

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы Московских Дмитрия Олеговича  
«Получение бинарных и многокомпонентных карбидов с использованием СВС,  
высокоэнергетической механической обработки и искрового плазменного спекания»,  
представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности  
2.6.5 «Порошковая металлургия и композиционные материалы»

Актуальность диссертационной работы Московских Д.О. обусловлена необходимостью создания керамических материалов нового поколения, способных сохранять структурную стабильность и механическую прочность при высоких температурах. Современные задачи аэрокосмической техники, атомной энергетики и высоконагруженного машиностроения требуют разработки тугоплавких карбидных систем с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Разработка дешевого и энергоэффективного метода получения бескислородной керамики всегда являлась актуальной задачей, однако в настоящий период времени, на фоне санкционных ограничений, эта проблема приобретает критическое значение для обеспечения технологического суверенитета и национальной безопасности страны. В этой связи исследование закономерностей получения бинарных и многокомпонентных карбидов с применением комбинированной схемы ВЭМО–СВС–ИПС является научно и технологически обоснованным.

Диссертационная работа Московских Д.О. состоит из введения, шести глав, заключения. Список литературы содержит 446 наименований. Общий объем диссертации составляет 300 страниц, включает 160 рисунков, 48 таблиц и 6 приложений.

### **Степень обоснованности и достоверности результатов**

Работа выполнена на высоком экспериментальном уровне с использованием комплекса современных физико-химических методов анализа фазового состава, микроструктуры и механических свойств, включая рентгенофазовый анализ, сканирующую и просвечивающую электронную микроскопию, энергодисперсионный анализ, дифференциальную сканирующую калориметрию и термогравиметрический анализ. Полученные данные отличаются воспроизводимостью и логической взаимосвязанностью. Теоретические оценки, в частности расчеты характерных времен диффузии и капиллярной инфильтрации, корректно интерпретируют наблюдаемые структурные эффекты. Достоверность результатов подтверждается их согласованностью с данными независимых литературных источников, а также апробацией на многочисленных международных и всероссийских конференциях.

## Научная новизна

К числу наиболее значимых научных результатов относятся:

- Экспериментальная верификация режимов движения мелющих тел в планетарной центробежной мельнице и установление связи между параметром  $K$  и эффективностью механоактивации. Показано, что каскадный режим ( $K=1,0-1,5$ ) обеспечивает формирование наноструктурированных реакционных гранул с размером областей когерентного рассеяния 10–40 нм.

- Установление механизмов снижения температуры инициирования СВС в системе Si–C до 1130 °C вследствие дефектной активации и формирования наномасштабных межфазных контактов. Выявлен эффект микроструктурной наследственности, обусловленный сверхбыстрой кинетикой капиллярной инфильтрации и диффузии углерода ( $10^{-8}-10^{-7}$  с).

- Выявление различий механизмов горения в системах Ta–Ti–Nb–Zr–C ( $T_{гор}=1995$  °C) и Ta–Ti–Nb–Zr–Hf–C ( $T_{гор}=1740$  °C), включая сохранение субмикронной структуры в высокоэнтропийной системе. Определена эффективная энергия активации инициирования СВС в системе с гафнием, составившая 43 кДж/моль, что существенно ниже значений для бинарных карбидов.

- Установление закономерностей искрового плазменного спекания и реакционного искрового плазменного спекания порошков SiC и  $B_4C$ . Оптимизация параметров позволила получить практически беспористую керамику SiC с твердостью 24 ГПа, модулем упругости 450 ГПа и трещиностойкостью до  $5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ , а для  $B_4C$  – твердость до 36 ГПа и трещиностойкость  $4,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ .

- Определение многостадийного механизма окисления высокоэнтропийного карбида (Ta,Ti,Nb,Zr,Hf)C с формированием защитного оксидного слоя  $Ta_2Hf_6O_{17}$ , обеспечивающего минимальный прирост массы  $17,5 \text{ мг/см}^2$  при изотермической выдержке 120 мин при 1200 °C.

- Установление дислокационного механизма ползучести и активной системы скольжения для высокоэнтропийного карбида. Показано, что скорости установившейся ползучести составляют  $10^{-8}-10^{-9} \text{ с}^{-1}$ , что на 1–2 порядка ниже, чем у традиционных бинарных карбидов.

Полученные результаты существенно расширяют представления о взаимосвязи механической активации, процессов горения и последующей консолидации.



### **Практическая значимость**

Практическая значимость работы подтверждена разработкой и внедрением конкретных технологических решений. Созданы и запатентованы способы получения субмикронного порошка SiC (патент РФ № 2493937) и нанокерамики на его основе (патент РФ № 2614006), зарегистрировано ноу-хау на способ получения высокоэнтропийных карбидов. Разработана технологическая инструкция ТИ 08-263801-2025 на процесс производства субмикронного СВС-порошка карбида кремния. Результаты внедрены в технологический процесс на НПФ «Керамика» 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. Изготовленная опытная партия керамических вставок для абразивоструйных сопел успешно прошла испытания на ООО «Бахметьевский завод», показав увеличение ресурса на 63 % по сравнению с серийными аналогами. Разработанные режимы ВЭМО внедрены в технологический процесс проектирования планетарно-центробежных мельниц на ООО «Активатор». Высокоэнтропийная карбидная керамика (Ta,Ti,Nb,Zr,Hf)C, прошедшая испытания на радиационную стойкость и показавшая высокую структурную стабильность при облучении ионами гелия, рекомендована к использованию в АО «НИИ НПО «ЛУЧ» для перспективных разработок в области ядерной и космической техники. Результаты работы обладают высокой прикладной ценностью и могут быть использованы при разработке материалов для экстремальных условий эксплуатации.

### **Замечания по работе**

При общей положительной оценке диссертационной работы можно высказать следующее замечание. При исследовании кинетики искрового плазменного спекания (ИПС) и реакционного ИПС (РИПС) автор приводит данные о смещении пуансона и изменении вакуума в камере. Однако в тексте автореферата отсутствуют сведения о том, проводилась ли регистрация электрических параметров процесса (ток, напряжение, мощность) в режиме реального времени и как эти параметры коррелировали с фазовыми превращениями и уплотнением материала. Для гибридных технологий, сочетающих электротермическое и механическое воздействие, анализ электрических характеристик является важным диагностическим инструментом.

Основные результаты исследований Д.О. Московских представлены в докладах на отечественных и международных конференциях, семинарах, опубликованы в научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

Диссертационная работа по теме: «Получение бинарных и многокомпонентных карбидов с использованием СВС, высокоэнергетической механической обработки и

искрового плазменного спекания» соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСИС», а ее автор, Московских Дмитрий Олегович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.5 «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Заведующий лабораторией  
«Высокоэнергетических методов синтеза  
сверхвысокотемпературных керамических материалов»  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
(01.04.07 — Физика конденсированного состояния)



Евгений Григорьевич Григорьев

«6» апреля 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения  
им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН),  
142432 Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипяна, д. 8  
Тел.: 8 (49652) 46226  
Эл. почта: eugengrig@ism.ac.ru

Автор отзыва дает согласие на обработку персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Московских Д.О.



Е.Г. Григорьев

Подпись Е.Г. Григорьева заверяю.

Ученый секретарь ИСМАН

к.т.н.



Е.В. Петров