

Отзыв

на автореферат диссертации Седегова Алексея Сергеевича «Разработка высокоэнтروпийных керамических материалов на основе тугоплавких карбидов $(\text{TaTiNbZr})\text{C}$ и $(\text{TaTiNbZrX})\text{C}$ ($\text{X} = \text{Hf}, \text{W}, \text{Mo}$) методами СВС и искрового плазменного спекания»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

Диссертационная работа Седегова Алексея Сергеевича посвящена получению и исследованию свойств нового класса сверхвысокотемпературных материалов – высокоэнтропийных карбидов (ВЭ) - с использованием комбинации подходов, включающей механическую обработку, самораспространяющийся высокотемпературный синтез и искровое плазменное спекание. ВЭ карбидная керамика по ряду свойств, включая высокие механические свойства при повышенных температурах, высокие температуры плавления, повышенное сопротивление окислению и высокую фазовую стабильность, превосходит другие типы материалов, используемых в разработке теплозащиты конструкций, что обуславливает острый **практический интерес** к применению этой керамики в таких важных сферах, как создание нового поколения энергетических установок. Полноценное практическое использование керамики на основе высокоэнтропийных карбидов и расширение сфер приложения невозможно без строгого научного подхода к изучению ее свойств, которые прямым образом связаны с составом и микроструктурой. **Фундаментальные закономерности** «состав-структура-свойства» для многокомпонентных систем ВЭ карбидов находятся пока еще в своей начальной стадии изучения.

Цель диссертационной работы Седегова А.С. состояла в разработке и получении ВЭ карбидов составов $(\text{TaTiNbZr})\text{C}$ и $(\text{TaTiNbZrX})\text{C}$ ($\text{X} = \text{Mo}, \text{W}, \text{Hf}$) комбинацией методов и определение технологических параметров каждой стадии для обеспечения высоких физико-механических свойств целевого материала. Сформулированная цель потребовала выполнения сразу нескольких нетривиальных и очень разноплановых научных задач, наиболее важными из которых являются: (i) проведение расчётов для определения фактора энтропийной стабилизации с целью выбора составов, обладающих наибольшей фазовой стабильностью; (ii) исследование влияния режимов механической обработки на морфологию, структуру и фазовый состав порошковых смесей; (iii) проведение самораспространяющегося высокотемпературного синтеза ВЭ карбидов, изучение особенностей процесса структурообразования, фазового состава и морфологии; (iv) выбор наиболее подходящей технологии получения компактных однофазных ВЭ карбидов; (v) сравнение результатов моделирования механических свойств и экспериментально

полученных данных; (vi) исследование ряда функциональных свойств компактных ВЭ карбидов.

Значимость поставленных в работе задач для решения фундаментальных и практических проблем современного высокотемпературного материаловедения очевидна, поэтому **актуальность** диссертационной работы Седегова Алексея Сергеевича не вызывает никакого сомнения.

Среди основных результатов, составляющих **научную новизну** работы, можно выделить следующие: расчетными методами определены составы ВЭ карбидов, обладающих высоким значением фактора энтропийной стабилизации; получены новые экспериментальные данные о высокотемпературном окислении карбида $(\text{Ta}_{0.25}\text{Ti}_{0.25}\text{Nb}_{0.25}\text{Zr}_{0.25})\text{C}$ и влиянии пятого элемента (Hf, Mo и W) на его жаростойкость; показано, что формирование $(\text{Ta}_{0.25}\text{Ti}_{0.25}\text{Nb}_{0.25}\text{Zr}_{0.25})\text{C}$ и $(\text{Ta}_{0.2}\text{Ti}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Hf}_{0.2})\text{C}$ карбидов в СВС процессах происходит через жидкую фазу, и дисперсность реакционной среды влияет на структуру конечного продукта; впервые определены высокотемпературные теплофизические свойства ВЭ карбида в диапазоне температур от 2500 до 5500 К. Установленные закономерности легли в основу **практических рекомендаций** по разработке материалов с улучшенными механическими свойствами.

Достоверность полученных результатов обеспечена обоснованным выбором методов аттестации материалов, использованием комплекса современных экспериментальных методов исследования физико-химических и функциональных свойств исследуемых объектов, а также согласованностью экспериментальных и расчетных результатов.

Многопрофильность и многоплановость исследования, которое стоит на стыке сразу нескольких научных направлений из разных областей знания, а именно, порошковой металлургии, химического материаловедения, механики разрушения твердых тел, химии твердого тела, вычислительных методов в материаловедении, теплофизики - формирует особую сложность данной работы, с которой автор успешно справился. Результаты работы А.С. Седегова были опубликованы в виде 7 научных статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ и входящих в базу данных Scopus, Web of Science, в том числе в журналах, входящих в Q1, и широко представлены на международных и российских конференциях.

При чтении автореферата диссертационной работы возникли некоторые вопросы и замечания, перечень которых приведен ниже.

1. В качестве обязательной стадии получения ВЭ карбидов Автор предложил использовать высокоэнергетическую механическую обработку реакционных смесей. Насколько оправданным выглядит это решение? Ведь в результате такой обработки происходит загрязнение смеси железом, а масштабируемость такого приема вызывает вопросы.

2. Формулировка п. 2 в разделе «Научная новизна» «легирование Hf обеспечивает наилучшую жаростойкость....., что достигается за счет образования комплексных оксидов типа $TiNb_2O_7$ и $Ta_2Hf_6O_{17}$ » не вполне точная, так как оксид $TiNb_2O_7$ образуется и при окислении ВЭ карбидов, содержащих в качестве пятого элемента молибден. Однако «молибденовая система» уступает по жаростойкости системе, содержащему гафний.

3. Чем вызвано отличие окислительного поведения в статических условиях ВЭ карбидов, содержащих молибден и вольфрам в качестве пятого элемента? И тот, и другой ВЭ карбид в исследуемом интервале температур образует летучие оксиды. Но согласно полученным результатам, молибден увеличивает жаростойкость, тогда как вольфрам ухудшает ее по сравнению с нулевым (без 5-го элемента) образцом.

4. Верхний слой окисленного в высокоэнтальпийном газовом потоке образца ВЭ карбида, содержащего гафний, проявляет ярко выраженный фазовый контраст (рис. 70 Диссертации). Однако данные ЭДС для отдельных областей этого слоя не приведены. Согласно данным РФА, в верхней части окисленного слоя были обнаружены «легкоплавкие» пентаоксиды тантала и ниобия (1872 и 1512°C, соответственно). Какова их роль в окислительном поведении?

5. В некоторых случаях Автор не приводит разброс значений (см., например, Таблицы 9 и 12 диссертации). В Таблице 14 диссертации приведены значения массы с 5-ю значащими цифрами после запятой, а ведь в Экспериментальной части Автор пишет, что масса измерялась с точностью до 0.001 г.

Высказанные замечания никоим образом не влияют на главные результаты и выводы работы. В целом, можно заключить, что работа А.С. Седегова «Разработка высокоэнтропийных керамических материалов на основе тугоплавких карбидов $(TaTiNbZr)C$ и $(TaTiNbZrX)C$ ($X = Hf, W, Mo$) методами СВС и искрового плазменного спекания» выполнена на высоком научном уровне и носит характер законченной научно-квалификационной работы, которая по актуальности, новизне, объему и достоверности полученных фундаментальных и практических результатов удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата химических наук (п.9 «Положение о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, в действующей редакции),

а ее автор, Седегов Алексей Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Бакланова Наталья Ивановна

Доктор химических наук по специальности 02.00.21 – химия твердого тела,

Ведущий научный сотрудник лаборатории химического материаловедения,

ФГБУН Институт химии твердого тела и механохимии

Сибирского отделения Российской академии наук

630128 г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18

Т. +7(383)233 24 10*1132

Факс +7(383) 332 28 47

e-mail: baklanova@solid.nsc.ru

15 августа 2023 г.



Бакланова Наталья Ивановна

Подпись Н.И. Баклановой заверяю

Ученый секретарь ИХТМ СО РАН

Д.х.н.



Т.П. Шахтшнейдер