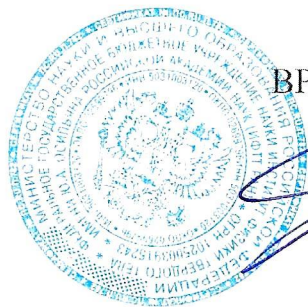




УТВЕРЖДАЮ
ВРИО Директора ИФТТ РАН

А.А. Левченко

12 ноября 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук» (ИФТТ РАН)

на диссертационную работу Семенчука Ильи Евгеньевича
«Самораспространяющийся высокотемпературный синтез ультратугоплавких карбидных керамик на основе систем Ta–Hf–C и Ti–Zr–C», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества»

Актуальность темы и выполненной работы

Разработка ультратугоплавких материалов на основе карбидов переходных металлов IV–V групп (Ti, Zr, Hf, Ta) отвечает стратегическим задачам современного материаловедения. Такие соединения характеризуются температурами плавления в диапазоне 3000–4000 °С, высокой твердостью (до 20 ГПа), модулем упругости (≈ 460 ГПа для HfC), химической стойкостью и сохранением механических свойств в агрессивных средах при экстремальных термических и механических нагрузках. Эти свойства обусловлены прочными ковалентно-ионными связями.

Карбидные твердые растворы на основе систем Ti–Zr–C и Ta–Hf–C демонстрируют улучшенные механические характеристики по сравнению с однофазными карбидами, что подтверждено как теоретическими расчетами, так и экспериментальными данными. Востребованность таких материалов в аэрокосмической технике (теплонагруженные элементы, обтекатели), атомной энергетике и металлургии определяет научную и технологическую значимость исследований в данной области.

Традиционные методы получения карбидной керамики (карботермическое восстановление, горячее прессование, искровое плазменное спекание) сопряжены с высоким энергопотреблением,

длительностью спекания и трудностями достижения высокой плотности и однородности структуры. В этих условиях методы на основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), разработанные академиком А.Г. Мержановым, представляют собой рациональную альтернативу. Особенно перспективны модификации СВС, сочетающие синтез и уплотнение - такие как СВС-компактирование и электротепловой взрыв под давлением.

Диссертационная работа выполнена в рамках тематического плана научно-исследовательской работы: Госзадание ИСМАН. Соискателем выигран проект УМНИК-21 (в) по договору № 17487ГУ/2022 от 26.04.2022, что подтверждает её соответствие приоритетным направлениям государственной научно-технической политики.

Содержание диссертационной работы

Работа логически выстроена и соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Она включает введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Цель исследования - синтез ультратугоплавкой карбидной керамики с субмикронной структурой на основе систем $Ti-Zr-C$ и $Ta-Hf-C$ с использованием комбинированного подхода: механическая активация, СВС-компактирование, электротепловой взрыв под давлением и баротермическое уплотнение.

В первой главе диссертационной работы проведен анализ литературы по свойствам карбидов переходных металлов, методам их синтеза и современным направлениям развития СВС-технологий. Отмечено, что системные исследования по синтезу керамики на основе $Ti-Zr-C$ и $Ta-Hf-C$ методом электротеплового взрыва под давлением в научной литературе отсутствуют.

Во второй главе подробно описаны методики приготовления реакционных смесей, термодинамического анализа, проведения СВС-процессов и последующей аттестации материалов. Используются современные методы анализа: рентгеновская дифрактометрия с уточнением структуры по Ритвельду, сканирующая электронная микроскопия, испытания физико-механических характеристик полученных материалов.

В третьей главе представлены результаты синтеза керамики Ta_4HfC_5 методом электротеплового взрыва под давлением. Показано, что механическая активация в гексане в течение 40–60 мин приводит к зарождению карбидной фазы и снижению температуры взрыва с 3300 до 2000 К. Получен материал Ta_4HfC_5 с относительной плотностью 90 % и

микротвердостью 14,5 ГПа. Проведены исследования по плазменной обработке порошка состава Ta_4HfC_3 и выявлено частичное разложение исходной фазы с образованием новой фазы $Ta_{0.93}Hf_{0.07}C$.

В четвертой главе исследовано влияние времени механической активации на фазовый состав керамики $Ti-Zr-C$. Установлено, что при активации в течение 5 минут формируется трехфазная структура, при 40-минутной активации формируется однофазный твердый раствор $Ti_{1-x}Zr_xC$, а при 90 мин - вновь трехфазная структура. Последняя характеризуется размером зерен 0,1–0,2 мкм, пористостью <10 % и микротвердостью 18,5 ГПа.

В пятой главе впервые применено баротермическое уплотнение в газостате для синтезированной керамики $Ti_{1-x}Zr_xC$. Достигнута плотность 99,2 %, микротвердость 20,9 ГПа и трещиностойкость 12,53 МПа·м^{1/2}. Выявлен спинодальный распад фазы $Ti_{0.51}Zr_{0.49}C$ при 1600 °C за 150 мин с образованием двух вторичных фаз, что согласуется с теоретическими представлениями о термодинамической неустойчивости системы $TiC-ZrC$ в данном температурном диапазоне.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность результатов обеспечена применением валидированных методик, использованием сертифицированного оборудования, воспроизводимостью экспериментов и согласованностью полученных данных с теоретическими и литературными данными. По теме диссертации опубликовано 20 работ, включая 7 статей в рецензируемых журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus, а также получен патент РФ на изобретение.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Впервые установлены закономерности влияния длительности механической активации на параметры электротеплового взрыва и формирование фазового состава в системах $Ti-Zr-C$ и $Ta-Hf-C$.
- Впервые показано, что баротермическое уплотнение СВС-керамики $Ti_{1-x}Zr_xC$ позволяет достичь плотности 99,2 % и рекордных физико-механических характеристик.
- Впервые экспериментально подтвержден механизм

спинодального фазоразделения в карбидной керамике Ti–Zr–C при баротермическом уплотнении.

- Впервые исследовано поведение порошка Ta₄HfC₅ при обработке в потоке высокотемпературной аргоновой плазмы, выявлены условия сфероидизации.

Научная и практическая значимость

Результаты работы имеют прикладное значение:

- Разработан и запатентован способ получения тугоплавкого материала на основе Ti–Zr–C с остаточной пористостью <1 % (патент РФ № 2816713 от 13.06.2023).

- Впервые синтезирована карбидная керамика Ta₄HfC₅ методом электротеплового взрыва под давлением с микротвердостью 14,5 ГПа и остаточной пористостью < 10%.

- Изготовлена партия образцов карбидной керамики Ti_{1-x}Zr_xC с рекордными физико-механическими свойствами: микротвердость 20,9 ГПа, трещиностойкость 12,53 МПа·м^{1/2}.

- Продемонстрирована возможность получения сферических частиц Ta_{0.97}Hf_{0.03}C при плазменной обработке, что открывает перспективы для аддитивных технологий.

Замечания по тексту диссертационной работы

Несмотря на высокий уровень проведенных исследований, к диссертационной работе имеется ряд замечаний:

1. В параграфе 3.1 «Механическая активация смеси (Ta+Hf+C)» отмечается: «Смеси порошков тантала и гафния подвергали механической активации (МА) для уменьшения размера частиц, так как большой размер частиц исходных порошков титана и циркония затрудняет синтез карбидных керамик Ta₄HfC₅». Однако в тексте отсутствует информация о степени уменьшения размера частиц после проведения механической активации и о том, как это изменение повлияло на процесс синтеза карбидных керамик. Такие данные являются важными для полноценного понимания и оценки эффективности проведенной методики.

2. В разделе, посвященном методике сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), наблюдается несоответствие в терминологии. В заголовке упоминается «растрового», в то время как далее в тексте используется термин «сканирующего». Нормы русского языка требуют

такого рода микроскопию называть сканирующей.

3. Кроме того, в параметрах микроскопа указана величина тока, которая должна быть представлена в наноамперах (nA), а не в амперах (A). Эти аспекты могут затруднить точное восприятие описанных методических подходов.

4. На страницах 83 и 84 наблюдается повторение фразы: «предпочтительно использовать механически активированную смесь (Ti+Zr+C) для синтеза карбидной керамики титана и циркония с равновесным составом, поскольку при экзотермическом взаимодействии взаимная диффузия металлов будет происходить с более высокой скоростью». Данная повторяемость может привести к избыточности текста и создать впечатление недостаточной оригинальности представленного материала. Уточнение или переформулирование одного из вариантов могло бы повысить читабельность и строгость изложения.

5. В разделе 2.4 «Методика определения химического анализа реакционных смесей» возникает вопрос о целесообразности использования термина «определения химического анализа». Возможно, более корректным будет использование формулировки «определение химического состава», что более точно отражает суть представленной методики.

Указанные замечания не снижают научной ценности работы.

Заключение

Диссертационная работа Семенчука И.Е. представляет собой завершённое научное исследование, выполненное на высоком научном уровне. В ней решена актуальная задача синтеза ультратугоплавких карбидных керамик с заданными структурными и механическими характеристиками с использованием передовых технологий. Полученные результаты подтверждены экспериментально, опубликованы в 20 научных работах (включая 7 в журналах, индексируемых Web of Science и Scopus), и защищены патентом РФ.

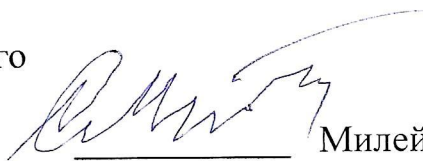
По объёму, глубине и качеству полученных результатов диссертация соответствует требованиям Постановления Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (в ред. от 11.09.2021) к кандидатским диссертациям.

Доклад Семенчука Ильи Евгеньевича по материалам диссертационной работы на тему «Самораспространяющийся высокотемпературный синтез ультратугоплавких карбидных керамик на основе систем Ta–Hf–C и Ti–Zr–C» заслушан на научном семинаре Физическое материаловедение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твёрдого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук

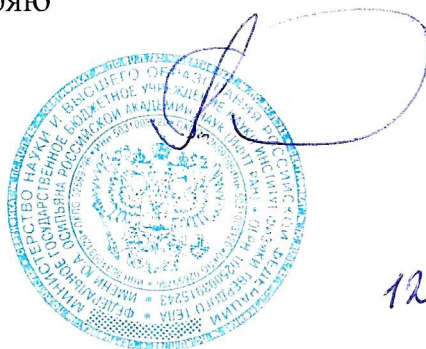
(ИФТТ РАН).

На основании изложенного считаем, что работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Семенчук Илья Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

Доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института физики
твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН

 Милейко С.Т.

подпись главного научного сотрудника, доктора технических наук
Милейко С.Т. заверяю



УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
ИФТТ РАН
ТЕРЕЩЕНКО А.Н.

12 ноября 2025г.

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН)

Адрес: ИФТТ РАН, г. Черноголовка, Московская обл., ул.Академика Осипьяна д.2, 142432, Россия

Телефон: 8(496)52 219-82; +7 906 095 4402

Сайт организации: <http://www.issp.ac.ru>

e-mail: adm@issp.ac.ru