Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
"Томский государственный архитектурно–строительный университет"

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе

_____ С.В. Ефименко
«20» апреля 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Диссертация «Синтез карбида бора в дуговом разряде постоянного тока в открытой воздушной среде» выполнена в учебно-научной лаборатории «Наноматериалы и нанотехнологии» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет» и в лаборатории перспективных материалов энергетической отрасли Инженерной школы энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».
В период подготовки диссертации соискатель Мартынов Роман Сергеевич обучался в очной аспирантуре по специальности 01.04.07, работал инженером-технологом 1 категории (1.0 ставки, основное место работы) в Акционерном Обществе «Научно-производственный центр «Полюс» и инженером (0.1 ставки, внешнее совместительство) в научно-образовательном центре им. И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

В 2022 г. Мартынов Роман Сергеевич окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по специально-

сти «Физика и астрономия» с присуждением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь».

Научный руководитель: Волокитин Олег Геннадьевич, д.т.н., профессор кафедры прикладной механики и материаловедения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», советник Российской Академии Архитектуры и Строительных Наук.

Научный консультант: Пак Александр Яковлевич, д.т.н., заведующий лабораторией перспективных материалов энергетической отрасли Инженерной школы энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертация Мартынова Р.С. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в рамках которой представлены результаты экспериментальных исследований, посвященных разработке и созданию безвакуумного плазменного реактора с варьируемыми энергетическими параметрами. Кроме того, в работе исследованы состав, формирующейся газовой среды в рабочей зоне безвакуумного плазменного реактора, а также энергетические параметры процесса для реализации синтеза порошкового карбида бора. Показана возможность реализации синтеза материалов на основе карбида бора в углеродной матрице различной морфологии (чешуйчатый графит, углеродные волокна, пиролизированные отходы растительного происхождения: сосновые опилки, шелуха кедрового ореха) с использованием разработанного плазменного безвакуумного реактора. Предложено техническое решение задачи минимизации доли эрозионного графита в продуктах синтеза, заключающееся в использовании двойной стенки и двойного дна графитового тигля, в полости которого происходит горение дуги, что позволило обеспечить доминирование фазы карбида бора.

Актуальность исследований

Работа выполнена на актуальную тему, посвященную получению сверхтвердых и тугоплавких материалов на основе карбида бора. Одним из классических подходов к получению карбида бора является карботермическое восстановление. Синтез этого материала также возможен и другими способами, такими как самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), парофазный синтез, спекание, механохимический синтез (МХС) и др.

Аналитический обзор литературы показал, что существующие методы получения карбида бора предполагают наличие специальной экранирующей среды (инертных газов или вакуума), вследствие чего возникает необходимость применения дорогостоящего оборудования, что приводит к удорожанию этих методов.

В настоящее время распространение получил электродуговой синтез ввиду высокой скорости протекания реакций, причем в последние годы наблюдается тенденция к использованию в качестве рабочей среды воздуха пониженного и нормального давления. Особенностью такого подхода является его реализация в открытой воздушной атмосфере, что позволяет значительно упростить конструкцию оборудования и повысить энергоэффективность процесса синтеза.

Личное участие автора в получении научных результатов, изложенных в диссертации, состоит в следующем:

- в постановке цели и задач работы;
- планировании, постановке и проведении экспериментальных исследований;
- разработке устройства для синтеза порошкового карбида бора;
- анализе и обработке аналитических данных;
- апробации результатов исследований и подготовке их к публикации.

Степень достоверности результатов проведенных исследований обеспечена привлечением стандартизированных методов и взаимодополняющих методик исследования с применением высокоточных приборов и средств измерения, а также необходимым количеством экспериментальных данных для их корректной статистической обработки.

Научная новизна результатов исследований заключаются в следующем:

1. Предложено и реализовано техническое решение, заключающееся в разделении зоны горения дугового разряда и области расположения исходного сырья, которое позволяет проводить экспериментальные исследования в области плазменной обработки материалов с низкой электрической проводимостью, в частности, на основе бора и оксида бора.

2. Экспериментально определен состав газовой среды, формирующейся при горении дугового разряда в атмосфере воздуха в присутствии бора и углерода в объеме графитового тигля, что было использовано для создания принципиально нового плазменного реактора для исследования процессов синтеза карбида бора.

3. Определены рабочие параметры процесса плазменной обработки и конфигурация плазменного ректора, которые обеспечивают условия для форми-

рования кристаллических фаз карбида бора в условиях горения дугового разряда в воздушной атмосфере.

4. Показана возможность реализации синтеза материалов на основе карбида бора в углеродной матрице различной морфологии (чешуйчатый графит, углеродные волокна, пиролизированные отходы растительного происхождения: сосновые опилки, шелуха кедрового ореха) с использованием разработанного плазменного безвакуумного реактора.

5. Предложено техническое решение задачи минимизации доли эрозионного графита в продуктах синтеза, заключающееся в использовании двойной стенки и двойного дна графитового тигля, в полости которого происходит горение дуги, что позволило обеспечить доминирование фазы карбида бора.

6. Установлено, что полученные безвакуумным плазменным методом порошки карбида бора характеризуются повышенной окислительной стойкостью при нагревании в воздушной среде, что обеспечивается за счет наличия графитовой оболочки частиц.

Практическая значимость результатов исследований заключаются в следующем:

1. Предложена конструкция разрядного контура, обеспечивающая возможность плазменной обработки сырья с низкой электрической проводимостью за счет разделения зоны инициирования дугового разряда и реакционного объема.
2. Определены рекомендуемые режимы работы плазменного ректора и реализуемые граничные условия для синтеза карбида бора.
3. Создана автоматизированная система регистрации параметров физического эксперимента по исследованию процессов получения порошков карбида бора.
4. Определены параметры электродуговой обработки смесей оксида бора и углерода, обеспечивающие нулевое содержание в продуктах синтеза оксидных фаз, в частности, оксида бора.
5. Показана возможность вовлечения в процесс синтеза карбида бора возобновляемого углерода, а также возможность получения композитных материалов на основе графита с различной морфологией и карбида бора.
6. Реализовано техническое решение, обеспечивающее возможность удаления из графитового тигля эрозионного углерода, что позволило минимизировать содержание примесей в продуктах синтеза.
7. Получены образцы порошков карбида бора с повышенной окислительной стойкостью.
8. Спечены объемные керамические материалы из порошков, полученных безвакуумным электродуговым методом.

9. Установлено, что синтезированные порошки карбида бора при использовании их в качестве абразивного материала демонстрируют повышенные показатели качества притирки ответственных деталей в сравнении с промышленным образцом порошка карбида бора с микронным диапазоном размеров частиц.

Результаты работы использованы при выполнении ряда проектов: Государственного задания № 075-03-2022-108/5 (FSWW-2022-0018), Государственного задания № 075-03-2021-138/3 (FZES-2021-0008), Государственного задания № FSWW-2023-0011, Программы ПРИОРИТЕТ – 2030, Проект № Приоритет-2030-НИП/ЭБ-040-1308-2022.

Ценность научных работ соискателя состоит

Опубликованные работы в полной степени отражают основное содержание диссертационного исследования, пункты научной новизны и практической значимости.

Результаты исследований опубликованы автором в 14 научных трудах. в т.ч. 2 статьи, индексируемые в базах данных «Сеть науки» (Web of Science) и «Скопус» (Scopus), и 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

1. Martynov R.S., Pak A.Ya., Mamontov G.Ya. Synthesis of Submicron Boron Carbide by the Non-Vacuum Method with Indirect Supply of the Thermal Energy of a DC Arc Discharge // Nanobiotechnology Reports. – 2022. – Vol. 17. – №3. – P. 306-312.

2. Мартынов Р.С., Мамонтов Г.Я., Куриленко Н.И. Синтез карбида бора при конденсации испаренного дуговым разрядом исходного сырья на основе оксида бора и углерода // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2021. – Т. 18. – №. 3. – С. 259-264.

3. Мартынов Р.С., Пак А.Я., Мамонтов Г.Я., Волокитин О.Г., Янковский С.А., Гумовская А.А., Поваляев П.В., Болатова Ж. Синтез карбида бора электродуговым методом в открытой воздушной среде из углерода различного происхождения // Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93, № 1. – С. 74-80.

4. Pak, A. Y., Mamontov, G. Y., Slyusarskiy, K. V., Larionov, K. B., Yankovsky, S. A., Gvozdyakov, D. V., Gubin V. Martynov, R. S. Ash Waste Utilization via Direct Current Arc Plasma with Production of SiC and AlN // Waste and Biomass Valorization. – 2021. – V. 12. – №. 10. – P. 5689-5700.

5. Martynov R. S., Vassilyeva Y. Z., Mamontov G. Y. Analysis of boron carbide powder by high resolution transmission electron microscopy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2020. – V. 971. – №. 3. – P. 032047.

6. Pak A. Y., Martynov R. S. Direct current arc-plasma synthesis of BC powder product //Gas Discharge Plasmas and Their Applications (GDP 2019): 14th International Conference, September 15–21, 2019, Tomsk, Russia. – Tomsk. – 2019. – P. 283.

7. Поваляев П.В., Мартынов Р.С. Автоматизация системы позиционирования электродов дугового плазменного реактора для синтеза порошкового карбида бора // XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых). – 2021. – С.104-108.

8. Мартынов Р.С. Оформление узлов позиционирования электродов плазменного реактора для экспериментального метода синтеза карбида бора в атмосферной плазме // Современные проблемы машиностроения: сборник научных трудов XII Международной научно-технической конференции, г. Томск, 28 октября-1 ноября 2019 г.– Томск. – 2019. – С. 295-297.

9. Мартынов Р.С. Влияние длительности синтеза на фазовый состав порошкового продукта, содержащего карбид бора, полученного в атмосферной плазме дугового разряда постоянного тока // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых). – 2019. – С. 309-312.

10. Мартынов Р. С., Пак А. Я. Электродуговой синтез материала на основе карбида бора и углеродных волокон // Молодежная научная конференция АНТОК 2020. – 2020. – С. 65-66.

11. Мартынов Р. С., Пак А. Я. Электродуговой синтез материалов для перспективных технологий возобновляемой энергетики // Молодежная научная конференция АНТОК 2020. – 2020. – С. 67-68.

12. Мартынов Р. С., Пак А. Я. Синтез порошковых материалов в системе Si – B – C в плазме дугового разряда постоянного тока // XX Юбилейная международная конференция по науке и технологиям Россия-Корея-СНГ. – 2020. – С. 106-108.

13. Мартынов Р. С., Пак А. Я. Влияние длительности горения разряда на фазовый состав порошкового карбида бора, полученного в атмосферной плазме дугового разряда постоянного тока //Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов X Международной научно-практической конференции, 23–25 мая 2019 г., Юрга. – Томск. – 2019. – С. 158-160.

14. Мартынов Р.С. Разработка научно-технических основ получения карбида бора. разработка нового устройства аппаратного оформления методики электродугового метода получения карбида бора // Фундаментальные и прикладные исследования: сборник научных трудов IV Всероссийской (национальной) конференции молодых ученых/ под ред. Е.Г. Гуровой, С.В. Макарова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2018. – С. 84-85.

Диссертация «Синтез карбида бора в дуговом разряде постоянного тока в открытой воздушной среде» Мартынова Романа Сергеевича соответствует тре-

бованиям Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (утвержденном приказом №362-1/од от 28.12.2021).

Диссертация «Синтез карбида бора в дуговом разряде постоянного тока в открытой воздушной среде» Мартынова Романа Сергеевича **рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.**

Заключение принято на заседании расширенного межкафедрального научного семинара.

Присутствовало 17 чел. Результаты голосования: «За» 17чел., «Против» 0 чел., «Воздержалось» 0 чел. Протокол № 14 от 21 апреля 2023 г.

Председатель семинара:

д.т.н., профессор кафедры

«Прикладная механика и материаловедение» **Н.К. Скрипникова**