на двух типах дуговых печей. На шеститонной сталеплавильной печи постоянного тока ДППТ-6 с ГЭ диаметром 300 мм и на руднотермической печи мощностью 16,5 МВА, выплавляющей титановый шлак, с графитированными электродами диаметром 610 мм. Приведены результаты промышленных экспериментов по снижению расхода ГЭ за счет применения испарительного охлаждения, показавшие эффективность выполненной разработки.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам исследования. Содержание глав полностью соответствует выносимым на защиту положениям. В приложении представлены акты промышленного внедрения выполненного исследования.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработаны новые математические модели, которые позволяют рассчитывать нестационарное распределение температур в графитированном электроде, унос графита в зависимости от его качества и определять форму электрода. При этом расчет можно проводить с учетом подачи охладителя (газ/вода) в зависимости от типа электрода и его технических характеристик в условиях работы в дуговых печах разного типа и вместимости.

2. На основе анализа теплового состояния полого графитированного электрода при подаче различных газов в осевой канал установлено, что средняя температура ГЭ меняется незначительно.

3. На основании проведенных теоретических исследований разработана математическая модель и компьютерная программа для определения влияния подачи воды на охлаждение боковой поверхности графитированных электродов разной термостойкости в дуговых печах трехфазного переменного и постоянного тока разной вместимости, использование которых показало, что применение испарительного охлаждения существенно снижает расход графитированных электродов.

4. Предложена методика оптимизации режима орошения электрода (расход воды, скорость ее распыления на боковую поверхность и т.д.) в зависимости от технических характеристик дуговых печей.

Считаю, что приведенные выше научные результаты соискателя являются новыми и оригинальными, что подтверждено двумя свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Практическая и теоретическая значимость результатов работы.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке оригинальной математической модели, и созданной по ней компьютерной программе, которая позволяет рассчитывать и определять оптимальные

параметры для эффективной работы системы испарительного охлаждения. Предложенная математическая модель, в отличие от уже существующих моделей описывает процессы распределения температуры вдоль ГЭ с учетом изменения формы рабочего торца ГЭ и принудительного охлаждения газом и водой. Предложенная модель при расчетах учитывает толщину и длину стекающей по боковой поверхности электрода водяной пленки. Проведена теоретическая оценка рационального расхода воды на испарительное охлаждение для печей различной вместимости.

Достоверность выполненных исследований, корректность методов, способов обработки данных и разработанных программных средств подтверждена опробованием на ряде предприятий РФ.

Практическая значимость работы заключается в обеспечении надежности и снижении себестоимости производства стали, а также в отсутствии необходимости проведения экспериментальных плавов для оценки экономической целесообразности и эффективной настройки систем испарительного охлаждения на дуговых печах. Даны практические конструкторские рекомендации по повышению эффективности использования подобных систем охлаждения на дуговых и рудотермических печах.

Эффективность разработанных рекомендации по выбору рациональных технологических параметров охлаждения ГЭ подтверждена актами промышленного внедрения результатов диссертационной работы.

Достоверность научных результатов и обоснованность выводов

Достоверность научных результатов и обоснованность полученных выводов подтверждается большим объемом наблюдений, использованием современных статистических методов обработки экспериментальных данных, непротиворечивостью созданных моделей устоявшимся представлениям и самим себе. Адекватность созданных математических моделей подтверждается сопоставлением результатов компьютерного моделирования с известными данными и с данными промышленных экспериментов.

Достоверность выполненных исследований, корректность методов, способов обработки данных и разработанных программных средств подтверждена опробованием на ряде предприятий РФ.

Апробация работы. Основные научные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на следующих конференциях:

1. XV научно-промышленный форум «Техническое перевооружение машиностроительных предприятий России» секция «Заготовительное и металлургическое производство. Литейные технологии в машиностроении», 18–19 октября 2022 г., Екатеринбург, 2022.

2. II национальной научная конференция «Наука XXI века: технологии, управление, безопасность», ФГБОУ ВО «КГУ», 21–22 апреля 2022 г., Курган, 2022.

3. VIII Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных УрФУ «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов», 16–17 мая 2019 г. Екатеринбург, 2019.

4. 77-ая международная научно-техническая конференция МГТУ им. Носова «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования», Магнитогорск, 2019.

5. II Международная научно-практическая конференция УрФУ «Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности», Екатеринбург, 2018.

6. XV международный конгресс сталеплавателей и производителей металла, 15–19 октября 2018 г., Тула, 2018.
XIII Международная конференция «Современные проблемы электрометаллургии стали», 3–6 октября 2017 г., Челябинск – Старый Оскол, 2017.

К общим достоинствам диссертационной работы следует отнести следующие моменты.

В исследовании использовались современные подходы и методы, включающие теоретические и экспериментальные промышленные исследования, которые позволили автору получить важные научные результаты, имеющие теоретическое и прикладное значение для повышения стойкости графитированных электродов в дуговых печах.

Исходя из имеющихся литературных данных, полученные автором результаты были впервые в мире использованы для проведения опытных работ по использованию испарительного охлаждения на дуговых рудно-термических печах. Результаты этих работ оцениваю как положительные.

Выполненное в данной работе исследование вносит существенный вклад в понимание процессов, происходящих при термическом разрушении и окислении ГЭ во время плавки, и имеет теоретическую и практическую ценность для специалистов и предприятий, имеющих в своем составе дуговые печи разной вместимости и типа, а так же для производителей таких печей. Работа направлена на практический результат – повышение срока службы графитированных электродов за счет подачи на их боковую поверхность воды, которая, испаряясь, экранирует электрод от окисления.

При изучении диссертационной работы и анализе полученных результатов возникли **следующие замечания.**

1. Приведенная на стр. 5 и 38 диссертации сумма затрат до 30 % на графитированные электроды в структуре себестоимости выплавки стали не соответствует известным данным, тем более, что далее на стр. 15 указана другая цифра – 14 %.

2. Указанная на стр. 12 оценка, что потери электроэнергии при плавке составляют порядка 10% от всей печной мощности, значительно завышена.

3. Утверждение на стр. 14, что у графитированных электродов «удельное электрическое сопротивление имеет отрицательное значение» ошибочно и противоречит приведенной на рис.1.1 зависимости.

4. Не ясно, что означает выражение на стр. 17: «эмиссия графита под влиянием электрического поля»?

5. Нельзя согласиться с мнением автора (стр. 18), что снижение удельного расхода графитированных электродов в дуговых печах постоянного тока «достигается в большей части за счет того, что количество ГЭ в ДППТ меньше», чем в ДСП.

6. На стр. 55 при выводе математической модели теплового состояния ГЭ в качестве параметра, определяющего тепловой поток от дуги постоянного тока на торец электрода, предложено принять катодное падение напряжения, что не соответствует современным представлениям об энергетическом балансе дуги.

7. Нет ли противоречия в принятых на стр. 69 допущениях для определения тепломассообмена движения жидкости по поверхности электрода:

- теплотой нагрева жидкости до температуры испарения пренебрегаем и принимаем $T_{ж}=100^{\circ}\text{C}$;

- переданная к жидкости теплота затрачивается на испарение жидкости и поднимается вверх вместе с паром (процесс адиабатного испарения);

- газ не насыщен паром в отдалении от жидкости, возникает поток вещества, направленный от поверхности испарения?

8. На стр. 71 к расчету скорости уноса графита (формула 3.14) добавляется коэффициент термической стойкости ГЭ – ψ . Указывается, что его значение варьируется в широких пределах от 0,1 до 1, что существенно влияет на результаты расчета. От чего зависит этот коэффициент и как теоретически или экспериментально определить его значение?

9. Следует ли понимать график на рис. 3.15 (стр. 86), что предлагается режим охлаждения электрода, при котором водяная пленка сохраняется до уровня около 400 мм до рабочего торца электрода?

10. В автореферате и диссертации нет информации по сравнению эффективности использования воды и водовоздушной смеси (капельного охлаждения) электродов. Какое соотношение вода-воздух допустимо? Не целесообразно ли использование капельного охлаждения при вдувании газа в полый электрод?

Приведенные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации М.В. Быстрова. Автор проявил высокую эрудицию и грамотность при постановке задачи исследования, выборе методов и разработке решений. Надо отметить его высокую квалификацию при проведении экспериментальных исследований и выполнении компьютерных расчетов.

Содержание диссертационной работы М.В. Быстрова достаточно полно освещено в 15 научных публикациях, в том числе в 4 -публикациях в журналах, включенных в перечень ВАК и 2 в наукоёмкой базе данных Scopus, апробировано на научных конференциях различного уровня. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. В автореферате достаточно полно отражается содержание всей диссертации.

Диссертация представляется завершённой научно-квалификационной работой, в которой присутствуют все необходимые элементы – изучение проблемы, постановка задач исследования, их решение, анализ и практическая проверка полученных результатов.

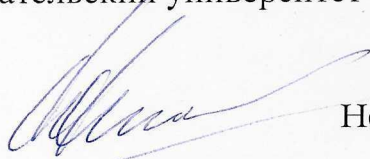
Заключение.

В целом представленная диссертационная работа в полной мере соответствуют требованиям п. 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в редакциях от 21.04.2016 № 335 и 12.10.18 № 1168), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Быстров Михаил Викторович **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2 «Металлургия черных цветных и редких металлов».

Официальный оппонент:

Профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий, доктор технических наук, научная специальность: 2.4.4 «Электротехнология и электрофизика». Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

«03» марта 2025 г.



Нехамин Сергей Маркович

Подпись профессора кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий, доктора технических наук С.М. Нехамина заверяю:

М.П.



ЗАМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА
УПРАВЛЕНИЯ НА РАБОТЕ С ПЕРСОНАЛОМ
Л.И. ПОЛЕВАЯ

Адрес: 111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14, стр. 1.
Телефон: +7 495 362-75-60. E-mail: universe@mpei.ac.ru