

На правах рукописи



ЗАЙЦЕВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ
МУЛЛИТ-КАРБОРУНДОВОГО СОСТАВА
С ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ**

**2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких
неметаллических материалов**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Строкова Валерия Валерьевна

Официальные оппоненты **Яценко Елена Альфредовна,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», заведующий кафедрой «Общая химия и технология силикатов»

Волокитин Олег Геннадьевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», профессор кафедры «Прикладная механика и материаловедение»

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»

Защита состоится «07» октября 2025 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.276.01 при ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Адрес: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. ГК 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БГТУ им. В.Г. Шухова и на сайте: http://gos_att.bstu.ru/dis/Zaytsev.

Автореферат разослан «09» июля 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук



В.А. Полуэктова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Развитие отраслей промышленности, таких как тепловая и атомная энергетика, черная и цветная металлургия, стекольная и химическая промышленность, диктует необходимость создания новых материалов, которые обладали бы не только высокими техническими и эксплуатационными характеристиками, но и были экологически безопасны и экономичны в использовании. При этом для всех вышеуказанных отраслей общим требованием к композиционным материалам является высокая устойчивость к агрессивной среде при высоких температурах. Традиционными материалами для этих целей являются керамические композиты, которые могут обладать необходимым набором свойств, подходящих для конкретной области применения. Однако зачастую такие материалы работают на пределе своих возможностей, что требует совершенствования технологических решений с целью придания огнеупорным материалам заданных свойств.

В этой связи перспективными направлениями являются, во-первых, использование в огнеупорных массах искусственных керамических вяжущих (ИКВ), а во-вторых, формирование структурно-сопряженных покрытий на поверхности керамических изделий. Сочетание различных способов модифицирования дает возможность получения огнеупорных композитов с заданными характеристиками.

Таким образом, актуальной задачей является разработка технологии получения высокоглиноземистых огнеупоров на основе искусственных керамических вяжущих муллит-карборундового состава и высокоглиноземистого шамота как заполнителя, а также технологии нанесения защитных структурно-сопряженных покрытий из корунда и шпинели с целью повышения коррозионной устойчивости к корродиям стекольной и металлургической промышленности.

Работа выполнялась при финансовой поддержке в рамках реализации: гос. задания Минобрнауки РФ № FZWN-2023-0006; комплексного проекта № 30/22 по Соглашению № 075-11-2023-017; ПСР № АААА-А17-117121370050-2; ФЦП ГК № 14.740.11.1076.

Степень разработанности темы. Расширение ассортимента огнеупорных материалов, способных эффективно функционировать при высоких температурах в условиях агрессивных сред, является предметом исследований как российских, так и зарубежных научных школ. Значительное количество научных исследований как отечественных, так и зарубежных ученых, сосредоточено на разработке методов и технологий, направленных на повышение их долговечности и устойчивости к агрессивным условиям эксплуатации, в основном путем оптимизации состава огнеупорных масс. Однако задача повышения коррозионной стойкости огнеупорных изделий, соответствующих современным требованиям металлургической и стекольной промышленности, все еще остается весьма актуальной. С другой стороны, в качестве перспективных способов повышения долговечности различных материалов рассматриваются термические и газодинамические методы нанесения функциональных покрытий, которые в контексте применения в технологии

огнеупоров являются малоизученными.

Цель работы. Разработка технологии высокоглиноземистых огнеупоров на основе искусственных керамических вяжущих муллит-карборундового состава с корундовым и шпинелевым защитным покрытием, обеспечивающей улучшение физико-механических и коррозионных характеристик изделий.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- исследование технологических особенностей синтеза искусственных керамических вяжущих на основе высокоглиноземистого шамота и карбида кремния;

- установление влияния компонентов сырьевой смеси – ИКВ муллит-карборундового состава и заполнителя из высокоглиноземистого шамота, на формирование структуры, фазовый состав и свойства огнеупорных материалов;

- разработка технологических параметров формирования детонационных покрытий состава Al_2O_3 и $MgAl_2O_4$ на поверхности высокоглиноземистых шамотных огнеупоров;

- оценка стойкости высокоглиноземистых шамотных огнеупоров с защитным покрытием к воздействию силикатных расплавов.

Научная новизна работы. Разработано научно обоснованное технологическое решение, обеспечивающее получение высокоглиноземистых огнеупоров на основе искусственных керамических вяжущих (ИКВ) муллит-карборундового состава и заполнителя из высокоглиноземистого шамота с защитными структурно-сопряженными покрытиями корунда и шпинели из порошков глинозема и смеси глинозема и периклаза, формируемыми методом детонационного напыления, что позволяет получать изделия с повышенными физико-механическими и коррозионными характеристиками.

Установлен характер влияния технологии получения и состава ИКВ системы Al_2O_3 - SiO_2 - SiC на процессы структурообразования суспензии и защитного слоя материала после обжига. Совместный постадийный мокрый помол карбида кремния и высокоглиноземистого шамота, за счет различия в твердости, обеспечивает повышение интенсивности измельчения и увеличение объемной концентрации твердой фазы по сравнению с отдельным помолом. Выявлено рациональное соотношение SiC/Al_2O_3 - SiO_2 (30/70 %), при котором: происходит изменение характера реологического поведения с тиксотропно-дилатантного на тиксотропный, сопровождающееся резким снижением эффективной вязкости; после обжига при 1300 °С на поверхности в результате кристаллизации муллита формируется защитный слой, обеспечивающий снижение открытой пористости (до 2–3 %) и уменьшение степени окисления SiC в процессе эксплуатации.

Выявлены особенности механизма формирования структурно-сопряженных покрытий на огнеупоре методом детонационного напыления. При нанесении порошков глинозема и смеси глинозема и периклаза (79:21 %) происходит формирование высокотемпературных покрытий: для корундового покрытия – полиморфный переход γ - Al_2O_3 в α - Al_2O_3 с остаточной фазой γ - Al_2O_3 (23 %); для шпинельного – за счет диффузионного взаимодействия между MgO и γ - Al_2O_3 с сохранением избыточного периклаза (11 %).

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические представления о технологии огнеупорных материалов в части расширения спектра сырьевых компонентов за счет использования ИКВ на основе карбида кремния и высокоглиноземистого шамота, а также применения технологии детонационного напыления для создания защитных покрытий.

Разработана технология получения ИКВ на основе высокоглиноземистого шамота и карбида кремния, заключающаяся в совместном постадийном помолу компонентов в соотношении 70:30 % при влажности 13 % с получением суспензии плотностью 2,41 г/см³, объемной концентрации твердой фазы 0,65, содержанием частиц менее 100 нм 1,2 %, остатком на сите № 0,063 менее 4 %. Предел прочности при сжатии отливок ИКВ после обжига при 1300 °С составляет 131 МПа.

Разработаны составы огнеупорных масс для вибро- и полусухого прессования на основе ИКВ и заполнителя из высокоглиноземистого шамота с соотношением 50:50 % и влажностью 6,9 %, которые при удельном давлении прессования 0,1 МПа и 50 МПа, соответственно, температуре обжига 1300 °С, позволяют получать изделия с низкими показателями открытой пористости – 12 и 14 %, соответственно, усадкой при обжиге – 0,35 %, пределом прочности при сжатии 78 и 80 МПа.

Определены оптимальные технологические режимы детонационного нанесения защитных керамических покрытий на поверхности высокоглиноземистых огнеупоров с применением многокамерного кумулятивно-детонационного устройства (МКДУ): соотношение рабочей взрывчатой смеси газов – $O_2/C_3H_8=5,4$; длина ствола / диаметр сопла 500/16 мм; частота импульсов 20 Гц; дистанция напыления 50 мм; количество проходов 16; скорость перемещения по напыляемой поверхности 33 мм/с. В результате на поверхности высокоглиноземистого огнеупора формируются плотные покрытия корунда и шпинели с ламельной структурой, снижающие шероховатость поверхности огнеупора на 45 %, средней толщиной ~300 мкм, пористостью <3 %, микротвердостью ~13 ГПа, адгезионной прочностью ~5 МПа, обеспечивающие повышение коррозионной устойчивости рабочей поверхности высокотемпературных агрегатов к воздействию корродиентов металлургического и стекольного производства в 2 раза.

Разработана установка для оценки смачиваемости поверхности огнеупорных материалов, позволяющая использовать в качестве тестовых жидкостей высокотемпературные силикатные расплавы.

Методология и методы исследования. Синтез ИКВ осуществляли в шаровой мельнице с корундовой футеровкой и мелющими телами по технологии постадийного помола. Напыление покрытий проводили с использованием уникальной научной установки (УНУ) БГТУ им. В.Г. Шухова – многокамерной кумулятивной детонационной установки «МКДУ-500». Для изучения химического и минерального состава сырьевых и синтезированных материалов применялись современные методы и аналитическое оборудование (СЭМ TESCAN MIRA 3 LMU, дифрактометр «ARL X'TRA»). Оценка физико-механических свойств вяжущих и огнеупоров осуществлялась согласно

соответствующей нормативной документации и общепринятых методов. Оценка смачиваемости поверхности материалов расплавами проводилась на разработанной установке.

Положения, выносимые на защиту:

- научно обоснованное технологическое решение, обеспечивающее получение высокоглиноземистых огнеупоров на основе ИКВ муллит-карборундового состава и заполнителя из высокоглиноземистого шамота с защитным покрытием из корунда и шпинели;
- технологические особенности получения и закономерности изменения реологических характеристик ИКВ системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-SiC}$;
- характер влияния состава ИКВ на структурообразование защитного слоя материала после обжига;
- составы огнеупорных масс для вибро- и полусухого прессования на основе ИКВ и заполнителя из высокоглиноземистого шамота;
- особенности механизма формирования структурно-сопряженных покрытий методом детонационного напыления;
- технологические режимы детонационного нанесения защитных керамических покрытий на поверхности высокоглиноземистых огнеупоров и их свойства;
- установка для оценки смачиваемости поверхности огнеупорных материалов силикатными расплавами.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается тем, что экспериментальные исследования проведены в аттестованных лабораториях на оборудовании, имеющем сертификаты, удостоверяющие их соответствие российским стандартам; использованием современных стандартных и оригинальных методов, приборов и технических средств; многократным повторением экспериментов; статистической обработкой экспериментальных данных; отсутствием противоречий с основными физико-химическими и материаловедческими положениями и закономерностями.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации представлены и обсуждены на следующих научных мероприятиях: XXXVI Гагаринские чтения (Москва, 2010); XXI Всероссийское совещание по температуреустойчивым функциональным покрытиям (Санкт-Петербург, 2010); Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Керамика и огнеупоры: перспективные решения и нанотехнологии» (Белгород 2010); II Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов» (Харьков, 2011); Международная научно-практическая конференция «Инновационные материалы и технологии» (Белгород, 2011); VIII Международный молодежный форум «Образование, наука, производство» (Белгород, 2016); Международная конференция огнеупорщиков и металлургов «Новые огнеупоры» (Москва, 2017); XXVIII, XXXI–XXXIV Международные конференции «Огнеупоры для промышленности» (Москва, 2019, 2022–2025); XXI Всероссийская научно-практическая конференция с между-

народным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» (Москва, 2024).

Внедрение результатов исследований. С целью внедрения результатов работы разработаны технологические регламенты на: производство ИКВ на основе карбида кремния и высокоглиноземистого шамота; производство огнеупоров на основе ИКВ и заполнителя из высокоглиноземистого шамота; нанесение защитных покрытий методом детонационного напыления.

Выпуск опытных партий ИКВ и огнеупоров осуществлен на предприятии ООО «Техкерам» (г. Белгород), а также огнеупоров с покрытием на уникальной установке рег. № 3552744 ЦКП БГТУ им В.Г. Шухова. Испытания опытно-промышленной партии изделий, изготовленных по разработанной технологии, проведены в лаборатории экспериментального литья ЦКП «Технологии и материалы НИУ «БелГУ» (г. Белгород).

Теоретические и экспериментальные результаты используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлениям «Химическая технология», «Материаловедение и технологии материалов».

Публикации. Результаты исследований, отражающие основные положения диссертационной работы, изложены в 19 научных работах, в том числе 10 статей в журналах, входящих в перечни рецензируемых научных изданий и международных реферативных баз, рекомендованных ВАК РФ, получен патент РФ на изобретение.

Личный вклад. Автором теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность и эффективность получения ИКВ на основе карбида кремния и высокоглиноземистого шамота, а также покрытий из корунда и шпинели на поверхности огнеупорных материалов.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, основной части (пять глав), заключения, списка литературы, приложений. Результаты изложены на 221 странице машинописного текста, включающего 17 таблиц, 69 рисунков, список литературы из 214 источников, 7 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Создание высокоэффективного композиционного (двухслойного) огнеупорного материала с увеличенным сроком службы и повышенной надежностью в экстремальных условиях эксплуатации возможно благодаря, с одной стороны, оптимальному соотношению компонентов по химическому и гранулометрическому составу как в составе искусственного керамического вяжущего, так и в огнеупорной массе на его основе, что позволит улучшить технологические характеристики огнеупорных масс в части оптимизации гранулометрического состава и реологических свойств и повысить физико-механические свойства непосредственно огнеупоров, а с другой – рациональному выбору состава и режимов нанесения порошков методом детонационного напыления при создании структурно-сопряженного покрытия, обеспечивающего защитную функцию от эрозии, коррозии и термических воздействий при высоких температурах эксплуатации огнеупоров.

Сырьевые материалы и методы исследования. Для синтеза искусственных керамических вяжущих (ИКВ) использовались карбид кремния (ТУ 3989-040-00220931-2007, черного цвета) и высокоглиноземистый шамот марки ШВГ-77 (соответствующий ТИ 199-0-4-01-2004). Шамот также использовался в качестве заполнителя.

ИКВ получали путем мокрого помола с постадийной загрузкой материала, что способствовало достижению оптимальной степени измельчения и обеспечивало стабильность суспензии за счет равномерного распределения частиц твердой фазы в жидкой среде.

Зерновой состав твердой фазы ИКВ анализировался на лазерном анализаторе размеров частиц FRITTSCH Analysette 22 NanoTec plus в соответствии с ГОСТ 8.777–2011. Реологические характеристики ИКВ измерялись с использованием ротационного вискозиметра «Реотест-2» с системой коаксиальных гладких цилиндров.

Процесс формования огнеупорных материалов включал методы вибро- и полусухого прессования в соответствии с общепринятыми методиками.

В качестве контрольного использовался заводской состав огнеупора МКС-72, включающий не более 72 % Al_2O_3 , не более 1,5 % Fe_2O_3 , открытой пористостью 24 %, линейной усадкой при температуре 1600 °С не более 3 % и пределом прочности при сжатии не менее 30 МПа.

Для напыления структурно-сопряженных корундовых ($\alpha-Al_2O_3$) и шпинелевых ($MgAl_2O_4$) покрытий с помощью «МКДУ-500» использовали порошки глинозема ($\gamma-Al_2O_3$) и смеси глинозема с периклазом (MgO) в весовом соотношении 71:29, соответственно.

Физико-механические свойства образцов определялись согласно стандартным методикам по ГОСТ 2409-95, ГОСТ 4071.1-94.

Огнеупорные материалы подвергались испытаниям на стекло- и шлакоустойчивость статическими методами при температуре 800–1400 °С в течение 1 часа. Стеклоустойчивость образцов анализировалась в расплаве боросиликатного стекла; шлакоустойчивость – при воздействии шлака ОЭМК при температуре 1400 °С.

Разработка состава и оценка свойств ИКВ системы $Al_2O_3-SiO_2-SiC$.

Для оценки влияния соотношения сырьевых компонентов на свойства, искусственные керамические вяжущие получали раздельным постадийным помолом карбида кремния и высокоглиноземистого шамота с последующим смешением полученных суспензий с шагом 10 %. Анализ реологических характеристик показал (рис. 1), что при повышенных концентрациях в суспензии шамотного ИКВ (ш-ИКВ) от 60 до 80 % происходит существенное снижение эффективной вязкости (в 6–10 раз) при всех значениях градиента скорости сдвига. При дальнейшем повышении концентрации ш-ИКВ в суспензии (более 80 %) наблюдается повышение эффективной вязкости в 4–5 раза.

При этом, соотношение сырьевых компонентов в ИКВ не влияет на изменение типа течения (тиксотропный, дилатантный). Стоит отметить что суспензия, состоящая из 30 % карборундового ИКВ и 70 % шамотного ИКВ, характеризуется ярко выраженным тиксотропным характером течения. Такой тип течения суспензии обеспечивает эффективное прессование на основе ИКВ.

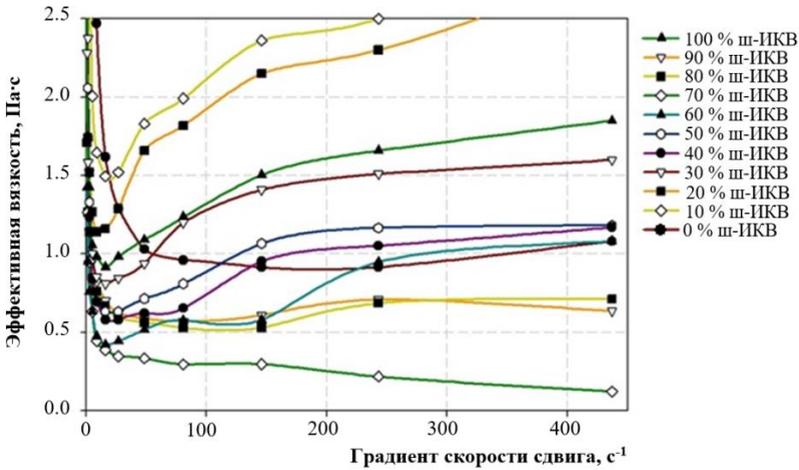


Рис. 1. Реологические характеристики ИКВ, полученных раздельным помолом карборундового и шамотного ИКВ в зависимости от содержания последнего

Анализ образующихся минеральных фаз на поверхности отливок при температуре 1300 °С показал, что с увеличением концентрации шамотного ИКВ до 30 % происходит процесс частичного окисления карбида кремния с образованием кремнезема, который переходит в полиморфную модификацию кристобалита. При дальнейшем повышении концентрации ш-ИКВ более 30 % в ИКВ, часть кремнезема, образующегося при окислении карбида кремния, вступает в реакцию с корундом, присутствующим в шамоте, в результате чего происходит образование муллита. Следует отметить, что наиболее выраженные изменения фазового состава наблюдаются в образцах с соотношением карбид-кремниевое ИКВ 30 % и шамотного ИКВ 70 %, о чем свидетельствует наличие отражений карборунда отсутствие отражений кристобалита и увеличение интенсивности дифракционных пиков муллита. В результате, на поверхности образцов происходит синтез тонкой пленки муллита, которая препятствует дальнейшему окислению карбида кремния и тем самым существенно снижает открытую пористость образцов (рис. 2, а).

Повышение содержания в системе шамотного ИКВ до 70 % приводит к увеличению усадки образцов на 1,5–2,0 % и прочности отливок в 3 раза (рис. 2, б), при этом открытая пористость снижается на 5–6 % при температуре 1100–1200 °С и в 10–12 раз при температуре 1300 °С. При дальнейшем повышении содержания в шамотного ИКВ происходит увеличение усадки образцов, при этом пористость возрастает незначительно (на 2–3 %) при 1100–1200 °С, а при 1300 °С наблюдается рост в 8–10 раз. Предел прочности при сжатии, в данном интервале повышения концентрации шамотного ИКВ, незначительно уменьшается или практически не изменяется. Следует отметить, что практически во всем диапазоне изменения содержания шамотного ИКВ, независимо от температуры обжига, происходит увеличение массы образцов,

что свидетельствует о частичном окислении карбида кремния с дополнительным образованием муллита.

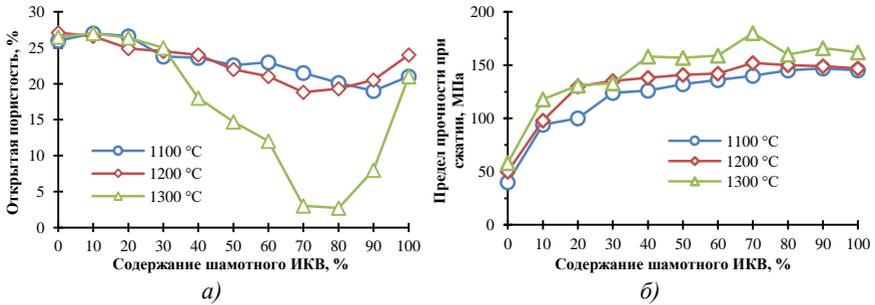


Рис. 2. Зависимость открытой пористости (а) и предела прочности при сжатии (б) образцов ИКВ системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-SiC}$, полученных раздельным помолом и обожженных при 1100, 1200 и 1300 °С, от содержания в системе шамотного ИКВ

Таким образом, рациональный состав ИКВ, полученного по технологии раздельного помола, включает 30 % карборундового и 70 % шамотного ИКВ.

С целью оптимизации технологического процесса в части сокращения количества операций и снижения производственных затрат, проведена *сравнительная оценка ИКВ рационального состава, полученных раздельным и совместным помолом*. При совместном помоле за счет разнородности в твердости исходных материалов и самоизмельчения при влажности 13 %: вязкость суспензии уменьшается на 28 % (рис. 3); плотность возрастает с 2,38 до 2,41 г/см³, объемная концентрация твердой фазы увеличивается с 0,63 до 0,65; содержание частиц менее 100 нм увеличивается с 0,64 до 1,2 %; остаток на сите № 0,063 уменьшается с 4,5 до менее 4,1 %.

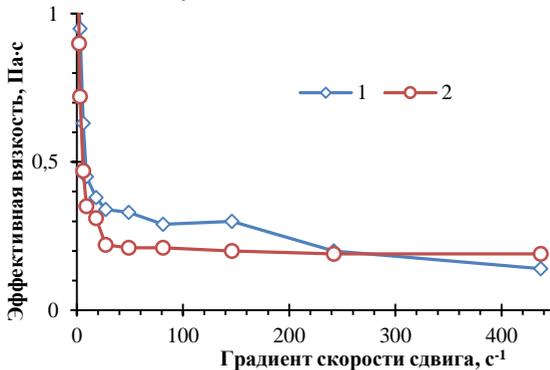


Рис. 3. Реологические характеристики ИКВ системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-SiC}$, полученные раздельным (1) и совместным (2) помолом

Таким образом, разработано муллит-карборундовое ИКВ, полученное по технологии совместного постадийного мокрого помола, с оптимальным содержанием карбида кремния и высокоглиноземистого шамота (30 и 70 %), характеризующееся минимальным значением эффективной вязкости и тиксотропным характером течения. Отливки ИКВ после обжига при

температуре 1300 °С обладают пределом прочности при сжатии 131 МПа.

Разработка и исследование структурно-механических свойств огнеупорных композитов на основе муллит-карборундового ИКВ. При формировании структуры огнеупорных материалов важную роль играет зерновой состав заполнителя. В этой связи при разработке композитов на основе ИКВ муллит-карборундового состава был подобран оптимальный трехфракционный зерновой состав заполнителя, в качестве которого использовали высокоглиноземистый шамот с аналогичным содержанием Al_2O_3 , как и для получения вяжущего. Оптимальный зерновой состав характеризовался следующим содержанием фракций: <0,25 мм – 60 %, 1,25–0,25 мм – 20 % и 2,5–1,25 мм – 20 %. В зависимости от способа формования коэффициенты упаковки ($K_{уп}$) и уплотнения ($K_{упл.}$) составили: при вибропрессовании (давление 0,1 МПа) $K_{уп}=0,54$, $K_{упл.}=1,35$; при полусухом прессовании (давление 50 МПа) $K_{уп}=0,55$; $K_{упл.}=1,23$.

Исследование свойств формовочных масс различного состава на основе муллит-карборундового ИКВ и полифракционного заполнителя (табл. 1) показало следующее. С увеличением содержания суспензии с 30 до 50 % происходит снижение открытой пористости на

44–45 % до минимального значения 12–14 %, при этом повышается кажущаяся плотность и прочность при сжатии до максимальных значений – 2,50–2,55 г/см³ и 78–80 МПа, соответственно (рис. 4). При дальнейшем увеличении количества вяжущего от 50 до 70 % происходит ухудшение всех свойств. Из вышеизложенного следует, что оптимальная концентрация вяжущего в формовочной массе, не взирая на способ формования, составляет 50 %, при этом образцы характеризуются максимальными значениями прочности и плотности, минимальной пористостью 14,4–12,0 %, а огневая усадка не превышает 0,35 %.

Таким образом, по результатам проведенных исследований физико-механических свойств экспериментальных составов, подвергнутых термообработке при 1300 °С, было установлено, что как для вибро-, так и для полусухого прессования эффективным является состав, включающий 50 % ИКВ на основе тройной системы $SiO_2-Al_2O_3-SiC$ и 50 % полифракционного заполнителя из высокоглиноземистого шамота, обеспечивающий следующие значения характеристик огнеупоров: $P_{отк}=14,4$ и 12 %, $\sigma_{сж}=78$ и 80 МПа соответственно.

Исследование устойчивости огнеупорных композитов на основе муллит-карборундового ИКВ к агрессивным средам. Одним из главных показателей, определяющих эффективность футеровок, является их коррозионная стойкость, т.е. способность сохранять свои эксплуатационные свойства при взаимодействии с любыми агрессивными химическими продуктами произ-

Таблица 1. Составы огнеупорных композитов для вибро- и полусухого прессования

№ сост.	Содержание вяжущего, %	Содержание заполнителя, %	Формовочная влажность массы, %
1	70	30	9,7
2	60	40	8,3
3	50	50	6,9
4	40	60	5,5
5	30	70	4,2

водства. Это требование означает, что при прямом контакте футеровки с расплавами материал огнеупора не должен вступать с ними в реакции химического взаимодействия любого типа (окисления-восстановления, замещения, присоединения и др.).

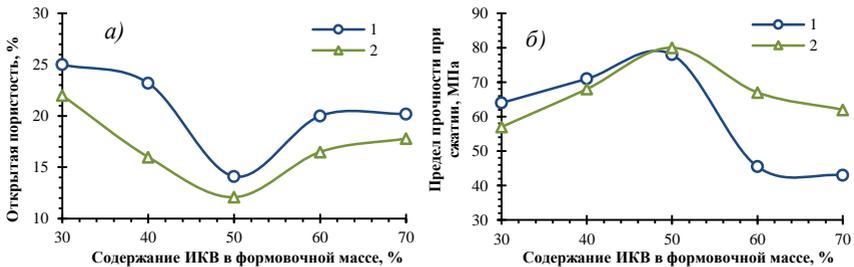


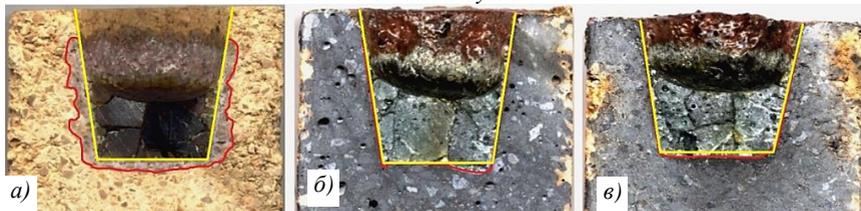
Рис. 4. Зависимость открытой пористости (а) и предела прочности при сжатии (б) образцов, отформованных вибро- (1) и полусухим прессованием (2), термообработанных при температуре 1300 °С от содержания ИКВ в формовочной массе

Оценку смачиваемости поверхности огнеупорных композитов проводили на разработанной установке, позволяющей использовать в качестве тестовых жидкостей высокотемпературные расплавы. В частности, в рамках данной работы оценку проводили при температуре 1400 °С с применением в качестве тестовых жидкостей расплавов боросиликатного стекла ЗАО «Борисовское стекло» и электрометаллургического шлака воздушно-сухого охлаждения ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат». Расплавы моделируют условия, встречающиеся в металлургической и стекольной промышленности, и существенно различаются по поверхностному натяжению и кислотно-основным свойствам.

Анализ результатов показал, что в случае испытаний с расплавом стекла экспериментальные образцы демонстрируют статический характер поведения капли расплава в течение всего времени контакта с поверхностью и меньшую смачиваемость по сравнению с заводским составом, что указывает на слабое взаимодействие с расплавом и, как следствие, обеспечит более высокую коррозионную стойкость.

Испытание разработанных огнеупоров на устойчивость к расплаву стекла и шлакоустойчивость проводили тигельным методом при 1400 °С с выдержкой 2 часа. Результаты (рис. 5) показали, что материал тиглей на основе ИКВ практически не подвержен разъеданию и пропитке расплавами боросиликатного стекла и шлака по сравнению с заводскими образцами. Для тиглей разработанных составов, полученных вибро- и полусухим прессованием, пропитка расплавом стекла составила 0,4 и 0,9 %, для заводского – 6,2 %; пропитка шлаковым расплавом составила 1,5 и 1,2 %, для заводского – 23,5 %, соответственно.

Испытания на стеклоустойчивость



Испытания на шлакоустойчивость

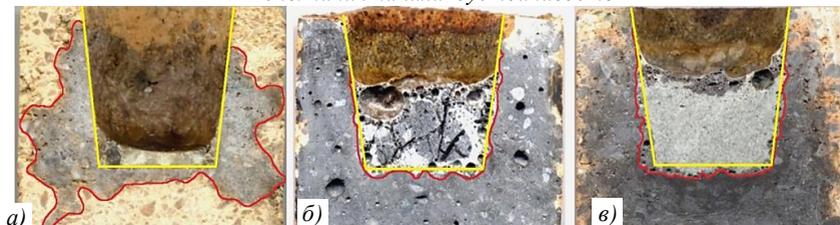


Рис. 5. Макроструктура на срезе после испытаний на стекло- и шлакоустойчивость заводского (а) и экспериментальных образцов (тигли), полученных вибропрессованием (б) и полусухим формованием (в)

Таким образом, показано, что использование в качестве вяжущего при получении огнеупорных материалов разработанного ИКВ муллит-карборундового состава существенно снижает интенсивность взаимодействия материала с расплавами боросиликатного стекла и металлургического шлака.

Разработка технологии детонационного нанесения структурно-сопряженных покрытий корунда и шпинели на огнеупорные материалы. Исследование структуры покрытий и их устойчивости к агрессивным средам. Для создания покрытий предложен метод детонационного напыления с применением многокамерного кумулятивно-детонационного устройства (МКДУ). Этот метод позволяет формировать в условиях высоких температур и скоростей нанесения покрытия толщиной до 500 мкм на поверхности огнеупорных материалов с изменением кристаллической структуры напыляемого материала. Характерной особенностью МКДУ является то, что порошок ускоряется с помощью продуктов сгорания топливной смеси пропан-бутана и кислорода, которые образуются в камерах МКДУ и сходятся перед входом в сопло, где они взаимодействуют с газопорошковым облаком. Покрытия из корунда и шпинели наносили на огнеупорные изделия, сформированные методом полусухого прессования, что позволило получить образцы с оптимальной геометрией и минимальной кривизной поверхностей. Скорость перемещения образца составляла 33 мм/с, частота детонации 20 Гц, шаг смещения 5 мм, расстояние до образца 50 мм, длина ствола – 500 мм, диаметр сопла – 16 мм.

Корундовое покрытие (рис. 6, а), полученное из порошка глинозема (γ - Al_2O_3), в основном состоит из фазы α - Al_2O_3 (корунд) с содержанием γ - Al_2O_3 (23 %) и α - Al_2O_3 (77 %). Это указывает на то, что процесс детонационного напыления вызывает фазовое (полиморфное) превращение γ - Al_2O_3 в α - Al_2O_3 .

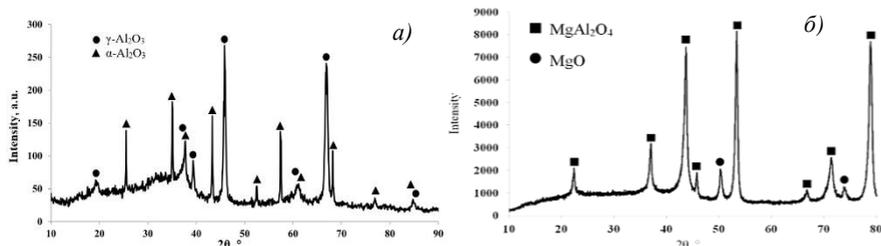


Рис. 6. Порошковая дифрактограмма покрытий: *a* – корунда; *б* – шпинели

Покрытие шпинели (рис. 6, *б*), полученное из порошков γ - Al_2O_3 (глинозем) и MgO (периклаз) в весовом соотношении 71:29, состоит из MgAl_2O_4 и остаточной фазы MgO (11 %). Фазы корунда не обнаружено, что свидетельствует о полном участии Al_2O_3 в формировании шпинельной фазы, а избыток MgO остается в виде свободной фазы периклаза. Таким образом, покрытие из алюмината магния образуется в результате реакции диффузии в твердом состоянии между MgO и γ - Al_2O_3 во время детонационного напыления.

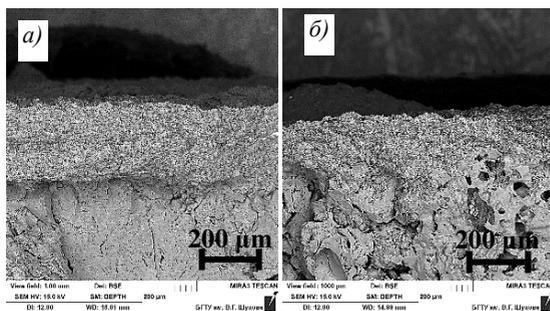


Рис. 7. Микрофотографии покрытий:
a – корунда; *б* – шпинели

Результаты анализа поперечного сечения покрытий показывают отсутствие четкой границы раздела между огнеупором и покрытием (рис. 7). Средняя толщина структурно-сопряженных покрытий Al_2O_3 и MgAl_2O_4 составляет порядка 300 мкм и 250 мкм, соответственно. Покрытия имеют пластинчатую (ламельную) структуру без видимых дефектов, таких как микротрещины и поры, с пористостью <3 %, средним значением микротвердости ~13 ГПа и адгезионной прочностью ~5 МПа, и при этом снижающие шероховатость поверхности огнеупора на 45 %.

Данные анализа EDS обоих покрытий (рис. 8) показывают равномерное распределение всех элементов в их составе. Однако в случае покрытия на основе MgAl_2O_4 заметна локализованная агрегация магния (Mg) и кислорода (O), что косвенно свидетельствует о наличии зон с повышенной концентрацией периклаза (MgO) и может влиять на свойства и эффективность покрытия. Это явление может быть связано с термодинамическими условиями во время процесса нанесения покрытия.

Оценку смачиваемости поверхности огнеупорных композитов с покрытиями проводили в температурном диапазоне от 800 до 1400 °С, с применением в качестве тестовой жидкости расплава боросиликатного стекла. Образцы на основе ИКВ, полученные методом полусухого прессования с нанесенными

покрытиями проводили в температурном диапазоне от 800 до 1400 °С, с применением в качестве тестовой жидкости расплава боросиликатного стекла. Образцы на основе ИКВ, полученные методом полусухого прессования с нанесенными

покрытиями, демонстрируют уменьшение смачиваемости благодаря низкой открытой пористости и плотной микроструктуре как самого огнеупора, так и покрытия. При этом низкая пористость корундового покрытия (~2 %) способствует меньшему проникновению расплава по сравнению со шпинелевым (пористость которого ~3,25 %).

Огнеупоры на основе ИКВ без покрытия (рис. 9, а) демонстрируют ограниченное проникновение расплава стекла благодаря низкой пористости и химической стойкости муллит-карборундовой матрицы. Однако щелочные оксиды, содержащиеся в боросиликатном стекле в расплавленном состоянии, постепенно разрушают огнеупор за счет растворения фазы SiO_2 , что приводит к потере устойчивости зерен Al_2O_3 и их последующему перемещению внутрь стекловидной массы. В тоже время, низкая открытая пористость и наличие карборундовой фазы (SiC) в составе ИКВ существенно замедляют коррозионные процессы по сравнению с заводским огнеупором МКС-72, где высокая пористость (24 %) способствует быстрому распространению расплава по капиллярам и межзерновым границам.

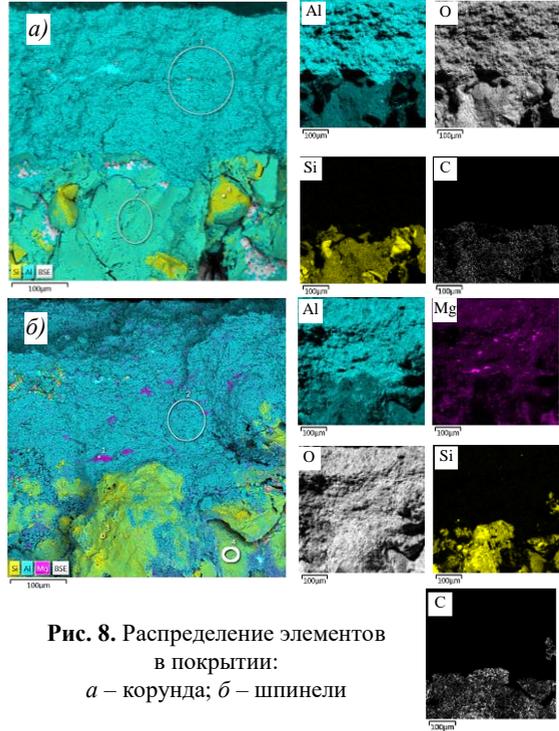


Рис. 8. Распределение элементов в покрытии:
а – корунда; б – шпинели

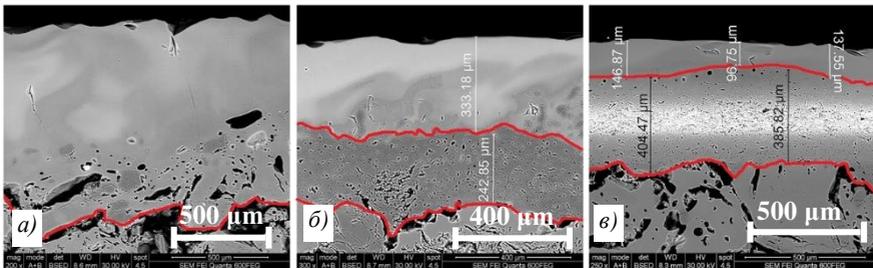


Рис. 9. Микроструктура граничных областей огнеупора и расплавленного боросиликатного стекла: а – огнеупор на основе ИКВ без покрытия, б – с покрытием $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, в – с покрытием MgAl_2O_4

В случае образца с покрытием (рис. 9, б, в) плотный слой последнего выступает в качестве барьера, замедляя проникновение расплава стекла и тем самым снижая скорость процесса коррозии и уменьшая область коррозии огнеупоров. Покрытие эффективно блокирует инфильтрацию расплава стекла в поры, что приводит к увеличению коррозионной устойчивости в 2 раза по сравнению с заводским огнеупором марки МКС-72. В результате образцы, полученные полусухим прессованием с покрытием, могут длительное время подвергаться воздействию агрессивной высокотемпературной среды без существенного ухудшения свойств.

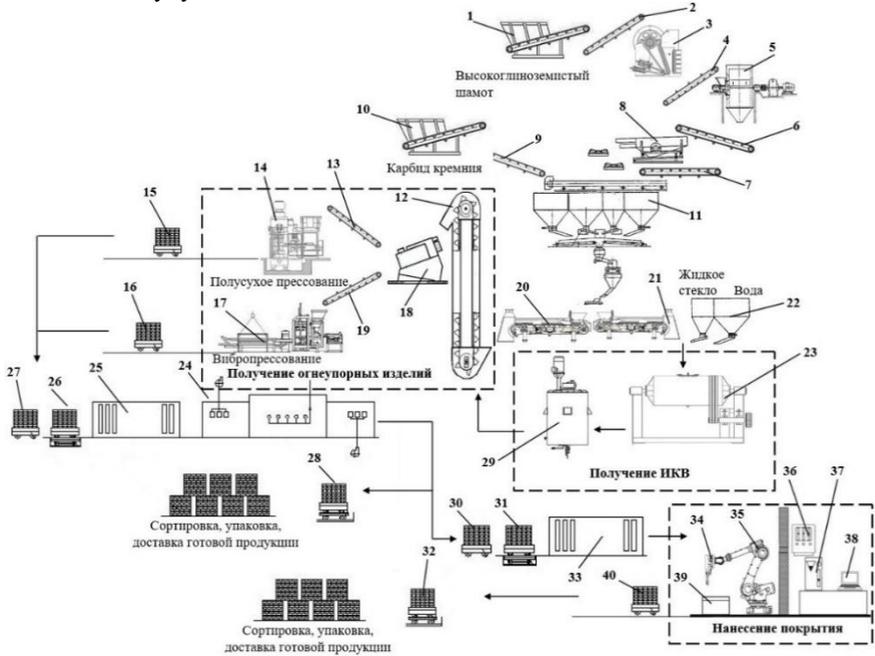


Рис. 10. Технологическая схема производства композиционных материалов системы «огнеупор на основе ИКВ – защитное структурно-сопряженное покрытие»:

- 1, 10 – ящичный подаватель (питатель); 2, 4, 6, 7, 9, 13, 19 – транспортерная лента; 3 – щековая дробилка; 5 – шаровая мельница непрерывного действия; 8 – вибрационное сито (грохот); 11, 22 – бункеры технологические; 12 – элеватор; 14 – пресс для полусухого прессования (гидравлический пресс); 15, 16, 26–28, 30–32, 40 – вагонетка для перевозки изделий; 17 – пресс для вибропрессования; 20, 21 – ленточный дозатор; 23 – шаровая мельница мокрого помола периодического действия; 24 – туннельная печь; 25, 33 – туннельное сушило; 29 – резервуар механического перемешивания (стабилизатор); 34 – МКДУ; 35 – роботизированный манипулятор; 36 – блок управления подачей газов; 37 – порошок питатель; 38 – автоматизированная система управления; 39 – стол конвейерный

Таким образом, разработана технология получения композиционных материалов системы «огнеупор на основе ИКВ – защитное структурно-сопряженное покрытие», включающая получение муллит-карборундового ИКВ,

огнеупорных композитов на их основе с использованием полифракционного наполнителя, а также детонационное нанесение защитного покрытия (рис. 10). Опытно-промышленная апробация при выпуске изделий подтверждает достоверность полученных результатов. Техничко-экономическая эффективность разработанных огнеупоров обусловлена увеличением срока службы за счет улучшенных физико-механических и коррозионных характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Дополнены теоретические представления о технологии огнеупорных материалов в части расширения спектра сырьевых компонентов за счет использования ИКВ на основе карбида кремния и высокоглиноземистого шамота, а также применения технологии детонационного напыления для создания защитных покрытий.

Разработано научно обоснованное технологическое решение, обеспечивающее получение высокоглиноземистых огнеупоров на основе искусственных керамических вяжущих (ИКВ) муллит-карборундового состава и наполнителя из высокоглиноземистого шамота с защитными структурно-сопряженными покрытиями корунда и шпинели из порошков глинозема и смеси глинозема и периклаза, формируемыми методом детонационного напыления, что позволяет получать изделия с повышенными физико-механическими и коррозионными характеристиками.

Установлен характер влияния технологии получения и состава ИКВ системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-SiC}$ на процессы структурообразования суспензии и защитного слоя материала после обжига. Совместный постадийный мокрый помол карбида кремния и высокоглиноземистого шамота, за счет различия в твердости, обеспечивает повышение интенсивности измельчения и увеличение объемной концентрации твердой фазы по сравнению с раздельным помолом. Выявлено рациональное соотношение $\text{SiC/Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (30/70 %), при котором: происходит изменение характера реологического поведения с тиксотропно-дилатантного на тиксотропный, сопровождающееся резким снижением эффективной вязкости; после обжига при 1300 °С на поверхности в результате кристаллизации муллита формируется защитный слой, обеспечивающий снижение открытой пористости (до 2–3 %) и уменьшение степени окисления SiC в процессе эксплуатации.

Выявлены особенности механизма формирования структурно-сопряженных покрытий на огнеупоре методом детонационного напыления. При нанесении порошков глинозема и смеси глинозема и периклаза (79:21 %) происходит формирование высокотемпературных покрытий: для корундового покрытия – полиморфный переход $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с остаточной фазой $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (23 %); для шпинельного – за счет диффузионного взаимодействия между MgO и $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ с сохранением избыточного периклаза (11 %).

Разработана технология получения ИКВ на основе высокоглиноземистого шамота и карбида кремния, заключающаяся в совместном постадийном помолу компонентов в соотношении 70:30 % при влажности 13 % с получением суспензии плотностью 2,41 г/см³, объемной концентрации твердой фазы 0,65,

содержанием частиц менее 100 нм 1,2 %, остатком на сите № 0,063 менее 4 %. Предел прочности при сжатии отливок ИКВ после обжига при 1300 °С составляет 131 МПа.

Разработаны составы огнеупорных масс для вибро- и полусухого прессования на основе ИКВ и заполнителя из высокоглиноземистого шамота с соотношением 50:50 % и влажностью 6,9 %, которые при удельном давлении прессования 0,1 МПа и 50 МПа, соответственно, температуре обжига 1300 °С, позволяют получать изделия с низкими показателями открытой пористости – 12 и 14 %, соответственно, усадкой при обжиге – 0,35 %, пределом прочности при сжатии 78 и 80 МПа.

Определены оптимальные технологические режимы детонационного нанесения защитных керамических покрытий на поверхности высокоглиноземистых огнеупоров с применением многокамерного кумулятивно-детонационного устройства (МКДУ): соотношение рабочей взрывчатой смеси газов – $O_2/C_3H_8=5,4$; длина ствола / диаметр сопла 500/16 мм; частота импульсов 20 Гц; дистанция напыления 50 мм; количество проходов 16; скорость перемещения по напыляемой поверхности 33 мм/с. В результате на поверхности высокоглиноземистого огнеупора формируются плотные покрытия корунда и шпинели с ламельной структурой, снижающие шероховатость поверхности огнеупора на 45 %, средней толщиной ~300 мкм, пористостью <3 %, микротвердостью ~13 ГПа, адгезионной прочностью ~5 МПа, обеспечивающие повышение коррозионной устойчивости рабочей поверхности высокотемпературных агрегатов к воздействию корродиентов металлургического и стекольного производства в 2 раза.

Разработана установка для оценки смачиваемости поверхности огнеупорных материалов, позволяющая использовать в качестве тестовых жидкостей высокотемпературные силикатные расплавы.

Теоретические положения диссертационной работы, результаты экспериментальных исследований могут быть *рекомендованы* для внедрения при производстве огнеупорных материалов; при подготовке магистров по направлениям «Химическая технология», «Материаловедение и технологии материалов».

Перспективы дальнейших исследований целесообразно рассматривать в направлении совершенствования составов огнеупорных композитов за счет расширения сырьевой базы ИКВ и порошков для напыления, а также за счет создания установок для детонационного напыления, обеспечивающих нанесение защитных покрытий на изделия сложной формы, в том числе внутри форм стеклоформующих машин.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий и международные реферативные базы данных и системы цитирования, рекомендованных ВАК РФ

1. *Зайцев, С.В.* Структура и свойства детонационных покрытий Al_2O_3 и

MgAl₂O₄ на огнеупорных материалах футеровки сталеплавильных агрегатов / С.В. Зайцев, В.В. Строкова, В.В. Сирота, Д.О. Бондаренко // CIS Iron and Steel Review. – 2025. – Vol. 29. – P. 37-42. (*УБС2, Scopus Q2, WoS Q4, K1*)

2. **Зайцев, С.В.** Оценка эффективности лабораторной установки по определению смачиваемости огнеупоров силикатными расплавами методом «лежащей капли» / С.В. Зайцев, В.В. Строкова, В.А. Дороганов, В.В. Сирота // СТИН. – 2025. – № 4. – С. 16–19. (*УБС 3, Scopus Q3, K1*)

3. **Зайцев, С.В.** Установка для определения смачиваемости поверхности высокотемпературными силикатными расплавами / С.В. Зайцев, В.В. Строкова, В.А. Дороганов // Вестник машиностроения. – 2025. – № 5. – С. 410-414. (*УБС4, Scopus Q3, K1*).

4. *Sirota, V.V.* Effect of powder morphology on the structure and properties of Al₂O₃ based coatings obtained by detonation spraying. / V.V. Sirota, **S.V. Zaitsev**, M.V. Limarenko, D.S. Prokhorenkov, A.S. Churikov // Construction Materials and Products. – 2024. – Т. 7. – № 5. – С. 1-10. (*УБС4, Scopus Q3, K2, RSCI, CA(pt)*).

5. **Зайцев, С.В.** Карборундовые огнеупорные бетоны на основе искусственного керамического вяжущего / С.В. Зайцев, В.А. Дороганов, Р.Н. Ястребинский, Г.Г. Бондаренко // Перспективные материалы. – 2024. – № 10. – С. 37-47. (*УБС4, K1, RSCI*).

Zaitsev, S.V. Carborundum refractory concretes based on artificial ceramic binder / S.V. Zaitseva, V.A. Doroganova, R.N. Yastrebinskya, G.G. Bondarenkob // Inorganic Materials: Applied Research. – 2025. – Vol. 16. – №. 2. – P. 435-442. (*УБС4, K3, Scopus Q3, WoS Q4*). (*Переводная версия*)

6. **Сирота, В.В.** Применение детонационных технологий формирования порошковых металлокерамических мишеней-катодов для магнетронного распыления / **С.В. Зайцев**, Д.С. Прохоренков, М.В. Лимаренко, А.А. Скиба, М.Г. Ковалева // СТИН. – 2023. – № 5. – С. 30-33. (*K1*)

Sirota, V.V. Detonation Technology in Producing Metal-Ceramic Powder Targets for Magnetron Sputtering / V.V. Sirota, **S.V. Zaitsev**, D.S. Prokhorenkov, M.V. Limarenko, A.A. Skiba, M.G. Kovaleva // Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43. – № 6. – P. 735-738. (*УБС 3, Scopus Q3, K1*). (*Переводная версия*)

7. **Зайцев, С.В.** Искусственные керамические вяжущие на основе кремния и карбида кремния для карбидкремниевых огнеупоров на нитридной связке / С.В. Зайцев, Е.А. Дороганов, В.А. Дороганов, Е.И. Евтушенко, О.К. Сыса // Новые огнеупоры. – 2019. – № 9. – С. 25-30.

Zaitsev, S.V. Artificial Ceramic Binders based on Silicon and Silicon Carbide for Silicon-Carbide Refractories in a Nitride Matrix / S.V. Zaitsev, E.A. Doroganov, V.A. Doroganov, E.I. Evtushenko, O.K. Sysa // Refractories and Industrial Ceramics. – 2020. – Vol. 60, №. 5. – P. 439-444. (*Scopus Q4, WoS Q4, CA(pt)*). (*Переводная версия*)

8. **Зайцев, С.В.** Коррозионная стойкость муллитокорборундовых огнеупорных композитов / С.В. Зайцев, В.А. Дороганов, Е.А. Дороганов, Т.А. Вареникова, М.А. Смирнова // Новые огнеупоры. – 2017. – № 10. – С. 38-41.

Zaitsev, S.V. Corrosive Resistance of Mullite-Silicon Carbide Refractory Composites / S.V. Zaitsev, V.A. Doroganov, E.A. Doroganov, T.A. Varenikova, M.A.

Smirnova // Refractories and Industrial Ceramics. – 2018. – Vol. 58, – №. 5. – P. 573-576. (*Scopus Q4, WoS Q4, CA(pt)*). (*Переводная версия*)

9. **Зайцев, С.В.** Исследование искусственных керамических вяжущих муллитокарбидкремневого состава и композитов на их основе / С.В. Зайцев, В.А. Дороганов, Е.А. Дороганов, Е.И. Евтушенко // Новые огнеупоры. – 2017. – № 2. – С. 46-49.

Zaitsev, S.V. Study of Artificial Ceramic Binders of Mullite-Silicon Carbide Composition and Composites Based on Them / S.V. Zaitsev, V.A. Doroganov, E.A. Doroganov, E.I. Evtushenko // Refractories and Industrial Ceramics. – 2017. – Vol. 58, №. 1. – P. 109-112. (*Scopus Q4, WoS Q4, CA(pt)*). (*Переводная версия*)

10. **Зайцев, С.В.** Исследование свойств искусственных керамических вяжущих в системе $Al_2O_3-SiO_2-SiC$ / С.В. Зайцев, В.А. Дороганов, Е.А. Дороганов, Е.И. Евтушенко // Новые огнеупоры. – 2016. – № 10. – С. 32-36.

Zaitsev, S.V. Study of Artificial Ceramic Binder Properties in the System $Al_2O_3-SiO_2-SiC$ / S.V. Zaitsev, V.A. Doroganov, E.A. Doroganov, E.I. Evtushenko // Refractories and Industrial Ceramics. – 2017. – Vol. 57. № 5. P. 526-530. (*Scopus Q4, WoS Q4, CA(pt)*). (*Переводная версия*)

В изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science

11. **Mulevanov, S.V.** Aspects of the corrosion of refractories in structured aggressive media / S.V. Mulevanov, V.M. Nartsev, V.A. Doroganov, E.A. Doroganov, **S.V. Zaitsev** // Refractories and Industrial Ceramics. – 2012. – Vol. 53. – № 4. – P. 226-228. (*Scopus Q4, WoS Q4*).

12. **Evtushenko, E.I.** Modification of refractory ceramic composites with coatings based on compounds of titanium and zirconium / E.I. Evtushenko, V.A. Doroganov, V.M. Nartsev, I.Yu. Moreva, **S.V. Zaitsev**, S.Yu. Kolomytseva // Refractories and Industrial Ceramics. – 2011. – Vol. 52. – № 4. – P. 272-277. (*Scopus Q4, WoS Q4*).

В сборниках трудов конференций

13. **Зайцев, С.В.** Защитные покрытия, нанесенные детонационным методом на огнеупорные материалы / С.В. Зайцев // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы двадцать первой Всероссийской научно-практической конференции, Старый Оскол, 29 ноября 2024 года. – Старый Оскол: Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС". – 2024. – С. 31-36.

14. **Churikov, A.S.** Production of high-emission coatings by detonation spray coating method / A.S. Churikov, **S.V. Zaitsev** // Advanced High Entropy Materials: Abstracts of the V International Conference and School, Saint-Petersbur, 09–13 октября 2023 года. – Saint-Petersburg: ООО "Заневская площадь". – 2023. – P. 33.

15. **Зайцев, С.В.** Исследование тонкодисперсных модифицирующих добавок для огнеупорных бетонов / С.В. Зайцев, В.А. Дороганов, Е.А. Дороганов, Т.А. Вареникова // Международная конференция огнеупорщиков и металлургов, Москва, 6-7 апреля 2017 года. – Москва: Новые огнеупоры. – 2017. – № 3. – С. 41-42.

16. **Зайцев, С.В.** Исследование коррозионной стойкости огнеупорных композитов на основе муллитокарбидкремниевое искусственного керамического вяжущего / С.В. Зайцев, В.А. Дороганов, Е.А. Дороганов, Т.А. Вареникова // Международная конференция огнеупорщиков и металлургов, Москва, 6-7 апреля 2017 года. – Москва: Новые огнеупоры. – 2017. – № 3. – С. 41.

17. **Зайцев, С.В.** Муллитокорборундовое искусственное керамическое вяжущее и его свойства / С.В. Зайцев, А.Э. Пивинский // Образование, наука, производство: VIII Международный молодежный форум, Белгород, 15–16 октября 2016 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – 2016. – С. 21-25.

18. **Зайцев, С.В.** К возможности поверхностного модифицирования керамических композитов, работающих в высокотемпературных и агрессивных средах [Электронный сборник] / V Международный студенческий форум «Образование, наука, производство», Белгород, 15–16 апреля 2011 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – 2016. – С. 1-4.

Патент

19. Патент № 2740392 Российская Федерация, МПК С04В 35/567, С04В 35/65. Способ получения карбидокремниевых огнеупоров: № 2019133641: заявл. 2019.10.22; опублик. 2021.01.13 / Бессмертный В.С., Бондаренко Н.И., Дороганов В.А., Евтушенко Е.И., **Зайцев С.В.** – 6 с.

Соискатель выражает искреннюю благодарность и признательность научному консультанту к.т.н. доценту Дороганову В.А. и к.т.н. Сироте В.В. за неоценимую помощь и поддержку в проведении научно-экспериментальных исследований и обсуждении полученных результатов.

ЗАЙЦЕВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ
МУЛЛИТ-КАРБОРУНДОВОГО СОСТАВА
С ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ**

2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 04.07.2025. Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,28.
Тираж 100 экз. Заказ № 77

Отпечатано в Белгородском государственном
технологическом университете им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46