

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ГУ.5
ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА (ДОКТОРА) НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 25.12.2024 № 12

О присуждении Ерохиной Ольге Олеговне, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Повышение окислительной стойкости графитизированных электродов электродуговых печей» по специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов принята к защите 23.10.2024, протокол заседания № 8, диссертационным советом ГУ.5 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» Минобрнауки России, 199106, Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, приказ ректора Санкт-Петербургского горного университета о создании диссертационного совета от 06.02.2023 № 153 адм, с изменениями от 30.03.2023 № 467 адм, от 27.04.2023 № 653 адм, от 13.07.2023 № 1090 адм, от 03.11.2023 № 1638 адм, от 02.09.2024 № 1281 адм, от 14.10.2024 № 1537 адм.

Соискатель, Ерохина Ольга Олеговна, 08 марта 1996 года рождения, в 2020 году с отличием окончила федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

С 01.10.2020 по 30.09.2024 являлась аспирантом очной формы обучения кафедры металлургии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» Минобрнауки России.

Диссертация выполнена на кафедре металлургии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» Минобрнауки России.

Научный руководитель – **Фещенко Роман Юрьевич**, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», кафедра металлургии, доцент кафедры.

Официальные оппоненты:

Немчинова Нина Владимировна, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кафедра «Металлургия цветных металлов», заведующий кафедрой;

Савченков Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Газпромнефть Научно-технический центр», управление по работе с интеллектуальной собственностью, блок новых технологий, руководитель направления; дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – **федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»**, г. Екатеринбург, в своем положительном отзыве, подписанном Мамяченковым Сергеем Владимировичем, доктором технических наук, старшим научным сотрудником, заведующим кафедрой «Металлургия цветных металлов», Маковской Ольгой Юрьевной, кандидатом технических наук, доцентом, доцентом той же кафедры, секретарем заседания и, утвержденном Германенко Александром Викторовичем, доктором физико-математических наук проректором по науке указала, что предложенные результаты позволяют оценивать поведения электродов в ходе металлургических процессов, снижать себестоимость технологического процесса, реализуемого в дуговых и руднотермических печах. Рекомендуются использование результатов работы на металлургических предприятиях, эксплуатирующих дуговые и руднотермические печи.

Соискатель имеет 42 опубликованных работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 4 работы, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 4 работы, в том числе в 1 статье - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получен 1 патент.

Общий объем – 2,44 печатных листов, в том числе 1,38 печатных листов - соискателя.

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Фещенко, Р.Ю. Анализ методов повышения устойчивости к окислению углеграфитовых изделий, используемых в металлургических и химических агрегатах / Р.Ю.Фещенко, **О.О. Ерохина**, Р.Н. Еремин, Б.Э. Матыльский // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. (158). С. 380-390. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-3-380-390. ВАК № 361 ред. 27.01.2021 г.

Соискателем проведено изучение способов повышения окислительной стойкости изделий, эксплуатируемых в металлургических агрегатах, в том числе в дуговых сталеплавильных печах. Оценена актуальность проблемы окисления электродов электродуговых печей. Определены основные решения, позволяющие повышать окислительную стойкость изделий, в том числе стеклообразные и карбидные покрытия. Определено, что карбидные

покрытия обладают наиболее высокой стойкостью к окислению и позволяют эксплуатировать изделия при температурах порядка 1600 °С.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

2. Feshchenko, R.Y. Improvement of oxidation resistance of graphite blocks for the electrolytic production of magnesium by impregnation with phosphate solutions. Part 2 / R.Y. Feshchenko, R.N. Eremin, **O.O. Erokhina**, V.G. Povarov // *Tsvetnye Metally*. 2022. (1). С. 24–29. (Фещенко, Р.Ю. Повышение окислительной стойкости графитированных блоков для электролитического производства магния методом пропитки фосфатными растворами. Часть 2 / Р.Ю. Фещенко, Р.Н. Еремин, О.О. Ерохина, В.Г. Поваров // *Цветные металлы*. 2022. (1). С. 24–29). DOI: 10.17580/tsm.2022.01.02

Соискателем разработан способ оценки окислительной стойкости укрупненных образцов электродного графита. Определена концепция устройства для оценки окислительной стойкости. Проведены испытания на пилотной модели установки.

3. Feshchenko, R.Y. Analysis of the anode paste charge composition / R.Y.Feshchenko, E.A.Feshchenko, R.N. Eremin, **O.O. Erokhina**, V.M. Dydin // *Metallurgist*. 2020. (64). С. 615-622. DOI: 10.1007/s11015-020-01037-1

Фещенко Р.Ю. Анализ состава шихты электродной массы / Р.Ю. Фещенко, Е.А. Фещенко, Р.Н. Еремин, О.О. Ерохина, В.М. Дыдин // *Металлург*. 2020. (64). С. 615-622. DOI: 10.1007/s11015-020-01037-1

Соискателем проведен анализ влияния сырья электродной продукции на его качество в ходе эксплуатации. Определены основные компоненты среднетемпературного каменноугольного пека и их влияние на качество готового изделия. Определено, что выгорание каменноугольного пека происходит при более низких температурах (от 550 °С до 700 °С), что обуславливается более высокой степенью дефектности структуры. При более высоких температурах более ярко выражен процесс горения наполнителя – нефтяного кокса, в связи с чем происходит изменение механизма окисления изделия.

4. Feshchenko, R.Y. Improvement of oxidation resistance of arc furnace graphite electrodes / R.Y.Feshchenko, **O.O. Erokhina**, I.O.Litavrin, S.V. Ryaboshuk // *Chernye Met*. 2023. С. 31-36. (Фещенко, Р.Ю. Повышение окислительной стойкости электродов электродуговых печей / Р.Ю. Фещенко, О.О. Ерохина, И.О. Литаврин, С.В. Рябошук // *Черные металлы*. 2023. С. 31-36). DOI: 10.17580/chm.2023.07.03

Соискателем проведен анализ способов повышения окислительной стойкости и их применимость для электродов электродуговых печей. Доказана эффективность использования покрытий, содержащих до 30 мас.% карбидообразующих оксидов и от 70 мас.% каменноугольного пека. Определено, что формирование такого защитного покрытия позволяет повысить окислительную стойкость в 1,5 раза. В случае модернизации

действующих переделов пропитки каменноугольного пека снижение себестоимости изготавливаемого металла может составлять до 1%.

Патенты на объекты интеллектуальной собственности:

5. Патент № 2788294 Российская Федерация, МПК С25В 11/04 (2006.01). Способ защиты графитированных электродов от высокотемпературного окисления: №2022117444: заявл. 28.06.2022, опубл. 17.01.2023/ О.О. Ерохина, Р.Ю. Фещенко, Н.А. Пирогова, Р.Н. Еремин; заявитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 9 с

Соискателем определены оптимальные режимы формирования защитного покрытия на поверхности электродов марки УНР, включающие пропитку смесью среднетемпературного пека и до 30 мас.% одного или нескольких оксидов (хрома, кремния, титана), предварительно нагретой до 160 °С, дальнейший нагрев до 300 °С в автоклаве и последующую выдержку в закрытом реакторе 2 ч при избыточном давлении 5,5 атм при температуре 300 °С и термообработку в коксовой пересыпке со скоростью нагрева 2,5 °С/мин и выдержку при температуре 1250 °С на протяжении 2 ч.

В диссертации Ерохиной Ольги Олеговны отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от: старшего научного сотрудника лаборатории пирометаллургии ООО «Институт Гипроникель», к.т.н. **Р.А. Пахомова**; индивидуального предпринимателя, к.т.н. **С.Н. Федорова**; руководителя по развитию продуктовой линейки ООО «ТЕМП», к.т.н. **А.В. Саитова**; технического директора ООО «ТТЛ» **А.Б. Логачева**.

В отзывах дана положительная оценка диссертационного исследования, отмечена актуальность выбранной темы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационного исследования, однако отмечен ряд вопросов и замечаний:

1. Чем обусловлен ступенчатый характер окисления образца, представленного в автореферате на рисунке 2 стр. 11? (к.т.н. **Р.А. Пахомов**);

2. Выбранный масштаб изображений, представленных на рисунке 4 страницы 12 предполагает, что более интенсивное окисление электрода реализуется при температуре ниже 700 °С, когда развитие получают только зоны связующего электродной массы. Как соотносятся скорости окисления графитовых электродов для температур до 700 °С и диапазоне 800-1100 °С? (к.т.н. **Р.А. Пахомов**);

3. Какая методика описывает оценку стойкости графитовых образцов электрода при взаимодействии с наждачной бумагой в количестве 50 повторений? Или данная методика была разработана в ходе исследований? Как изменение количества повторений или крупности зерна влияет на

проведение сравнительной характеристики стойкости электродной массы? (к.т.н. **Р.А. Пахомов**);

4. Проводилось ли моделирование при использовании ПО Ansys для восстановления диоксида титана, так как представленная температура 1400 °С, безусловно выявляется с точки зрения термодинамики и свободной энергии Гиббса корректной, однако карбидизация диоксида титана получает свое развитие при существенно более высоких температурах 1700-2100 °С? (к.т.н. **Р.А. Пахомов**);

5. Где могут применяться покрытия на основе карбидов титана и хрома, если обратные процессы окисления на воздухе получают свое развитие при температурах 350-900 и 600-1200 °С? (к.т.н. **Р.А. Пахомов**);

6. Насколько значительное влияние оказывает окисление графитовых электродов, используемых в металлургии, на парниковый эффект и глобальное изменение климата при условии, что по данным открытых источников производство графитовых электродов не превышает 1 млн. т в год, а потребление мировое угля составляет 8,3 млрд. т. (к.т.н. **Р.А. Пахомов**);

7. Какие принципиальные отличия у разработанной установки для оценки окислительной стойкости от оборудования, используемого для определения скорости окисления ядерного графита? (к.т.н. **С.Н. Федоров**);

8. Для каких условий эксплуатации применима модель изменения сечения электрода во времени (формула 1, стр. 12)? (к.т.н. **Федоров С.Н.**);

9. Может ли применяться модель изменения сечения электрода во времени (формула 1, стр. 12) для электродов с нанесенными защитными покрытиями? (к.т.н. **С.Н. Федоров**);;

10. В автореферате представлены данные по исследованию карбидообразующих оксидов в качестве компонентов покрытия. Возможно ли использование некарбидообразующих оксидов в случае эксплуатации электродов без токовой нагрузки? Будут ли подобные решения эффективными для защиты электродов? (к.т.н. **А.В. Саитов**);

11. Какие преимущества есть у карбидообразующих оксидов в случае эксплуатации в электродуговых печах? (к.т.н. **А.В. Саитов**);

12. Какие факторы могут повлиять на экономическую эффективность предлагаемого решения? (к.т.н. **А.В. Саитов**);

13. На стр. 11 указано, что для разработанной установки по оценке скорости окисления образцов графитизированных электродов используются образцы кубической формы с длиной ребра 40 мм. В дальнейшем для модели изменения сечения электрода во времени (стр. 12) производится пересчет с кубической формы образца на цилиндрическую. Почему изначально установка разрабатывалась именно для образцов кубической формы? (**А.Б. Логачев**);

14. Исследовалась ли степень восстановления оксидов в зависимости от различных условий (температуры, содержания графитовой фазы и других)?

Будет ли влиять на окислительную стойкость степень восстановления оксидов? (А.Б. Логачев).

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием исследований и публикаций по теме диссертационной работы и их компетентностью в области диссертационного исследования.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан новый подход к повышению окислительной стойкости электродов электродуговых печей, включающий в себя формирование защитного покрытия на поверхности электрода;

предложена замена части каменноугольного пека на этапе пропитки электродов электродуговых печей карбидообразующими оксидами, с целью формирования стойкого к окислению защитного покрытия;

доказана перспективность использования разработанной технологии формирования защитных покрытий на предприятиях производства и эксплуатации электродов электродуговых печей.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:
доказана разработкой методики и установки для оценки скорости окисления графитизированных электродов;

применительно к проблематике диссертации результативно **использован** комплекс теоретических и практических методов исследования, включающих в себя термодинамический и кинетический анализ, методы аналитической химии (рентгенофлуорисцентный анализ, комплексный термический анализ, сканирующую электронную микроскопию), компьютерное моделирование, экспериментальные исследования;

изложены условия формирования стойкого к механическому воздействию защитного покрытия на поверхности электродного графита: содержание до 30 мас.% карбидообразующих оксидов, остальное – связующее, имеющее сродство к углеграфитовым материалам (каменноугольный пек);

раскрыто влияние температуры на механизмы окисления электродного графита, в том числе интенсивное окисление связующего при температурах до 800 °С и смешанный режим окисления в диапазоне от 800 °С до 1100 °С.

изучены факторы, влияющие на формирование стойкого к окислению покрытия, предложена технологическая схема формирования защитного покрытия на поверхности электродов электродуговых печей;

проведена модернизация существующей модели оценки окислительной стойкости электродов электродуговых печей с целью определения срока службы цилиндрических электродов при задании их геометрических и физических параметров.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработана и внедрена математическая модель изменения сечения электрода во времени, которая может быть использована для прогнозирования срока службы электродов на предприятиях;

определены перспективы практического использования разработанного способа повышения окислительной стойкости электродов дуговых печей на предприятиях, которые их производят и эксплуатируют;

создана система практических рекомендаций по повышению срока службы электродов электродуговых печей и снижению экономических издержек, связанных с их расходом за счет формирования защитного покрытия на поверхности электродов электродуговых печей;

представлены предложения по дальнейшему совершенствованию технологии и снижению затрат на ее реализацию благодаря возможности использования техногенных отходов в качестве сырья, выделены требования к материалам, используемым для формирования покрытия.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

результаты получены с использованием сертифицированного оборудования. Полученные данные характеризуются воспроизводимостью в различных условиях;

теория построена на известных и проверяемых данных, изложенных в актуальных научных источниках информации и в результате использования специализированного программного обеспечения;

идея базируется на анализе практики оценки механизмов окисления изделий из углеграфитовых материалов, эксплуатируемых в ядерной энергетике, обобщении передового опыта формирования защитных покрытий на поверхности изделий из графита с целью снижения скорости его окисления;

использовано сравнение авторских данных с данными по механизмам окисления различных марок искусственного графита и повышению их окислительной стойкости в промышленности;

установлено поведение электродных марок графита при высокотемпературном окислении и повышение окислительной стойкости электродных марок графита при использовании более дешевой технологии нанесения защитного покрытия;

использованы современные методики сбора и обработки исходной информации, компьютерное моделирование.

Личный вклад соискателя состоит в: разработке идеи формирования защитного покрытия, содержащего каменноугольный пек и карбидообразующие оксиды, участие на всех этапах процесса, в том числе при получении исходных данных и в научных экспериментах, при апробации результатов исследования, разработке основных элементов экспериментальных стенов и установок, обработке и интерпретации экспериментальных данных, подготовке основных публикаций по выполненной работе.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Ерохина О.О. ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию.

На заседании 25.12.2024 диссертационный совет принял решение присудить **Ерохиной О.О.** ученую степень кандидата технических наук за решение научной задачи – разработку нового подхода к снижению расходования графитизированных электродов, эксплуатируемых в дуговых печах, имеющей существенное значение для развития экономики страны, и поддержания технологического суверенитета государства.

При проведении тайного голосования с использованием информационно-коммуникационных технологий диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 10 докторов наук (по научной специальности рассматриваемой диссертации), участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 19, против – нет.

Председатель
диссертационного совета



Ученый секретарь
диссертационного совета

Сизяков
Виктор Михайлович

Николаева
Надежда Валерьевна

25.12.2024 г.