

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Московских Дмитрия Олеговича на тему: «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

Повышение требований к уровню эксплуатационной надежности деталей современной техники обуславливает необходимость разработки новых материалов с повышенными значениями характеристик механических и функциональных свойств при экстремально высоких температурах. Перспективны в этом плане керамические материалы на основе карбидов бора и кремния, а также карбидов на основе высокоэнтропийных сплавов. Получение таких карбидов связано с необходимостью решения ряда проблем: неравномерности распределения компонентов, фазовой сегрегации, ограниченной термодинамической совместимости и др. Решение этих проблем предполагает необходимость проведения специальных исследований.

Изложенные выше соображения обуславливают актуальность диссертационной работы Московских Д.О., посвященной разработке научно-технологических основ получения керамических материалов на основе SiC, B<sub>4</sub>C и высокотемпературных многокомпонентных карбидов (Ta<sub>0,25</sub>Ti<sub>0,25</sub>Nb<sub>0,25</sub>Zr<sub>0,25</sub>)C и (Ta<sub>0,2</sub>Ti<sub>0,2</sub>Nb<sub>0,2</sub>Zr<sub>0,2</sub>X<sub>0,2</sub>)C (X = Hf, Mo или W) для работы в условиях экстремальных температур, агрессивных сред и механических нагрузок на базе новых научных знаний об особенностях формирования структуры и свойств этих материалов.

Среди наиболее значимых научных достижений автора следует назвать, прежде всего, разработку научно-технологических основ синтеза бинарных и многокомпонентных карбидов с использованием самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), высокоэнергетической механической обработки (ВЭМО) и искрового плазменного спекания. Показано, что при ВЭМО параметр K (соотношение скоростей вращения планетарного диска и барабанов) является ключевым фактором управления структурой и реакционными свойствами СВС-порошков; максимальное уменьшение размеров ОКР и формирование высокорекционных частиц достигается при K=1,0–1,5, что открывает возможность осуществления СВС для низкоэкзотермической системы Si–C. При этом температура инициирования горения снижается до минимальных значений, составляя 1130 °C.

Показано, что изменение режимов ВЭМО обеспечивает возможность целенаправленного формирования микроструктуры СВС-порошков SiC. Установлено, что продолжительность капиллярной инфильтрации и диффузии углерода в расплавленном кремнии находится в интервале 10<sup>-8</sup> – 10<sup>-7</sup> с, что исключает развитие коалесценции реакционных частиц размером до 200 нм и обеспечивает сохранение исходной ВЭМО-структуры при переходе через жидкофазное состояние.

Обоснована стадийность процесса искрового плазменного спекания (ИПС) СВС-порошков карбида кремния: быстрая консолидация при предварительном нагреве и замедленное уплотнение при изотермической выдержке. Предложены кинетические модели ИПС, позволяющие установить продолжительность выдержки до достижения предельной плотности SiC керамики. Проведена оптимизация параметров ИПС (2000 °C, 90 МПа, 10 мин), которая позволила получить плотную



керамику SiC с твердостью 24 ГПа, модулем упругости 450 ГПа и трещиностойкостью до  $5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ .

При изучении особенностей окисления многокомпонентных карбидов на воздухе в изотермических условиях установлено, для состава  $(\text{Ta}_{0,25}\text{Ti}_{0,25}\text{Nb}_{0,25}\text{Zr}_{0,25})\text{C}$  имеет место переход от линейного к логарифмическому закону, для состава с Hf и Mo кинетика описывается степенным законом ( $n=3$ ). Для вольфрамсодержащего карбида выявлен переход от параболического закона к линейному, что связано с разрушением защитного барьера вследствие летучести оксида вольфрама. Установленные кинетические закономерности позволили определить связь жаростойкости ИПС-керамик с их химическим составом и подтвердили, что наивысшую стойкость к окислению демонстрирует  $(\text{Ta}_{0,2}\text{Ti}_{0,2}\text{Nb}_{0,2}\text{Zr}_{0,2}\text{Hf}_{0,2})\text{C}$ .

Значимым и интересным в научном и практическом плане являются установленные автором закономерности ползучести многокомпонентных СВС-карбидов: в интервале 1400–1600 °С при напряжениях от 150 до 300 МПа карбид  $(\text{Ta}_{0,2}\text{Ti}_{0,2}\text{Nb}_{0,2}\text{Zr}_{0,2}\text{Hf}_{0,2})\text{C}$  имеет скорость установившейся ползучести  $10^{-8}$ – $10^{-9} \text{ с}^{-1}$ , что на 1–2 порядка ниже, чем у бинарных карбидов тугоплавких металлов; основным механизмом деформации является дислокационное скольжение, доля которого составляет около 90 %. Определена активная система скольжения  $a/2\langle 011 \rangle \{111\}$ , характерная для карбидов с кристаллической структурой типа NaCl.

Положительной оценки заслуживает практическая часть работы, связанная с разработкой экономически эффективной технологии производства субмикронного порошка SiC, нанокерамики SiC и  $\text{B}_4\text{C}$  методом совмещения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и искрового плазменного спекания, высокоэнтропийных карбидов на основе тугоплавких металлов Hf, Ta, Ti, Nb, Zr, Mo и W.

Результаты диссертационной работы прошли апробацию и внедрены в технологический процесс производства керамики SiC на НПФ «Керамика». Разработанный субмикронный СВС-порошок карбида кремния используется для получения сегментов SiC керамики размером 100×100 мм, толщиной от 10 до 23 мм, обладающей комбинацией высоких свойств: твердостью 24,1 ГПа, трещиностойкостью 5  $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  и модулем упругости 450 ГПа. Эти характеристики делают материал перспективным для работы в условиях ударно-динамических нагрузок.

Представленные результаты достоверны, поскольку теоретические исследования выполнялись с использованием базовых положений и фундаментальных основ порошкового и традиционного материаловедения, а экспериментальные – с применением стандартных и оригинальных методик, современной технологической и аналитической аппаратуры.

Замечания:

1. На с. 23 (2-й абзац сверху) обсуждается кинетика уплотнения порошков карбида кремния, полученных различными способами. Отмечается, что порошок  $\text{SiC}_N$  демонстрирует замедленное уплотнение, которое автор связывает с присутствием и диссоциацией фазы  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Однако описание структурных эффектов, связанных с диссоциацией, не приводится. Образуется ли при этом газообразный азот, дефекты (расслоения, трещины и т.п.)?

2. Примесный состав порошков карбида кремния не приводится. На с. 23 (3-й абзац снизу) отмечается, что наивысшее значение твердости образцов  $\text{SiC}_T$  при их меньшей плотности связано с активацией зернограничного массопереноса при спекании фторсодержащими примесями. Возможно, следовало бы целенаправленно обеспечивать наличие фторсодержащих примесей?



Указанные замечания не затрагивают основных положений рецензируемой работы и не сказываются на её общей положительной оценке. Диссертация Московских Д.О. является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технологические решения, связанные с получением бинарных и многокомпонентных карбидов методами самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, высокоэнергетической механической обработки и искрового плазменного спекания, обладающих нетривиальным сочетанием физико-механических и эксплуатационных свойств, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Считаю, что представленная работа 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».

Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук по специальности  
05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы,  
профессор, профессор кафедры «Технологический инжиниринг»  
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический  
университет (НПИ) имени М.И. Платова»  
346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д.132;  
Тел. +7 (8635) 255 486. E-mail: dvyu56.56@mail.ru.

Я, Дорофеев Владимир Юрьевич, согласен на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Московских Д.О.

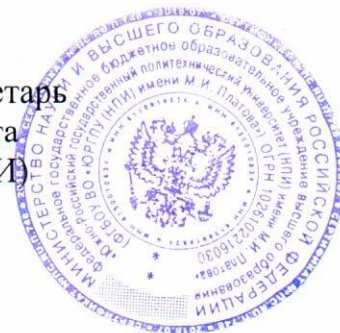


Дорофеев Владимир Юрьевич

13.04.2026

Подпись д. т. н., проф. Дорофеева Владимира Юрьевича заверяю:

Учёный секретарь  
ученого совета  
ЮРГПУ (НПИ)




Холодкова Нина Николаевна