

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Московских Дмитрия Олеговича на тему: «Получение бинарных и многокомпонентных карбидов с использованием СВС, высокоэнергетической механической обработки и искрового плазменного спекания», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.5 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы» и состоявшейся в НИТУ МИСИС 22 апреля 2026 года.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ МИСИС 24 ноября 2025 года, протокол № 34.

Диссертация выполнена в научно-исследовательском центре «Конструкционные керамические наноматериалы» НИТУ МИСИС. Научный консультант: доктор физико-математических наук Рогачев Александр Сергеевич, профессор кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий НИТУ МИСИС, заведующий лабораторией динамики микрогетерогенных процессов Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова.

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом НИТУ МИСИС (протокол № 34 от 24.11.2025) в составе:

1. Левашов Евгений Александрович – д.т.н., заведующий кафедрой порошковой металлургии и функциональных покрытий директор Научно-учебного центра СВС МИСИС-ИСМАН, НИТУ МИСИС – председатель комиссии;

2. Штанский Дмитрий Владимирович – д.ф.-м.н., профессор кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий, главный научный сотрудник Научно-учебного центра СВС МИСИС-ИСМАН, директор НИЦ «Неорганические наноматериалы», НИТУ МИСИС;

3. Петржик Михаил Иванович, д.т.н., профессор кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий, ведущий научный сотрудник Научно-учебного центра СВС МИСИС-ИСМАН, НИТУ МИСИС;

4. Богатырева Елена Владимировна, д.т.н., профессор кафедры цветных металлов и золота НИТУ МИСИС;

5. Дудина Дина Владимировна, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории синтеза композиционных материалов федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук;

6. Серов Михаил Михайлович, д.т.н., профессор кафедры «1101-Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов» федерального

государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»;

7. Курганова Юлия Анатольевна, д.т.н., профессор кафедры «Материаловедение» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

В качестве ведущей организации утверждено федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

**Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработана научная концепция** о возможности получения тугоплавких керамических материалов на основе бинарных ( $\text{SiC}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ) и многокомпонентных высокоэнтропийных карбидов  $(\text{Ta,Ti,Nb,Zr})\text{C}$  и  $(\text{Ta,Ti,Nb,Zr,X})\text{C}$  ( $\text{X} = \text{Hf}, \text{Mo}, \text{W}$ ) путем комбинации высокоэнергетической механической обработки (ВЭМО), самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и искрового плазменного спекания (ИПС), позволившая выявить новые физико-химические закономерности формирования структуры и свойств карбидной керамики и создать научный задел для получения материалов с контролируемым уровнем жаростойкости и сопротивления ползучести.

**разработана новая экспериментальная методика** с использованием высокоскоростной видеорегистрации процессов, протекающих внутри размольных барабанов планетарной центробежной мельницы, а также теоретических моделей движения мелющих тел в размольных барабанах, позволяющая выявить существование трех характерных режимов движения мелющих тел в зависимости от параметра  $K$  — отношения частот вращения барабанов и планетарного диска. Установлено, что максимальная эффективность механической обработки достигается при значениях  $K = 1,0-1,5$  (каскадный режим), обусловленная преобладанием процессов истирания и сдвига, которые обеспечивают формирование высокорезакционных наноструктурированных частиц, снижение температуры инициирования СВС до  $350\text{ }^\circ\text{C}$  для системы  $\text{Ni-Al}$  ( $640\text{ }^\circ\text{C}$  для исходной смеси), до  $680\text{ }^\circ\text{C}$  для системы  $\text{Ti-Si}$  ( $1230\text{ }^\circ\text{C}$  для исходной) и до  $1130\text{ }^\circ\text{C}$  для системы  $\text{Si-C}$  ( $1560\text{ }^\circ\text{C}$  для исходной), пригодных для последующего использования в процессах СВС и реакционного искрового плазменного спекания и позволяет определить количественные критерии для выбора оптимальных режимов ВЭМО.

**доказана перспективность и эффективность** практического использования комбинированной технологии ВЭМО-СВС-ИПС для производства керамики  $\text{SiC}$  на НПФ

«Керамика» (Акт внедрения от 23 октября 2025 г.), карбидная композиция ( $Ta_{0,2}Ti_{0,2}Nb_{0,2}Zr_{0,2}Hf_{0,2}C$ ), имеющая высокую радиационную, окислительную стойкость и устойчивость к ползучести при температурах до 1600 °С, рекомендована к использованию в АО «НИИ НПО «ЛУЧ» (Акт от 24 октября 2025 г.).

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказаны положения** о существовании корреляции между режимами ВЭМО и температурой инициирования СВС: для всех исследованных систем минимальные значения температуры самовоспламенения достигаются при значении параметра  $K = 1,5$ .

**изложены закономерности влияния** продолжительности и интенсивности низкоэнергетической (НЭМО, 17G) и высокоэнергетической (ВЭМО, 90G) механической обработки смеси Si–C, а также типа исходного углеродного сырья на возможность химического взаимодействия компонентов, морфологию и реакционную способность формируемых гранул и показано, что обработка смеси при НЭМО приводит к практически полной аморфизации частиц без образования SiC, в то время как при ВЭМО после 40 минут обработки смесь на 70–80 масс.% состоит из карбида кремния и представляет собой агломераты однородных сферических композитных частиц размером 50–200 нм.

**установлен факт** микроструктурной преимущества реакционных Si–C гранул конечными продуктами горения СВС (сферические частицы  $\beta$ -SiC размером 50–200 нм), обусловленный сверхбыстрой кинетикой капиллярной инфильтрации и диффузии ( $10^{-8}$ – $10^{-7}$  с), что подтверждается теоретическим анализом процесса капиллярной инфильтрации жидкого кремния в пористую углеродную среду и оценкой времени диффузии реагентов, согласно которому высокая скорость процессов исключает коалесценцию частиц размером до 200 нм при переходе через жидкофазное состояние, что позволяет рассматривать ВЭМО как эффективный инструмент целенаправленного формирования микроструктуры СВС-продуктов.

**выявлено** принципиальное различие механизмов горения многокомпонентных карбидообразующих смесей: в системе Ta–Ti–Nb–Zr–C плавление Ti и Zr приводит к капиллярному растеканию расплава и формированию зерен размером 1–5 мкм, а в системе Ta–Ti–Nb–Zr–Hf–C горение протекает с участием твердофазных реакций без выраженной коалесценции, что обеспечивает сохранение исходной высокодисперсной структуры и получение карбидных зерен субмикронного размера.

**изложены доказательства** исключительно высокой стойкости к высокотемпературной ползучести ИПС-керамики ( $Ta_{0,2}Ti_{0,2}Nb_{0,2}Zr_{0,2}Hf_{0,2}C$ ) (скорость установившейся ползучести составляет  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  с<sup>-1</sup>, что на 1–2 порядка ниже, чем у бинарных карбидов) в интервале температур 1400–1600 °С. На основе количественного анализа вкладов различных механизмов впервые для высокоэнтропийных карбидов

идентифицирована активная система скольжения  $a/2\langle 0\bar{1}1 \rangle\{111\}$ , характерная для карбидов со структурой NaCl, определены векторы Бюргерса дислокаций и установлено, что доминирующим является дислокационное скольжение, вклад которого достигает ~90 % при энергии активации 170–200 кДж/моль.

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

**разработаны и запатентованы** способы получения субмикронного порошка SiC (патент РФ № 2493937) и нанокерамики методами СВС и ИПС (патент РФ № 2614006), а также зарегистрировано ноу-хау на способ получения высокоэнтропийных карбидов на основе тугоплавких металлов (№ 2-439-2021 ОИС от 19.04.2021).

**разработана** технологическая инструкция ТИ 08-263801-2025 на процесс производства субмикронного СВС-порошка карбида кремния, используемого для получения сегментов SiC-керамики размером 100×100 мм с твердостью 24,1 ГПа, трещиностойкостью 5 МПа·м<sup>1/2</sup> и модулем упругости 450 ГПа.

**изготовлена опытная партия** керамических вставок для абразивоструйных сопел, успешно прошедшая испытания на ООО «Бахметьевский завод» с увеличением ресурса на 63% (Акт стендовых испытаний от 21 мая 2014 г.).

**внедрены** разработанные режимы ВЭМО в технологический процесс проектирования планетарно-центробежных мельниц на ООО Машиностроительный Завод «Активатор» (Акт внедрения).

высокоэнтропийная карбидная керамика  $(Ta_{0,2}Ti_{0,2}Nb_{0,2}Zr_{0,2}Hf_{0,2})C$ , имеющая высокую радиационную, окислительную стойкость и устойчивость к ползучести при температурах до 1600 °С, рекомендована к применению в АО «НИИ НПО «ЛУЧ» (Акт от 24 октября 2025 г.) для перспективных ядерных и космических технологий.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила следующее:**

**Для экспериментальных исследований** использовано передовое технологическое и аналитическое оборудование, аттестованные методики и сертифицированные средства измерений. Свойства компактных образцов керамики определялись с помощью стандартных методик определения твердости, трещиностойкости, модуля упругости и других механических характеристик. **Достоверность полученных результатов подтверждена** большим объемом экспериментальных данных, их воспроизводимостью и согласованностью с независимыми литературными источниками, а также использованием комплекса современных взаимодополняющих методов анализа.

**Личный вклад соискателя** состоит в обосновании актуальности, цели и направлений исследования, формулировке задач и путей их решения. Автор принимал участие на всех этапах выполнения работы: осуществлял планирование и проведение экспериментов,

обработку и интерпретацию экспериментальных данных; участвовал в формулировании научной новизны и практической значимости, выводов диссертационной работы; написании научных статей, тезисов докладов; оформлении патентов и ноу-хау; подготовке презентаций.

Соискатель представил 20 научных статей в журналах из перечня ВАК и Scopus, получено 2 патента Российской Федерации и зарегистрировано 1 ноу-хау.

Пункт 2.6 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС соискателем ученой степени не нарушен.

Диссертация Московских Дмитрия Олеговича соответствует критериям п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС, так как в ней на основании комплексных исследований закономерностей фазо- и структурообразования в карбидных системах ( $\text{SiC}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $(\text{Ta}, \text{Ti}, \text{Nb}, \text{Zr})\text{C}$  и  $(\text{Ta}, \text{Ti}, \text{Nb}, \text{Zr}, \text{X})\text{C}$ , где  $\text{X} = \text{Hf}, \text{Mo}, \text{W}$ ), механизмов высокотемпературной ползучести, окисления и радиационной стойкости, а также влияния предварительной высокоэнергетической механической обработки на реакционную способность порошковых смесей, сформулированы принципы управления структурой и свойствами тугоплавкой керамики на всех этапах технологического цикла — от синтеза порошков до консолидации. Разработаны научно-обоснованные технологические решения получения керамики из  $\text{SiC}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ , высокоэнтропийных карбидов и композитов на их основе, обладающих повышенными эксплуатационными характеристиками, предназначенных для работы в экстремальных условиях авиационно-космической техники, ядерной энергетики и высокотехнологичного машиностроения Российской Федерации.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне, обладает внутренним единством, выводы и рекомендации достоверны и убедительны, результаты работы имеют теоретическую ценность и практическую значимость.

Экспертная комиссия приняла решение о возможности присуждения Московских Дмитрию Олеговичу ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.5 — «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Результаты голосования: при проведении тайного голосования экспертная комиссия в количестве 6 человек, участвовавших в заседании, из 7 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за - 6, против - нет, недействительных бюллетеней нет.

Председатель Экспертной комиссии  
д.т.н.



Е.А. Левашов  
22.04.2026