

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации

Истоминой Елены Иннокентьевны «Кремнийсодержащие МАХ фазы и карбидные материалы в реакциях с участием монооксида кремния»

по специальности *2.6.14 Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов*

на соискание учёной степени доктора *технических наук*

Диссертационная работа Истоминой Е.И. посвящена развитию методов синтеза кремнийсодержащих МАХ-фаз и карбидных материалов с использованием монооксида кремния (SiO) в качестве ключевого реагента. Актуальность исследования обусловлена возрастающим спросом на высокотемпературные, жаропрочные и конструкционные материалы для применения в аэрокосмической, энергетической и химической промышленности. МАХ-фазы, сочетающие свойства металлов и керамик, представляют особый интерес, однако их синтез, особенно многоэлементных систем, остаётся сложной технологической задачей. Кроме того, актуальным направлением является и получение ультратугоплавких соединений из высокоэнтропийных карбидов, являющихся перспективными для применения в авиационно-космической технике. Использование предложенных в настоящей работе подходов с применением газообразного SiO в качестве силицирующего агента и оригинальных технологических решений открывает новые возможности для управляемого синтеза указанных материалов.

В работе проведен комплексный анализ литературы, который позволил обосновать выбор газообразного монооксида кремния в качестве ключевого силицирующего агента для синтеза МАХ-фаз и карбидных материалов. Определены перспективные направления исследований в области вакуумного карбосиликотермического восстановления (ВКСТВ). Установлены термодинамически выгодные условия для протекания целевых реакций для получения МАХ-фаз. Приведено описание разработанной конструкции лабораторного реактора для проведения ВКСТВ. Экспериментально определены режимы синтеза, обеспечивающие максимальный выход МАХ-фаз Ti_3SiC_2 (до 96 об.%) и Ti_4SiC_3 (до 92 об.%) из смесей TiO_2 , SiC и Si. Описаны результаты синтеза и исследования новых четверных МАХ-фаз в системе Zr–Ti–Si–C. Разработана двухстадийная технология (ВКСТВ + горячее прессование), позволившая получить плотную керамику с высокими механическими характеристиками. Изучены кинетические процессы, закономерности и механизмы фазообразования, связь состава исходных материалов с выходом конечных продуктов. Разработан реактор полузакрытого типа для получения композитных волокон C/SiC со структурой «сердцевина–оболочка» путём силицирования углеродных волокон газом SiO. Определены параметры, позволяющие управлять толщиной оболочки и степенью конверсии. Установлены закономерности высокотемпературной коррозии керамических материалов на основе Ti_3SiC_2 в среде CO.

Таким образом к пунктам научной новизны диссертации можно отнести следующее:

1. Впервые разработан метод вакуумного карбосиликотермического восстановления для синтеза новых кремнийсодержащих МАХ-фаз в системах Ti–Si–C и Zr–Ti–Si–C.

2. Впервые получены и охарактеризованы четверные соединения – МАХ-фазы Zr_2TiSiC_2 и Zr_3TiSiC_3 , которые являются единственными известными индивидуальными соединениями в системе Zr–Ti–Si–C.

3. Установлены закономерности фазообразования и превращений в процессе ВКСТВ, определены оптимальные условия синтеза с высоким выходом целевых фаз.

4. Впервые изучен процесс силицирования карбидов и оксикарбидов титана монооксидом кремния, установлена зависимость состава продуктов от содержания углерода в исходных материалах.

5. Разработана методика получения композитных волокон C/SiC со структурой «сердцевина–оболочка» путём силицирования углеродных волокон в полузакрытом реакторе.

Практическая ценность работы подтверждается внедрением разработанных методов в производство новых материалов. Разработана технология получения жаропрочной керамики на основе МАХ-фаз Ti_3SiC_2 и Ti_4SiC_3 , а также их твёрдых растворов с цирконием. Создана методика синтеза высокоэнтропийного карбида $(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)C$, что позволило получить ультратугоплавкую керамику с улучшенными механическими свойствами. Разработан процесс получения композитных волокон C/SiC, перспективных для создания жаропрочных и армированных материалов. Результаты работы защищены 8 патентами РФ, что свидетельствует о высоком потенциале промышленного внедрения.

К работе имеются следующие замечания.

1. Некоторые дифрактограммы для синтезированных МАХ-фаз приведены от 30 градусов по углу 2θ , что не позволяет идентифицировать и проанализировать рефлексы от базальных плоскостей на малых углах.

2. Проводился ли анализ фазового состава уплотненных образцов МАХ-фаз? Возможно, наблюдались вторичные фазы, так как температура консолидации была достаточно высокой.

3. В автореферате не приведены результаты по разделу 10 Главы 3. Не ясно какой состав конечных продуктов был получен.

4. Как оцениваются перспективы масштабирования реактора для синтеза МАХ-фаз? Проводилось ли сравнение характеристик предложенного метода и существующих методов производства коммерческих порошков из МАХ-фаз?

Приведенные выше замечания не снижают значимости полученных научных результатов и общей положительной оценки работы.

Диссертационная работа «Кремнийсодержащие МАХ фазы и карбидные материалы в реакциях с участием монооксида кремния» соответствует паспорту специальности 2.6.14 *Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов* (технические науки), а также требованиям п.9

Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842 и Положению о совете по защите диссертаций, утвержденного приказом Министерства образования и науки РФ от 13.01.2014 г. №7. Автор диссертационной работы *Истомина Елена Иннокентьевна* заслуживает присуждения учёной степени *доктора технических наук* по специальности *2.6.14 Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов*.

На размещение отзыва в сети Интернет и обработку персональных данных согласен.

Рецензент:

заведующий лабораторией перспективных материалов и обеспечения безопасности водородных энергосистем Отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ), 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, тел. +7 (3822) 60-63-33, e-mail: tpu@tpu.ru, сайт: www.tpu.ru
доктор физико-математических наук (1.3.8. Физика конденсированного состояния)

Кашкаров Егор Борисович
26.01.2026



Подпись *Е.Б. Кашкарова* удостоверяю
И.о. учёного секретаря



В.Д. Новикова