

ОТЗЫВ

официального оппонента к.т.н. Ганина Дмитрия Рудольфовича 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 диссертационного исследования

Вопрос снижения расхода графитированных электродов (ГЭ) в дуговых печах является крайне важным, так как затраты на расходующиеся электроды в структуре себестоимости выплавки стали являются значительными.

Ключевые причины расхода ГЭ – их термомеханическое разрушение, а также окисление боковой поверхности электрода в атмосфере печи под воздействием высокой температуры. Поэтому, основным фактором за счет которого можно снизить скорость разрушения и окисления, а, следовательно, сократить расход электродов, является уменьшение их температуры. Известными способами снижения температуры ГЭ является их принудительное охлаждение за счет подачи газов через осевой канал и подачи воды на боковую поверхность электрода. В настоящее время в России охлаждение ГЭ используется только на дуговых печах большой вместимости с применением импортного оборудования. Например, на ПАО «ММК» используется система охлаждения ГЭ на дуговых сталеплавильных печах (ДСП-180) фирмы VAI Fuchs.

В связи с этим исследования по поиску мероприятий и научной проработки методов, позволяющих рационально снижать температуру и расход ГЭ на печах различной вместимости, являются **актуальными**.

Соответствие диссертационной работы указанной специальности.

Полученные результаты соответствуют следующим направлениям исследований паспорта научной специальности: 2.6.2. – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»:

1. Рудное, нерудное, техногенное и энергетическое сырье.
13. Тепло- и массоперенос в низко- и высокотемпературных процессах.
18. Электро- и спецэлектрометаллургические процессы и агрегаты.
23. Материало- и энергосбережение при получении металлов и сплавов.

Объем, структура и содержание диссертации

Диссертационная работа изложена на 139 страницах, содержит 13 таблиц, 67 рисунков, два приложения. Она состоит из введения, четырех глав,

заклучения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 144 наименований.

Анализ содержания диссертационной работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, направленного на сокращение удельного расхода ГЭ за счет использования их принудительного охлаждения. Сформулированы цель и задачи работы, представлены ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость, даны сведения об используемых в работе методологии и методах исследования, приведены положения, выносимые на защиту, показан личный вклад автора, представлены сведения, подтверждающие достоверность и апробацию полученных результатов.

В **первой главе** «Тепловая работа графитированных электродов в дуговых печах для выплавки черных и цветных металлов» приведены сравнительные характеристики угольных и графитированных электродов, используемых для выплавки металлов и сплавов в дуговых печах, и технологии их изготовления, определены преимущества ГЭ. Представлен обзор научной и технической литературы, посвященной рассмотрению способов снижения расхода ГЭ. На основе литературных данных установлено первоочередное влияние на расход ГЭ их теплового состояния во время работы дуговой печи. Основными статьями расхода электродов являются окисление их поверхности, а также термомеханическое разрушение и износ. Для дальнейших исследований диссертантом выбраны два наиболее перспективных способа снижения температуры ГЭ в дуговых печах: 1) охлаждение электрода газом, который продувается через внутренний канал полого электрода; 2) испарительное охлаждение водой боковой поверхности ГЭ.

Выполнен аналитический обзор теоретических и экспериментальных исследований отечественных и зарубежных ученых, посвященных математическому моделированию тепломассообменных процессов ГЭ в дуговых печах. Сформулированы цель диссертационной работы и задачи исследования.

Во **второй главе** «Моделирование теплового состояния полого графитированного электрода дуговой печи и анализ параметров газового охлаждения на динамику угара графита» выбран объект моделирования – ГЭ с полым осевым каналом и разработана математическая модель его теплового состояния при подаче инертного газа в осевой канал с принятыми допущениями. Приведены исходные данные для расчетов: геометрические параметры ГЭ $\varnothing 300$ мм и $\varnothing 500$ мм, используемых в дуговых сталеплавильных печах трехфазного тока ДСП-6 и ДСП-50, технологические и теплофизические параметры.

По математической модели создана компьютерная программа, с использованием которой выполнены расчеты температурного поля для полых

ГЭ в условиях работы дуговых печей ДСП-6 и ДСП-50 с учетом подачи азота и аргона в осевой канал. В результате расчетов определено изменение средней температуры полого ГЭ в зависимости от расходов аргона и азота, представлены данные расчета параметров, определяющих влияние подачи газов в ГЭ с полым осевым каналом, на скорость охлаждения электрода.

На основе анализа результатов моделирования автором установлено, что эффективность охлаждения полых ГЭ при подаче различных газов через осевой канал является незначительной, так как средняя температура боковой поверхности ГЭ меняется незначительно (снижается на 2°C).

В третьей главе *«Моделирование теплового состояния и динамики угара графитированного электрода при использовании системы испарительного охлаждения»* выполнено исследование теплового состояния ГЭ для дуговых печей разной вместимости с учетом использования системы ИО водой. Приведены сведения об объекте моделирования и принятых допущениях.

В результате компьютерного моделирования теплового состояния ГЭ для дуговых печей вместимостью 0,5–25 т и вместимостью 80–200 т и анализа полученных результатов установлено, что использование системы ИО водой боковой поверхности ГЭ существенно снижает температуру в верхней половине ГЭ и уменьшает расход электродов для дуговых печей разной вместимости.

Автором определены рациональные параметры расхода воды в системе ИО и времени включения ИО, скорости распыления воды на боковую поверхность и др. в зависимости от вместимости печей. С учетом стоимости электроэнергии, затрачиваемой на испарение охлаждающей воды, рассчитан экономический эффект при использовании ИО графитированных электродов с целью повышения их стойкости.

В четвертой главе *«Экспериментальные исследования и практические рекомендации по повышению эффективности охлаждения графитированных электродов»* приведены результаты экспериментальных исследований по использованию системы ИО для снижения расхода ГЭ на предприятиях ПАО «СИБЛИТМАШ» (г. Новосибирск) и «АВИСМА» (г. Березники). В результате проведенных работ установлено, что с применением системы ИО расход ГЭ на 6 т дуговой печи постоянного тока (ДППТ-6) снизился на 15%, а для РТП-1 на 3%. Выявлено, что существует рациональное значение расхода воды, при котором достигается максимальная эффективность системы испарительного охлаждения. Разработаны и сформулированы практические рекомендации по повышению эффективности охлаждения ГЭ с использованием системы ИО для дуговых печей различной вместимости.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам работы. Содержание глав полностью соответствует выносимым на защиту

положениям. В приложении представлены акты промышленного внедрения выполненного исследования

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов:

1. Автором разработаны оригинальные математические модели, с помощью которых можно определять тепловое состояние ГЭ, а также унос графита и изменение формы электрода в различных условиях работы дуговых печей разных типов и вместимости.

2. Теоретически обоснована малая эффективность использования газового принудительного охлаждения через осевой канал ГЭ, средняя температура которого снижается незначительно.

3. На основании теоретических исследований разработана оригинальная математическая модель и программа, позволяющие определять влияние параметров подачи воды на охлаждение ГЭ в дуговых печах разных типов и вместимости. Установлено снижение температуры боковой поверхности электрода и расхода графита при использовании испарительного охлаждения.

4. Впервые разработаны технико-экономические рекомендации по выбору рациональных режимов использования ИО в дуговых печах различной вместимости и разного назначения в зависимости от качества, стоимости ГЭ и энергоресурсов.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы состоит в разработке оригинальных математических моделей, позволяющих с помощью компьютерного моделирования рассчитывать тепловое состояние ГЭ с использованием принудительного охлаждения и без него, определять скорость уноса графита с поверхности ГЭ и наиболее эффективные параметры охлаждения ГЭ.

Практическая значимость работы заключается в том, что с использованием компьютерного моделирования на основании исходных данных, выданных специалистами «АВИСМА», был проведен расчет угара ГЭ в условиях работы стотонной дуговой рудно-термической печи и предложена конструкция экспериментального устройства ИО, найден рациональные расход воды на ИО и время включения ИО.

Результаты работы использованы для проведения опытных работ по снижению расхода ГЭ на 100 т печи РТП-1 на предприятии «АВИСМА» и 6 т печи ДПТ-6 на предприятии ПАО «СИБЛИТМАШ». Практическая значимость работы подтверждена двумя актами внедрения ее результатов.

Достоверность и степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Выносимые на защиту научные положения являются достоверными и обоснованными, что подтверждается использованием современных

эмпирических и теоретических методов исследований, применением методов вычислительной математики и использованием современных статистических программных пакетов при обработке данных.

Достоверность полученных результатов обеспечена экспериментальными исследованиями применения системы испарительного охлаждения. В теоретических исследованиях использованы основополагающие принципы численного расчета дифференциальных уравнений. Адекватность исследований проверялась сравнением результатов расчетов с известными литературными данными, а также с результатами промышленных исследований.

По диссертационной работе имеются следующие замечания и вопросы:

1. Название работы «Снижение расхода графитированных электродов в дуговых печах за счет их принудительного охлаждения» носит двусмысленное значение. Непонятно, что охлаждается электроды или сами дуговые печи. Возможно местоимение «их» лишнее.

2. На сегодняшний день в металлургическом и литейном производстве полые электроды не используются, а если и применяются, то в плазменных печах. В этой связи возникает вопрос: для чего проводились исследования теплового состояния полого графитированного электрода?

3. Из предложения на стр. 4 ВВЕДЕНИЯ: «Согласно данным ассоциации *World steel* [1], в 2022 году в мире произведено 1875,5 млн т, что на 4,2% превысило показатель прошлого года.» не совсем ясно что же все-таки было произведено в этом году в таком количестве.

4. В диссертационной работе написано, что «предмет исследования – исследование удельного расхода ГЭ за счет их принудительного охлаждения при работе дуговой печи», а в автореферате, что «предметом исследования является определение удельного расхода ГЭ за счет их принудительного охлаждения при работе дуговой печи».

5. Из диссертации и автореферата осталось неясным, имеются ли какие-либо отличительные признаки конструкции опытных установок испарительного охлаждения, разработанные специалистами ПАО «СИБЛИТМАШ» и «АВИСМА», от известных конструкций аналогичного назначения.

6. В списке сокращений и условных обозначений диссертационной работы отсутствует расшифровка некоторых аббревиатур, например ПАО «СИБЛИТМАШ», ПАО «ММК», МЭК и др.

7. В тексте диссертации и автореферата встречаются опечатки, грамматические, пунктуационные и стилистические ошибки, оформительские недочеты, некоторые примеры которых приведены ниже:

- стр. 4 автореферата: «...предметом исследование является...»;

- стр. 7 автореферата: «Работа ... содержит 67 рисунок...»;
- стр. 8 автореферата: «Температура по длине ГЭ не равномерна...»;
- стр. 21 диссертации: «Средняя степень дусульфурации стали...»;
- стр. 22 автореферата: «...уменьшить зону интенсивного окисление...»;
- стр. 40 диссертации: «Температура по длине ГЭ не равномерна...»;
- стр. 49 диссертации: «Таким образом, **цель работы** заключается в следующем: **Цель работы:** Сократить удельный расход...»;
- стр. 65 диссертации: «Известна его начальная температура электрода T_0 .»;
- стр. 78 диссертации: «...690 Мдж...»;
- стр. 78 диссертации: «**Расчет выглядит приведенным ниже образом.**»;
- стр. 96 диссертации: «...диаметр отверстий в водяных форсунках составляют 5 мм».

Указанные замечания не снижают ценность результатов диссертации и значимость работы. Надо отметить высокую квалификацию диссертанта при проведении экспериментальных исследований, математического и компьютерного моделирования.

Заключение о соответствии диссертации установленным критериям

По теме диссертации опубликовано 15 научных трудов, из них 4 публикации – в рецензируемых журналах из перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ, и 2 статьи – в журналах, индексируемых в международной базе Scopus, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.6.2 «Металлургия черных, цветных и редких металлов», написана понятно и технически грамотно, выполнена в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления» и является законченной научно-квалификационной работой. Она содержит совокупность новых научных результатов и положений, имеет внутреннее единство, теоретическую ценность и практическую значимость, свидетельствует о личном вкладе соискателя в науку.

Основные положения, идеи и выводы диссертационного исследования в полной мере отражены в автореферате, содержание которого дает полное представление о научных результатах диссертационной работы.

Диссертационная работа Быстрова М.В. отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в соответствии с п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, 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:

Ганин Дмитрий Рудольфович,

доцент кафедры металлургических технологий и оборудования Новотроицкого филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кандидат технических наук по специальности 05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов

11.03.2025 г.



подпись

Адрес: 462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, дом 8

Телефон (рабочий): +7(3537)67-97-29.

Адрес электронной почты: dmrgan@mail.ru

Я, Ганин Дмитрий Рудольфович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Быстрова Михаила Викторовича, и их дальнейшую обработку.



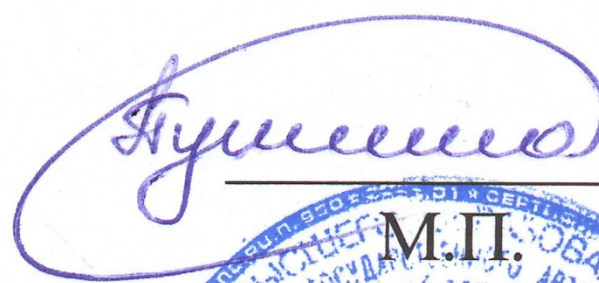
подпись

Подпись Ганина Д.Р. заверяю:

Начальник отдела кадров

Новотроицкого филиала

ФГАОУ ВО НИТУ «МИСИС»



В.А. Путилина

