

На правах рукописи

**Давыдов Денис Михайлович**

**САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ  
СИНТЕЗ ПОРИСТЫХ МАХ-ФАЗ  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  ПРИ ГОРЕНИИ НА  
ВОЗДУХЕ И В ПЕСКЕ**

**1.3.17. Химическая физика, горение и  
взрыв, физика экстремальных состояний вещества**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Самара – 2024**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» на кафедре «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы»

Научный руководитель: **Амосов Александр Петрович**  
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Бажин Павел Михайлович**  
доктор технических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН, г. Черноголовка Московской области

**Каченюк Максим Николаевич**  
доктор технических наук, профессор кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Защита состоится: «06» декабря 2024 года в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.377.01 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» и на сайте <https://d24237701.samgtu.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять, по адресу: Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.01, тел. (846) 242-27-76, e-mail: [mtm.samgtu@mail.ru](mailto:mtm.samgtu@mail.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.377.01,  
к.т.н., доцент

Д.А. Майдан

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

Разработке пористых керамических материалов уделяется большое внимание, так как они находят широкое применение во многих отраслях промышленности и в медицине как в качестве готовых изделий (фильтры, носители катализаторов, тепловые трубы, элементы теплозащиты, экраны электромагнитных излучений, биоимпланты и т. д.), так и в виде компонентов композиционных материалов или заготовок для дальнейших технологических операций. Пористые материалы могут иметь природное происхождение (пумциты, туфы, цеолиты и др.), а могут создаваться искусственно, например, из МАХ-фаз.

МАХ-фазы – вид тройных карбидных или нитридных соединений с общей формулой  $M_{n+1}AX_n$ , где  $n = 1, 2$  или  $3$ ,  $M$  - переходный металл,  $A$  - элемент А-подгруппы таблицы Менделеева,  $X$  – углерод или азот. МАХ-фазы карбоалюминиды титана  $Ti_3AlC_2$  и карбосилициды титана  $Ti_3SiC_2$  являются наиболее распространенными и привлекательными из-за их уникальных свойств. Стойкость к окислению, высокие тепло- и электропроводность, стойкость к термоударам, пластичность при высоких температурах, жаростойкость, низкие показатели плотности и обрабатываемость механическими способами показали, что эти материалы обладают уникальным сочетанием керамических и металлических свойств. Несмотря на то, что МАХ-фазы занимают по свойствам промежуточное положение между керамикой и металлами, их относят к новой керамике (a new class of ceramic materials), называя «пластичной» керамикой (“ductile” ceramic materials), замечательной керамикой (remarkable ceramics) и керамикой из МАХ-фаз (МАХ-phase ceramics).

Существующие методы получения пористых МАХ-фаз отличаются многоступенчатостью процесса изготовления, высокой энергоемкостью производства, а также необходимостью использования сложного технологического оборудования и специальных химических агентов. Метод СВС позволяет из исходных химических компонентов синтезировать керамические соединения (карбиды, бориды, нитриды, МАХ-фазы и др.) в наиболее простом и экономичном режиме и, одновременно, получать керамику в форме пористых заготовок с высокой долей открытых пор. В большинстве случаев пористые СВС-материалы из МАХ-фаз получают сжиганием смесей исходных реагентов (шихт) в реакторах с защитной атмосферой или вакуумом, что усложняет и удорожает процесс получения этих пористых СВС-изделий и ограничивает их габариты.

В связи с этим актуальной задачей является разработка способа получения пористых каркасов МАХ-фаз карбосилицида титана и карбоалюминиды титана методом СВС в простейших условиях безреакторного горения на открытом воздухе и на воздухе в песчаной засыпке с контролируемыми параметрами макроструктуры, фазового состава и физических свойств, обеспечивающими различные последующие применения синтезированных пористых каркасов этих МАХ-фаз.

**Цель работы:** установление особенностей и закономерностей синтеза пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  методом СВС в простейших условиях безреакторного горения на открытом воздухе и на воздухе в песчаной засыпке.

Для достижения поставленной цели в работе должны быть решены следующие задачи:

1. Экспериментальное получение пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  из соответствующих стехиометрических смесей элементных порошковых реагентов методом СВС в режиме горения в простейших условиях безреакторного горения на открытом воздухе и в засыпке из песка.

2. Исследование влияния добавления избыточного количества легкоплавкого компонента шихты, использования различных марок исходных порошков, замены элементных порошков на соединения в исходной шихте, различного усилия формования заготовок на фазовый состав, макро- и микроструктуру и свойства пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$ , полученных методом СВС в режиме горения в засыпке из песка.

3. Установление оптимальных составов исходных компонентов шихты для получения методом СВС в режиме горения в засыпке из песка однородной бездефектной макроструктуры и высоких прочностных характеристик пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$ .

4. Влияние состава газовой атмосферы на образование поверхностных пленок, их фазовый состав, толщину и распределение по пористому каркасу при получении пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  методом СВС в режиме горения в различных условиях: на открытом воздухе, на воздухе в засыпке из песка, в атмосфере газообразного азота или аргона, в вакууме.

5. Определение физико-механических свойств пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$ , полученных методом СВС в режиме горения на воздухе в засыпке из песка.

6. Экспериментальное исследование коррозионной стойкости пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$ , полученных методом СВС в режиме горения на воздухе в засыпке из песка.

7. Исследование биосовместимости с клетками костного мозга пористого каркаса МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$ , полученного методом СВС в режиме горения на воздухе в засыпке из песка, для использования в качестве биоимплантов.

8. Исследование сочетания процесса СВС на открытом воздухе пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  с последующей самопроизвольной инфильтрацией расплавом металла для получения керамико-металлических композиционных материалов (керметов).

**Научная новизна работы:**

1. Впервые получены пористые каркасы МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  методом СВС в простейших условиях в режиме горения на воздухе в засыпке из песка без использования реактора и другого дорогостоящего оборудования.

2. Впервые экспериментально исследовано влияние добавления избыточного количества легкоплавкого компонента шихты, использование различных марок исходных порошков, замены элементных порошков на соединения в исходной

шихте, различного давления формования заготовок на фазовый состав, структуру и свойства пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$ , полученных методом СВС в режиме горения на воздухе в засыпке из песка.

3. Впервые экспериментально установлены оптимальные составы исходных компонентов шихты для получения равномерной бездефектной макроструктуры и высоких прочностных характеристик пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  методом СВС в режиме горения на воздухе в засыпке из песка.

4. Впервые исследовано влияние состава газовой атмосферы на образование поверхностных пленок, их фазовый состав, толщину и распределение по пористым каркасам МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$ , полученных методом СВС в режиме горения в различных условиях: на открытом воздухе, на воздухе в засыпке из песка, в атмосфере газообразного азота или аргона, в вакууме.

5. Определены физико-механические и коррозионные свойства пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$ , полученных методом СВС в режиме горения на воздухе в засыпке из песка.

6. Впервые исследована биосовместимость с клетками костного мозга с целью использования в качестве биоимпланта пористого каркаса МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$ , полученного в режиме горения методом СВС на воздухе в засыпке из песка.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Получены пористые керамические каркасы МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  методом СВС в простейших условиях безреакторного горения на воздухе в засыпке из песка с равномерной бездефектной макроструктурой, открытой пористостью и высокими прочностными характеристиками.

2. Определен оптимальный состав исходных компонентов шихты для образования равномерной бездефектной макроструктуры, достаточных прочностных характеристик пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$ , полученных методом СВС в режиме горения на воздухе в засыпке из песка, а также высокого содержания МАХ-фаз по отношению к побочным продуктам реакции – крупнодисперсная марка порошка титана ТПП-7, графит марки С-2.

3. Определен оптимальный режим формования заготовок перед СВС МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  на воздухе в засыпке из песка для образования равномерной бездефектной макроструктуры пористых каркасов – 22,5 МПа.

4. Установлено, что внешние поверхности пористых СВС-каркасов  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$ , синтезированных на открытом воздухе, покрыты пленкой, состоящей из оксидов и нитридов титана Ti и легкоплавкого элемента шихты (Si или Al), толщиной около 100 мкм. При этом, в центральных слоях образцов пористых каркасов МАХ-фаз карбосилицида титана и карбоалюминид титана на поверхностях открытых пор были обнаружены пленки, преимущественно нитрида титана TiN, толщиной, не превышающей 20 мкм. На поверхностях образцов пористых каркасов  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$ , полученных методом СВС на воздухе в засыпке из песка, толщина оксидо-нитридных пленок значительно меньше, чем при сжигании на открытом воздухе, и составляет около 20 мкм. При синтезе пористых каркасов МАХ-фаз в атмосфере азота на стенках пор наблюдается пленка нитрида титана толщиной около 20 мкм, а также скопление частиц нитрида титана в

поровом пространстве. На поверхностях пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$ , полученных методом СВС в атмосфере аргона или вакууме, оксидных пленок не наблюдается.

5. Определены физико-механические свойства пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$ , полученных методом СВС в режиме горения на воздухе в засыпке из песка.

6. Достаточная прочность в 104 МПа и биосовместимость с клетками костного мозга пористого каркаса МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$ , полученного в режиме горения методом СВС на воздухе в засыпке из песка, позволяет использовать его в качестве биоимпланта.

7. Результаты диссертационной работы нашли практическое использование в ООО «НПЦ Самара», где разработанные пористые образцы МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  испытаны и рекомендованы как перспективная замена легких и износостойких фильтрующих элементов в оснащении нефтепромыслового оборудования, в ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» для проведения исследования биосовместимости разработанных пористых каркасов МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$ , а также в подразделениях ФГБОУ ВО «СамГТУ»: «Центре литейных технологий» для получения литых образцов керамико-металлических композиционных материалов (керметов), в научно-исследовательской деятельности лаборатории «Цифровые двойники материалов и технологических процессов их обработки», в учебном процессе на кафедре «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы».

#### **Соответствие паспорту заявленной специальности.**

Тема и содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества (технические науки) по пунктам 4 и 5:

4. Закономерности и механизмы распространения, структура, параметры и устойчивость волн горения, детонации, взрывных и ударных волн; связь химической и физической природы веществ и систем с их термохимическими параметрами, характеристиками термического разложения, горения, взрывчатого превращения; термодинамика, термохимия и макрокинетика процессов горения и взрывчатого превращения.

5. Процессы аналоги горения, детонации и взрыва; взаимодействие волн горения и взрывчатого превращения со средой, объектами и веществами; явления, порождаемые горением и взрывчатым превращением; процессы горения и взрывчатого превращения в устройствах и аппаратах для производства энергии, работы, получения веществ и продуктов; управление процессами горения и взрывчатого превращения.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследования влияния состава исходной шихты на формирование равномерной бездефектной макроструктуры, высоких прочностных характеристик и высокого содержания МАХ-фаз по отношению к побочным продуктам реакции при получении пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  методом СВС в простейших условиях безреакторного горения на воздухе в засыпке из песка.

2. Результаты исследования физико-механических и коррозионных свойств пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$ , полученных методом СВС в режиме горения на воздухе в засыпке из песка.

3. Результаты исследования влияния состава газовой атмосферы на образование поверхностных пленок, их фазовый состав, толщину и распределение по сечению пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$ , полученных методом СВС в режиме горения на открытом воздухе, на воздухе в засыпке из песка, в атмосфере газообразного азота или аргона, в вакууме.

4. Результаты исследований на биосовместимость с клетками костного мозга пористого каркаса МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$ , полученного в простейших условиях безреакторного горения методом СВС на воздухе в засыпке из песка.

5. Результаты исследований применимости синтезированных пористых керамических каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  в сочетании с самопроизвольной инфильтрацией расплавом металла для получения керамико-металлических композиционных материалов (керметов).

#### **Достоверность полученных результатов.**

Достоверность результатов работы обеспечена применением современных методов научного исследования, многократным повторением экспериментов, обработкой их результатов и соответствием результатов других авторов. В работе использовано проверенное и современное научно-аналитическое оборудование, прошедшее аттестацию с использованием эталонных образцов.

**Работа выполнена при финансовой поддержке** Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

#### **Апробация результатов работы.**

Основные результаты работы доложены и обсуждены:

На 3-ей международной конференции по физике и химии горения и процессов в экстремальных условиях ComPhysChem'24 (2024); XXI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Высокие технологии в машиностроении» (г. Самара, 2024); международной школе-конференции «Перспективные высокоэнтропийные материалы» (г. Черноголовка, 2022); международной конференции «Физика и технологии перспективных материалов» (г. Уфа, 2021); X Международной школе, посвященной 10-летию лаборатории «Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы» (г. Тольятти, 2021); конференции «Порошковая металлургия: современное состояние и будущее» (г. Киев, 2014); всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат-2012» (г. Москва, 2012); международном научно-техническом форуме, посвященном 100-летию ОАО «КУЗНЕЦОВ» и 70-летию СГАУ (г. Самара, 2012); XVIII международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов» (г. Самара, 2012); всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука Технологии Инновации.» Часть 4 (г. Новосибирск, 2012); всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука Технологии Инновации.» Часть 7 (г. Новосибирск, 2012).

### **Публикации.**

Основное содержание работы изложено в 24 публикациях, из них 6 статей опубликованы в научных журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК РФ, 6 статей - в журналах, включенных в библиографическую базу данных цитирования Web of Science и Scopus.

**Личный вклад автора** заключается в сборе и анализе литературных источников, экспериментальных данных по процессам горения порошков металлов, выборе методик эксперимента, участии в проведении экспериментов, обработке результатов исследований. Автором проведены исследования, демонстрирующие преимущества предложенной методики в сравнении с существующими аналогами. Постановка задач, положений и обсуждение результатов научных исследований выполнены самим автором или при его непосредственном участии. Подготовка основных статей проводилась при непосредственном участии автора, и сделаны доклады на научных конференциях.

**Структура и объем диссертации:** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 138 использованных источников. Диссертация изложена на 172 страницах и содержит 80 рисунков, 9 таблиц и приложений на 4 страницах.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлено обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость проведенных исследований. Представлены сведения об апробации и достоверности полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, а также дана краткая характеристика диссертационной работы.

**В первой главе** на основе литературного обзора показано, что разработка новых энергоэффективных и дешевых способов получения пористых керамических изделий является актуальной задачей на сегодняшний день. Для их получения рассматриваются относительно новые классы материалов – МАХ-фазы. Среди них МАХ-фазы карбосилицида титана  $Ti_3SiC_2$  и карбоалюминид титана  $Ti_3AlC_2$  являются наиболее распространенными и привлекательными из-за их уникальных свойств, сочетающих в себе свойства металла и керамики. Описаны методы получения МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$ , среди которых метод СВС является наиболее энергоэффективным, экономичным и привлекательным. Рассмотрены основные области их применения, в том числе в качестве пористой керамической заготовки (каркаса) для получения керамико-металлических материалов (керметов) путем инфильтрации каркаса расплавом металла, а также в качестве биосовместимых костных имплантов.

**Во второй главе** представлено описание исходных порошковых компонентов для СВС с учетом доступности и рыночной стоимости: титана марок ТПП-7, ПТС-1, ПТМ-1, кремния марки Кр0, графита марок С-2 и ГЛС-1, сажи марок Т 900 и П 701, алюминия марки ПА-4. Приведены технологические схемы получения МАХ-

фаз на открытом воздухе и на воздухе в засыпке из песка, вспомогательное оборудование. Кроме того, определены методы исследования пористых каркасов: растровая электронная микроскопия (РЭМ) и микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) – для изучения микроструктуры и элементного состава; рентгенофазовый анализ (РФА) – для определения фазового состава; порометрия – для определения пористости на основе данных плотности, которая находилась методом гидростатического взвешивания в дистиллированной воде (ГСВ), а также с помощью программного комплекса ImageJ по фотографиям с растрового электронного микроскопа. Описаны использованные общепринятые методики определения микротвердости по Виккерсу и прочности при сжатии для объективной оценки уровня механических свойств получаемых СВС-каркасов. Определены методики определения коррозионной стойкости и биосовместимости к клеткам костного мозга.

**В третьей главе** представлены особенности получения пористых каркасов на основе МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$  в стехиометрической системе 3Ti-Si-2C методом СВС в простейших условиях безреакторного горения на открытом воздухе и на воздухе в засыпке из песка, исследованы пористость, фазовый состав, макроструктура и микроструктура.

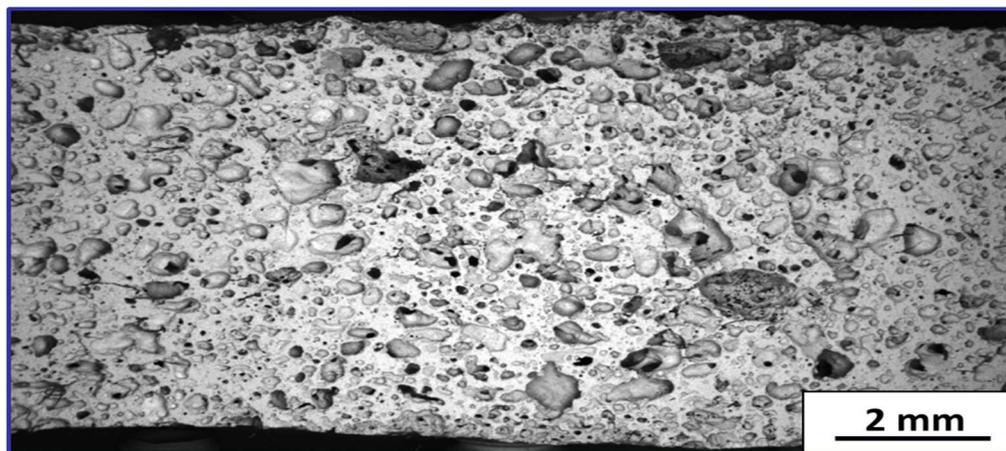


Рисунок 1 - Макроструктура пористого каркаса МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$ , полученного методом СВС в режиме горения на воздухе в засыпке из песка

Макроструктура МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$  представляет собой пористый каркас с наличием открытых (40%) и закрытых пор (рисунок 1). Средняя пористость колеблется в пределах 50-60 %. Максимальный размер пор (до 4 мм) наблюдался в поперечных направлениях относительно распространения волны горения. Минимальный размер пор (менее 10 мкм) наблюдался в пластинах с высокой плотностью. Рентгенофазовый анализ показал, что содержание целевой МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$  в конечном продукте составляет до 66 масс. %, а примесных фаз карбида титана TiC и дисилицида титана  $TiSi_2$  составляет около 32 масс. % и 2 масс. % соответственно.

На рисунке 2 (слева) на изломе блока пластин МАХ-фазы карбосилицида титана отчетливо видны кристаллы, которые имеют наноламинатное строение.

Поперечные размеры блоков пластин МАХ-фазы находятся в интервале от 0,1 до 2 мкм.

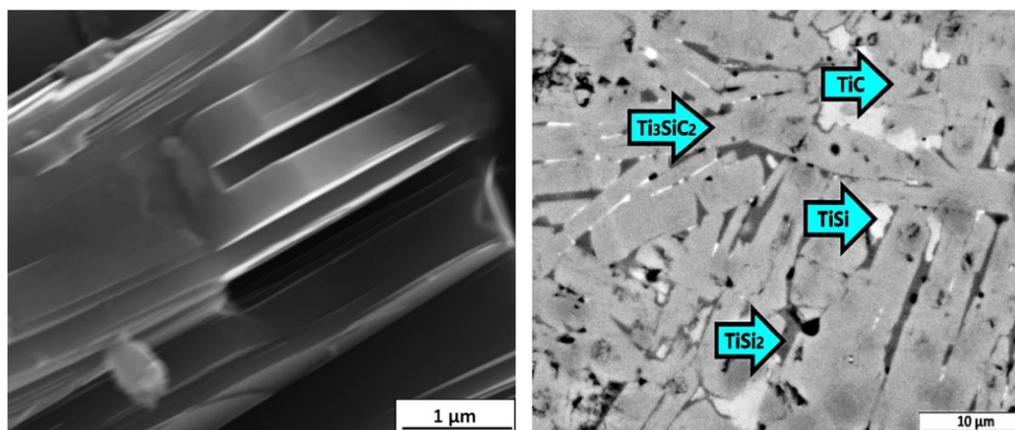


Рисунок 2 – Микроструктура пористого каркаса МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$

На рисунке 2 (справа) показано распределение фаз на фотографии с микрошлифа пористого каркаса. Микроструктура представляет собой чередование пластин МАХ-фазы карбосилицида титана  $Ti_3SiC_2$  и частиц карбида титана  $TiC$  в связке силицида титана ( $TiSi$ ;  $TiSi_2$ ). На рисунке видно, что пластины МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$  расположены блоками и имеют хаотично направленный порядок роста.

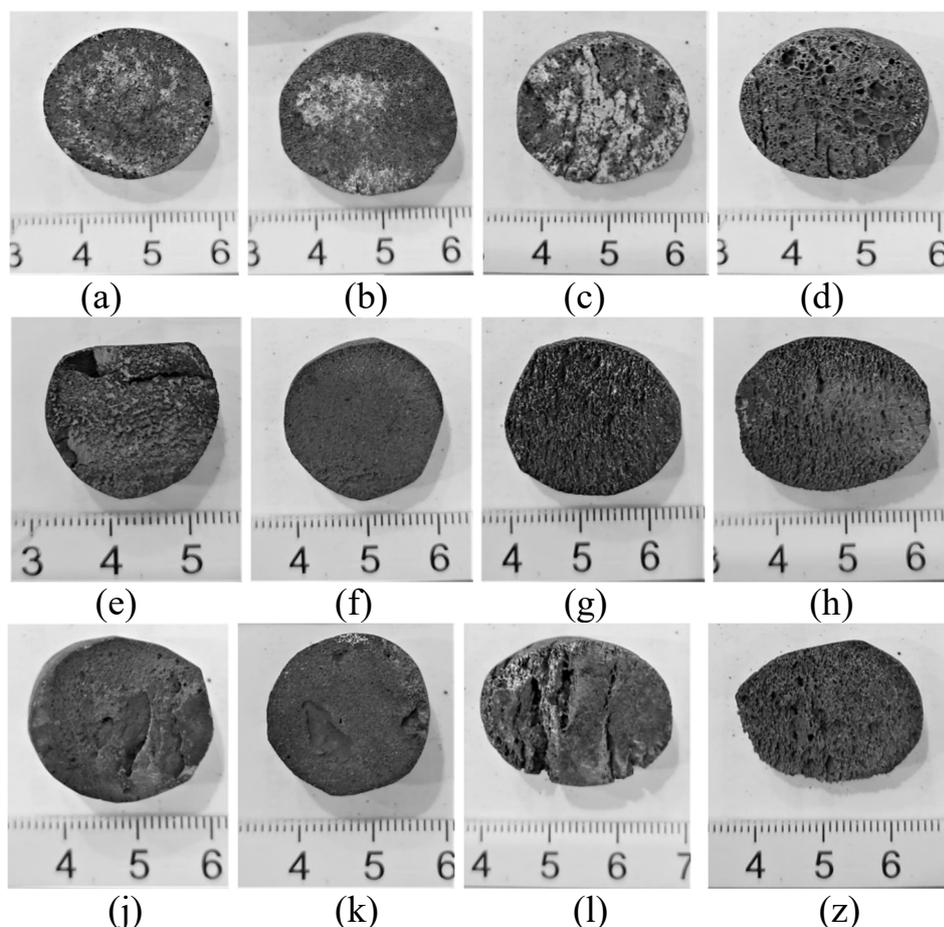


Рисунок 3 - Образцы после СВС в системе  $Ti(x)-Si(Kp0)-C(y)$ , где  $x$  (a,b,c,d – ТПП-7; e,f,g,h – ПТС-1; j,k,l,z – ПТМ-1),  $y$  (a,e,j- C-2; b,f,k – ГЛС-1; c,g,l – Т 900; d,h,z – П 701)

На рисунке 3 наглядно представлено влияние исходных порошковых компонентов на макроструктуру пористых каркасов после СВС на воздухе в засыпке из песка. Установлено, что образцы, синтезированные с использованием крупного порошка титана марки ТПП-7 и графитовых порошков марок С-2 и ГЛС-1, лучше сохранили цилиндрическую форму исходной прессованной шихтовой заготовки, равномерную мелкопористую макроструктуру без макродефектов (раковин, трещин, расслоений), чем образцы, полученные из средних и мелких фракций порошков титана (ПТС-1, ПТМ-1) и углерода (П 701, Т 900).

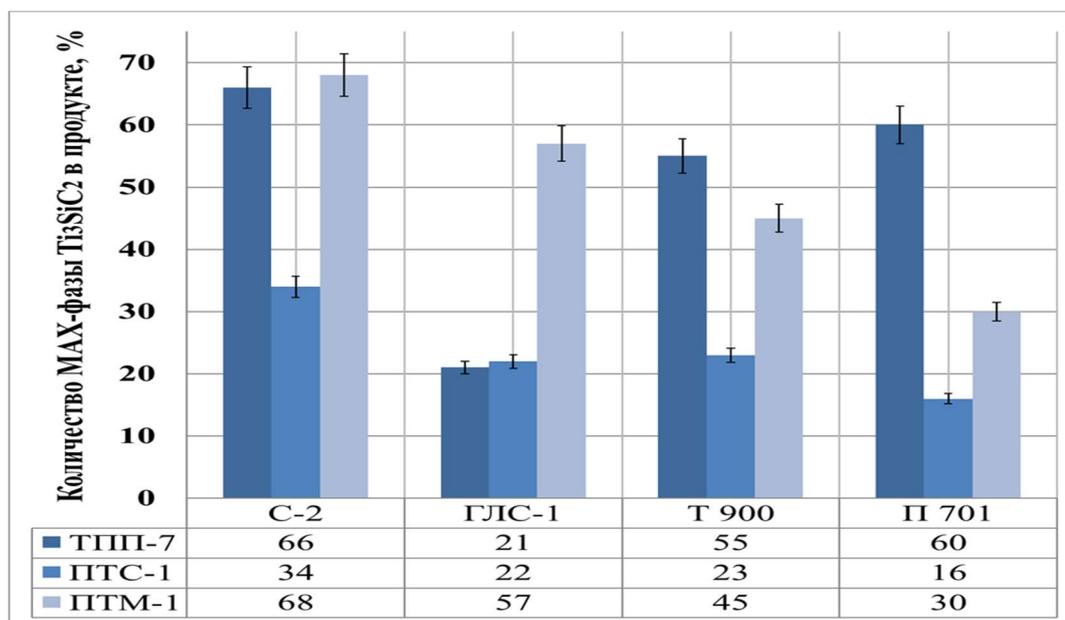


Рисунок 4 – Количественный РФА содержания МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$  в образцах СВС-каркасов для различных форм углерода и марок порошка титана, масс. %

На диаграмме рисунка 4 видно, что наиболее стабильно высокое содержание целевого соединения МАХ-фазы карбосилицида титана  $Ti_3SiC_2$  по сравнению с примесями наблюдается при использовании в качестве исходных реагентов порошка графита С-2. Максимальное количество МАХ-фазы карбосилицида титана было получено с использованием графита С-2 и порошка титана марки ПТМ-1 (составляет 68 масс.%), а также порошка графита С-2 и порошка крупного титана ТПП-7 (составляет 66 масс.%). Наименьшие значения по количеству МАХ-фазы в продукте показали образцы, синтезированные с использованием порошка марки ПТС-1 – количество МАХ-фазы от 34 масс.% и ниже.

Поэтому дальнейшие исследования проводились с использованием вышеуказанных крупных фракций порошков титана и углерода.

При получении МАХ-фазы карбосилицида титана методом СВС в режиме горения из-за очень высокой температуры реакции образования промежуточной фазы карбида титана  $TiC$  (около 3000 °С) часть порошкового кремния расплавляется и начинает испаряться ( $T_{пл}=1415^{\circ}C$ ), тем самым нарушая стехиометрический состав шихты и уменьшая количество МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$  в полученном продукте. Для увеличения количества МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$  и

уменьшения примесей ( $TiC$  и  $TiSi_2$ ) при синтезе в режиме горения на воздухе в засыпке из речного песка был добавлен избыток легкоплавкого кремния по сравнению со стехиометрическим соотношением в шихте. В результате исследования влияния добавления избытка кремния в исходную шихту  $3Ti+xSi+2C$ , где  $x$  (моль) –1; 1,15; 1,25; 1,5; 1,75 и 2, при сжигании методом СВС на воздухе в засыпке из песка установлено, что оптимальный состав шихты должен содержать избыток кремния 15 масс.% для получения СВС - композита с максимальным количеством МАХ - фазы карбосилицида титана - 70 масс.% по сравнению с другими фазовыми составляющими ( $TiC$ ,  $TiSi_2$ ). Добавление избытка кремния 25 масс.% и больше приводит к существенному уменьшению количества МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$  и увеличению количества силицида титана  $TiSi_2$ .

Для увеличения выходного количества МАХ-фазы в пористом каркасе было проведено исследование по замене элементного легкоплавкого кремния на соединение дисилицид титана ( $TiSi_2$ ) с более высокой температурой плавления 1540 °С. Установлено, что замена элементных порошков титана и кремния на порошок силицида титана  $TiSi_2$  в исходной шихте  $3Ti+Si+2C$  при сжигании методом СВС на воздухе в засыпке из песка приводит к появлению в продукте новой побочной фазы карбида кремния  $SiC$ , которую не наблюдали при синтезе с участием элементных порошков  $Ti$ ,  $Si$  и  $C$ . Количественный РФА показывает, что при этом содержание МАХ-фазы в продукте уменьшается до 56 масс. % при замене 25 масс. % кремния на силицид титана. А при полной замене (100 масс. %) кремния на силицид титана  $TiSi_2$  в исходной шихте содержание МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$  в продукте уменьшается еще больше до 20 масс. %.

Исследование влияния давления прессования шихтовой заготовки показало, что наиболее однородный и бездефектный по макроструктуре пористый каркас  $Ti_3SiC_2$  получается методом СВС на воздухе в засыпке из песка из заготовки, сформованной давлением прессования 22,5 МПа в цилиндрической пресс – форме диаметром 23 мм (рисунок 5). Общая пористость этого каркаса составляет 49 %.

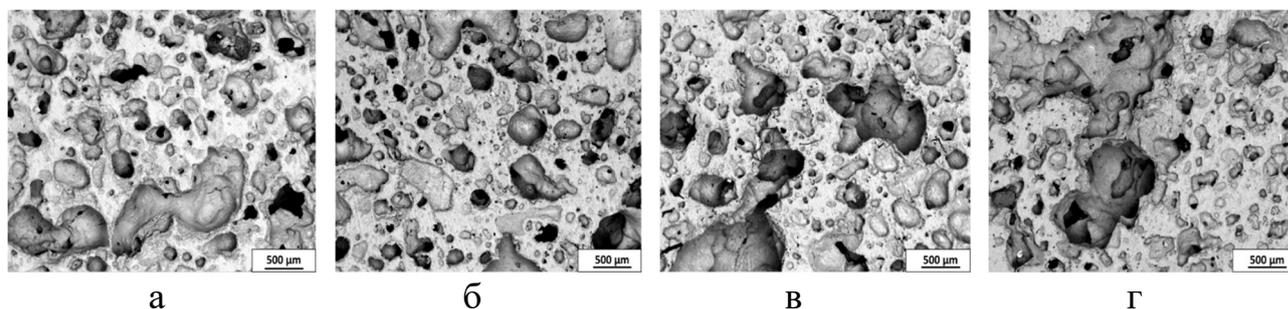


Рисунок 5 – Фотографии сечения пористого каркаса  $Ti_3SiC_2$  при различных давлениях прессования заготовки, МПа: а – 11,2; б – 22,5; в – 33,6; г – 44,8

При этом распределение пор на образце с давлением прессования 22,5 МПа более равномерное по сравнению с образцом, полученным с давлением 11,2 МПа, а на образцах, полученных при давлениях 33,6 МПа и 44,8 МПа, после синтеза наблюдаются неоднородности макроструктуры с крупными вытянутыми порами размерами 1-2 мм.

На рисунке 6 показано, что пористые СВС-каркасы  $Ti_3SiC_2$ , синтезированные на открытом воздухе, покрыты пленками, состоящими из оксидов и нитридов титана суммарной толщиной около 100 мкм, а при СВС на воздухе в засыпке из песка их толщина значительно меньше и составляет около 20 мкм. При этом, в центральных слоях образцов пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  на поверхностях открытых пор были обнаружены пленки, преимущественно нитрида титана, толщиной, не превышающей 20 мкм. А в закрытых порах пленки отсутствовали в связи с тем, что к ним не было доступа атмосферных газов при остывании образцов.

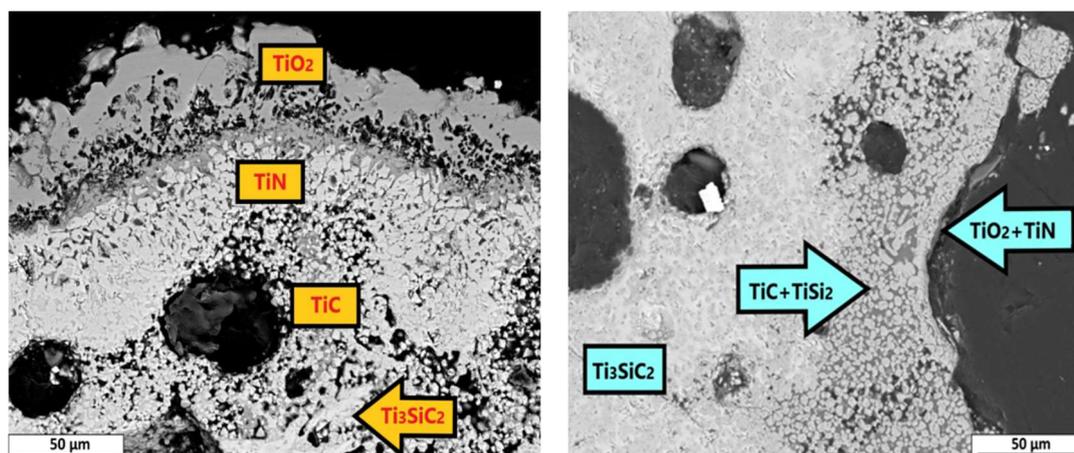


Рисунок 6 – Поверхностные пленки при СВС МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$  на открытом воздухе (слева) и на воздухе в засыпке из песка (справа)

На наружных поверхностях непосредственно под оксидно-нитридными пленками был зафиксирован слой (толщиной 30 мкм при синтезе в песке, 50 мкм – на открытом воздухе) без МАХ-фазы, состоящий только из фазы карбида титана  $TiC$  в окружении дисилицида титана  $TiSi_2$ . Этот слой, вероятно, образовался из-за быстрой отдачи тепла на краевых участках образца и испарения легкоплавкой составляющей шихты – кремния. Засыпка из песка уменьшает тепловые потери при остывании образца на воздухе, тем самым увеличивая время для образования МАХ-фазы. В центральных областях образцов такой слой не наблюдался. При синтезе пористого каркаса МАХ-фазы в среде газообразного азота на поверхностях обнаружена нитридная пленка толщиной 20 мкм и конгломераты частиц нитрида титана. Результаты исследования показали, что в атмосфере инертного газа и в вакууме на поверхности порового пространства отсутствуют какие-либо пленки или образования.

**В четвертой главе** представлены особенности получения пористых каркасов на основе МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$  в стехиометрической системе  $3Ti-Al-2C$  методом СВС в простейших условиях безреакторного горения на открытом воздухе и на воздухе в засыпке из песка, исследованы пористость, фазовый состав, макроструктура и микроструктура.

Макроструктура МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$  представляет собой пористый каркас с наличием открытых (45%) и закрытых пор (рисунок 7). Средняя пористость колеблется в пределах 50-65%. Средний размер пор колеблется от 20 до 350 мкм. Содержание МАХ - фазы  $Ti_3AlC_2$  в конечном продукте составляет около 52 масс.

%, а примесных фаз карбида титана  $TiC$  и алюминиды титана  $TiAl$  составляет 46 масс. % и 2 масс.% соответственно.

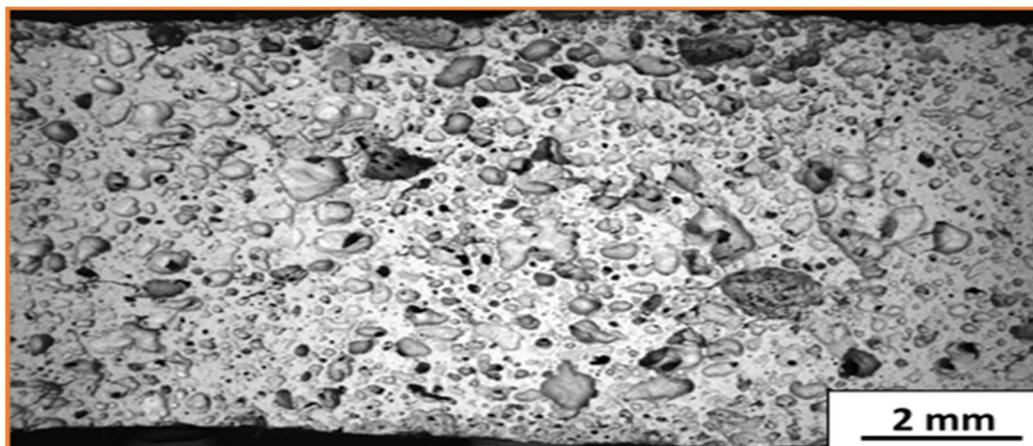


Рисунок 7 - Макроструктура пористого каркаса МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$ , полученного методом СВС в режиме горения на воздухе в засыпке из песка

На изломе блока пластин МАХ-фазы карбоалюминиды титана (рисунок 8 слева) видно наноламинатную микроструктуру характерную для МАХ-фаз. Поперечные размеры блоков пластин МАХ-фаз находятся в интервале от 0,1 до 2 мкм. Микроструктура на микрошлифе (рисунок 8 справа) представляет собой хаотичное чередование блоков пластин МАХ-фазы карбоалюминиды титана  $Ti_3AlC_2$  и частиц карбида титана  $TiC$  в связке интерметаллида  $TiAl$ .

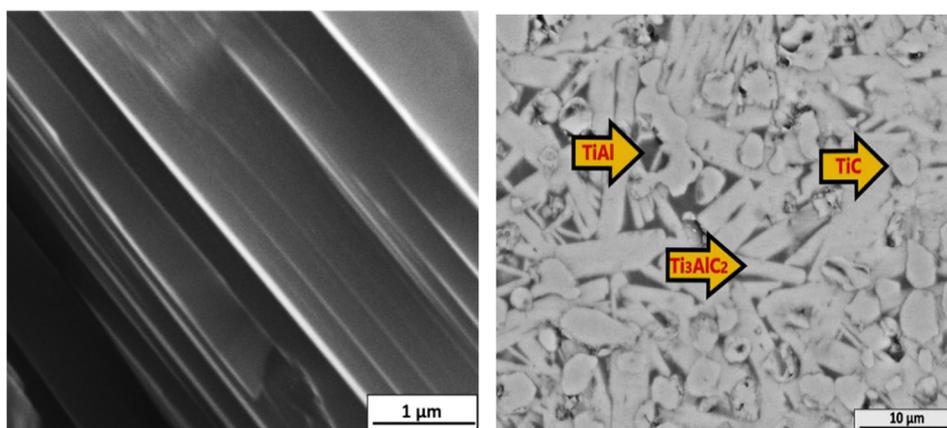


Рисунок 8 – Микроструктура пористого каркаса МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$

Определен оптимальный состав исходных компонентов шихты для образования равномерной бездефектной макроструктуры пористого каркаса МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$  и минимального содержания примесей в продукте.

Установлено, что, аналогично с МАХ-фазой  $Ti_3SiC_2$ , использование элементарных порошков крупнодисперсного порошка титана марки ТПП-7 и графита С-2 позволяет получать однородные пористые каркасы по макроструктуре (рисунок 9). При этом обнаружено, что графитовые порошки С-2 и ГЛС-1 способствуют сохранению исходной геометрической формы в большей степени, в то время как порошки сажи Т 900 и П 701 обеспечивают более равномерную пористость

образцов. При использовании элементных порошков титана и углерода более мелких фракций при горении образуются расслоения, крупные поры и нарушается геометрическая форма образцов.

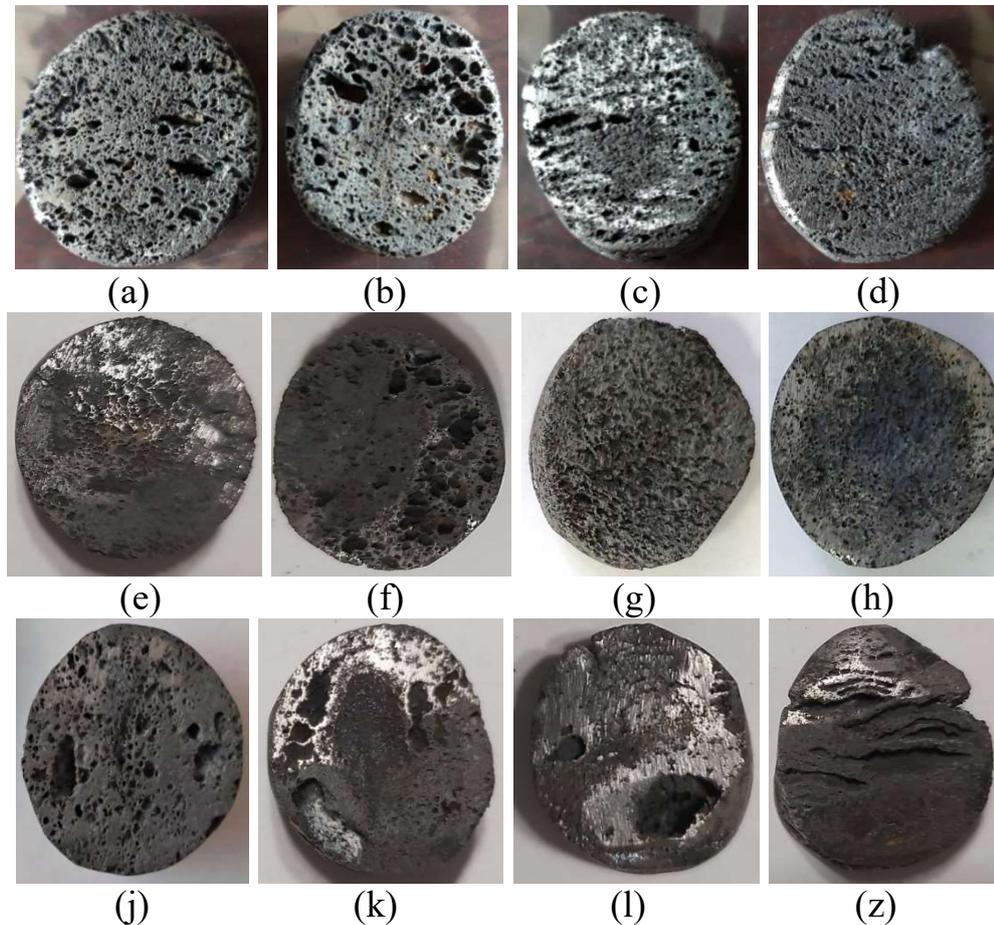


Рисунок 9 - Образцы после СВС в системе  $Ti(x)-Al(ПА-4)-C(y)$ , где  $x$  (a,b,c,d – ТПП-7; e,f,g,h – ПТС-1; j,k,l,z – ПТМ-1),  $y$  (a,e,j- C-2; b,f,k – ГЛС-1; c,g,l – Т 900; d,h,z – П 701)

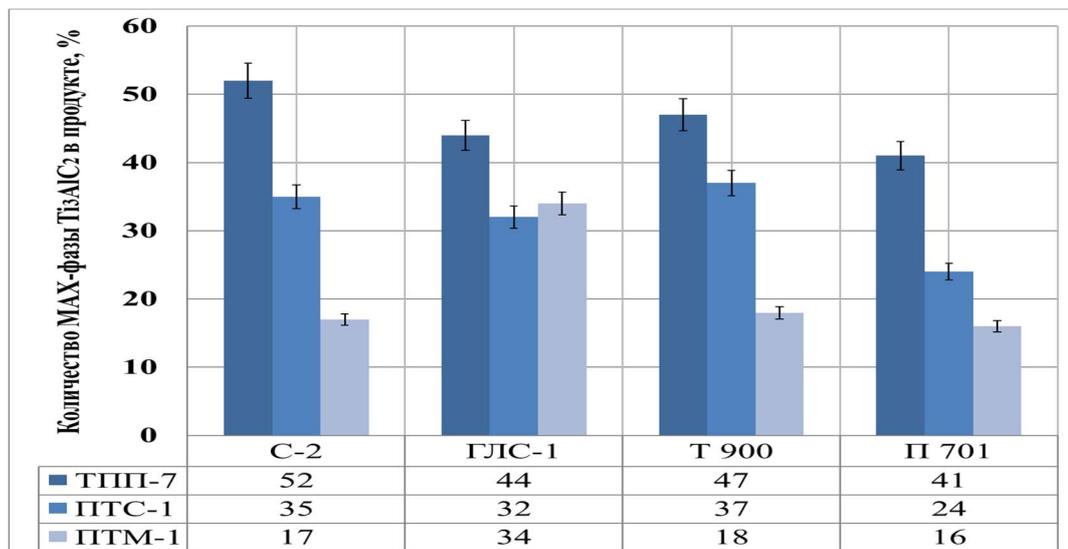


Рисунок 10 - Количественный РФА содержания МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$  в образцах, синтезированных из различных форм углерода и марок порошка титана

На диаграмме рисунка 10 видно, что наибольшее содержание целевого соединения  $Ti_3AlC_2$  наблюдается при использовании в качестве реагентов порошка титана ТПП-7, а также графита С-2 и сажи Т 900: до 52 и 47 масс.% соответственно. При использовании порошков титана ПТС-1 и ПТМ-1 увеличивается содержание побочных продуктов - фазы карбида титана и силицида титана.

Поэтому дальнейшие исследования проводились с использованием вышеуказанных крупных фракций порошков титана и углерода.

Была исследована возможность повышения количества МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$  по отношению к побочным продуктам синтеза ( $TiC$ ,  $TiAl$ ) при получении методом СВС в режиме горения на воздухе в засыпке из речного песка с помощью добавления избыточного количества порошка алюминия для компенсации потенциальных его испарения при экстремальных температурах горения (температура образования промежуточной фазы карбида титана  $TiC$  составляет около  $3000^{\circ}C$ , а температура плавления алюминия  $T_{пл}=660^{\circ}C$ ). При добавлении избытка порошка алюминия в исходную шихту в количестве 15 масс.% количество МАХ-фазы карбоалюминида титана в полученном продукте увеличивается до максимального значения 57 масс.% при малом содержании 3 масс.% интерметаллида  $TiAl$ . При дальнейшем повышении избытка алюминия до 100 масс.% содержание МАХ-фазы снижается до 42 масс.%, а содержание фазы  $TiAl$  увеличивается до 15 масс.%. При любом содержании избытка алюминия количество фазы карбида титана сильно не изменяется и колеблется в пределах от 40 до 46 масс.%.

Синтезированы пористые каркасы с использованием порошка  $TiAl$  в системе  $Ti-Al-TiAl-C$  взамен элементных порошков  $Ti$ ,  $Al$ . В результате проведенных исследований установлено, что замена порошков титана и алюминия на порошок алюминида титана  $TiAl$  в исходной шихте приводит к уменьшению целевой МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$ . При такой замене максимальное количество МАХ-фазы карбоалюминида титана  $Ti_3AlC_2$  в полученных пористых каркасах не превышает 35 масс.%, а при замене на 100 масс.% количество МАХ-фазы снижается до 4 масс.%.

Установлено, что давление прессования заготовок влияет на пористость синтезированных пористых каркасов (рисунок 11).

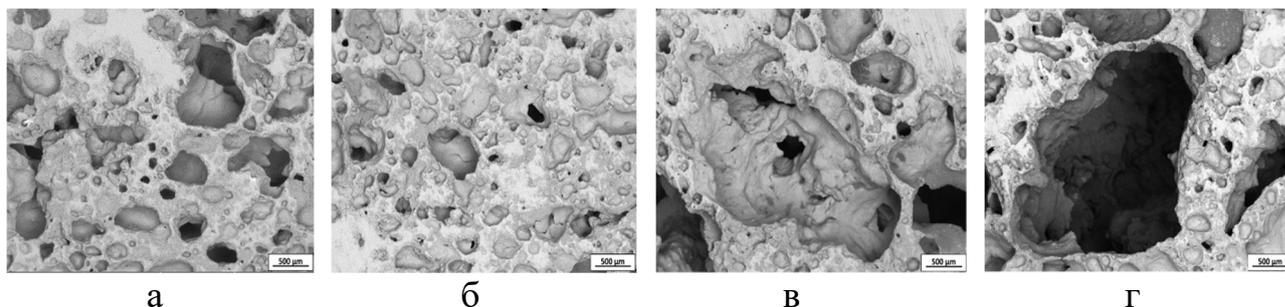


Рисунок 11 – Фотографии сечения пористого каркаса  $Ti_3AlC_2$  при различных давлениях прессования заготовки, МПа: а – 11,2; б – 22,5; в – 33,6; г – 44,8

Выбрано оптимальное давление прессования заготовок массой 10 грамм, при котором формируется однородная бездефектная макроструктура пористого

каркаса с сохранением геометрической формы после синтеза - 22,5 МПа. В остальных случаях образуются дефекты макроструктуры в виде крупных вытянутых пор размерами 1-2 мм и нарушение геометрической формы каркаса.

На рисунке 12 показано, что пористые СВС-каркасы  $Ti_3AlC_2$ , синтезированные на открытом воздухе, покрыты оксидно-нитридными пленками суммарной толщиной около 80-100 мкм, а при СВС на воздухе в засыпке из песка их толщина значительно меньше и составляет около 10-15 мкм. При этом на поверхности образца, синтезированного на открытом воздухе оксидно-нитридная пленка состоит в основном из оксида алюминия  $Al_2O_3$ , а поверхность образца, синтезированного на воздухе в засыпке из песка, покрыта оксидно-нитридной пленкой, состоящей из нитрида титана  $TiN$  и оксида алюминия  $Al_2O_3$ .

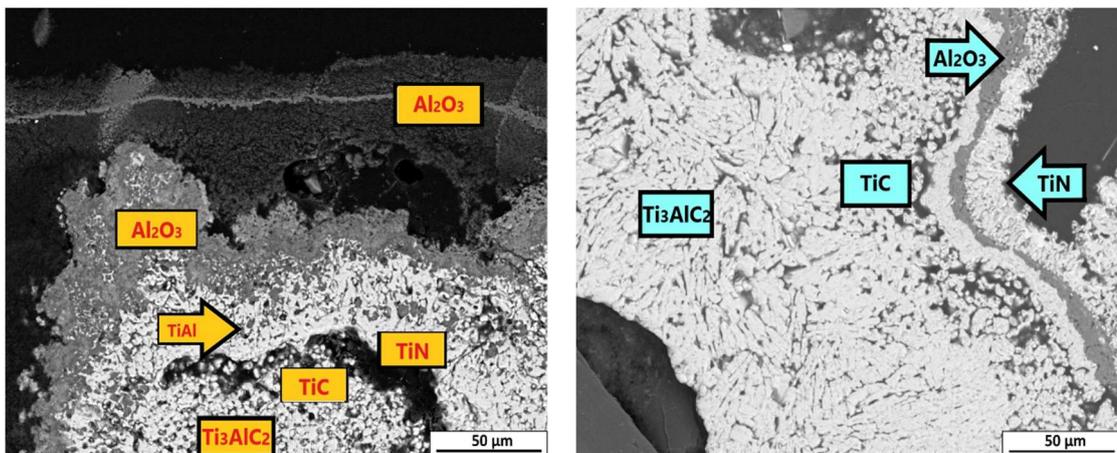


Рисунок 12 – Поверхностные пленки при СВС МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$  на открытом воздухе (слева) и на воздухе в засыпке из песка (справа)

Под оксидно-нитридными пленками в обоих случаях образовалась зона без МАХ-фазы, состоящая только из частиц карбида титана  $TiC$  и алюминида титана  $TiAl$ . Толщина этой зоны при синтезе на открытом воздухе составляет 10-20 мкм, а на воздухе в засыпке из песка 5-10 мкм. На поверхностях сквозных пор в центре образцов присутствуют тонкие оксидно-нитридные пленки толщиной 5-10 мкм. В закрытых порах нитридные пленки отсутствуют, так как у них не было доступа к атмосферным газам при остывании образца. Исследования микроструктуры порового пространства полученного каркаса СВС  $Ti_3AlC_2$  показали, что при синтезе в среде газообразного азота на поверхностях пор образуются микропленки, состоящие из нитрида титана размером около 20-30 мкм. При синтезе в вакууме и среде инертного газа аргона поверхностных пленок не наблюдалось.

**В пятой главе** исследованы основные характеристики пористых каркасов: плотность, пористость, прочность на сжатие, микротвердость по Виккерсу, коррозионная стойкость, биосовместимость к клеткам костного мозга, применение каркасов для изготовления керметов с повышенными механическими и трибологическими свойствами.

Из таблицы 1 видно, что плотность СВС-образцов с применением крупного порошка титана ТПП-7 и разных видов углерода колеблется в пределах от 1,77 до 2,51 г/см<sup>3</sup>. СВС – каркас карбосилицида титана, полученный с использованием

крупного порошка титана ТПП-7 и порошка графита С-2, обладает самыми высокими показателями прочности на сжатие - 104 МПа. Максимальное значение прочности на сжатие пористого каркаса СВС – карбоалюминиды титана, полученного с использованием крупной марки титана ТПП-7 и сажи марки П 701 составляет 60 МПа. Очевидно, что различный фракционный состав, строение исходных порошков и примеси влияют на физико-химические процессы горения и определяют структуру и свойства конечного пористого каркаса, как МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$ , так и МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$ .

Таблица 1 – Характеристики пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$

Смесь исходных порошков (шихта)	Плотность каркаса после синтеза, г/см <sup>3</sup>	Общая пористость, %		Открытая пористость, %	Прочность на сжатие, МПа	Количество МАХ-фазы, масс.%
		РЭМ	ГСВ			
Ti-Al-C(С-2)	2,01	59	55	40	46	52
Ti-Al-C(ГЛС-1)	1,77	63	61	43	44	44
Ti-Al-C(Т 900)	2,51	51	45	35	56	47
Ti-Al-C(П 701)	2,24	55	51	39	60	41
Ti-Si-C(С-2)	2,41	57	53	41	104	66
Ti-Si-C(ГЛС-1)	2,12	60	56	40	47	21
Ti-Si-C(Т 900)	2,20	53	50	28	45	55
Ti-Si-C(П 701)	2,12	55	57	31	39	60

Наибольшей общей и открытой пористостью обладают образцы с использованием порошка графита ГЛС-1 – общая пористость, определенная по фотографиям с использованием РЭМ у МАХ – фазы  $Ti_3SiC_2$  общая пористость составляет 60%, открытая – 40%, а у МАХ – фазы  $Ti_3AlC_2$  общая пористость составляет 63%, открытая – 43%. Порошок графита С-2 в смеси с крупным порошком титана ТПП-7 обеспечивает более стабильное значение открытой пористости и высокое содержание целевой МАХ-фазы в синтезированном пористом СВС-каркасе.

На рисунке 13 видно, что при увеличении количества избытка легкоплавкой фазы кремния или алюминия прочность на сжатие СВС – каркасов МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$  и МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$  повышается и достигает 141 МПа и 125 МПа соответственно. Соотношения МАХ-фазы, карбида титана и силицида титана или алюминиды титана в полученных пористых каркасах влияют на прочностные характеристики. Общая пористость испытываемых образцов составляла 50-65%, масса 10 граммов, диаметр 23 мм, высота 10 мм.

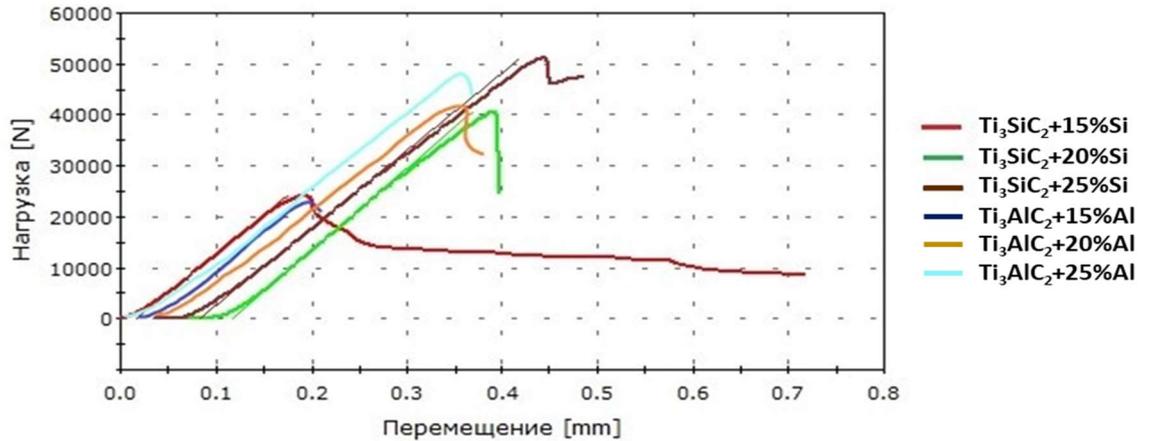


Рисунок 13 – Кривые нагружения на сжатие пористых образцов синтезированных МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  с избытками кремния и алюминия от 15% до 25% в шихте

Для оценки биосовместимости синтезированного пористого карбосилицида титана использовали образцы, полученные во время синтеза на воздухе в засыпке из песка. Эксперименты по биосовместимости проводились в лаборатории культур клеток «Института экспериментальной медицины и биотехнологий» ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет».

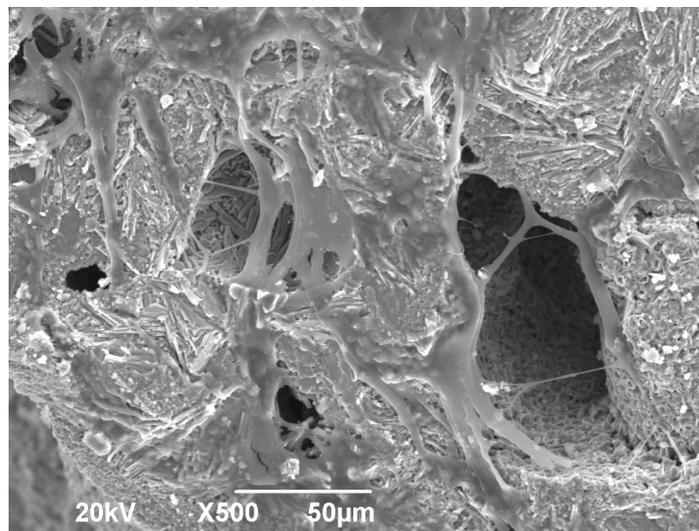


Рисунок 14 - Клетки костного мозга в порах каркаса МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$

На образце в большом количестве визуализировались клетки, которые фиксировались отростками на поверхности и в просвете пор в равном количестве (рисунок 14). В ходе проведенного эксперимента не были обнаружены признаки негативного воздействия карбосилицида титана на живые клетки.

Микротвердость по Виккерсу МАХ-фаз карбосилицида титана и карбоалюминид титана схожа и колеблется от 4 ГПа до 4,2 ГПа, что соответствует литературным источникам.

Результаты коррозионных испытаний показали высокую степень стойкости к  $\text{CO}_2$  - коррозии. Средняя скорость коррозии для испытанных МАХ – фаз  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  и  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  составляет не более 0,028 мм/год. Окислению препятствуют высокие антикоррозионные свойства МАХ-фаз и карбида титана, а также наличие поверхностных окисно-нитридных пленок в поровом пространстве образцов, образованные в результате синтеза на воздухе.

Пористые керамические каркасы, синтезированные методом СВС в режиме горения на открытом воздухе, могут применяться для последующей самопроизвольной инфильтрации расплавами металлов при получении керамико-металлических композиционных материалов (керметов) с повышенными механическими и трибологическими свойствами. Этот способ изготовления был применен при участии автора диссертации для изготовления керметов  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2\text{-Sn}$ ,  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2\text{-(Cu-10\%Si)}$  и  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2\text{-(Al-12\%Si)}$  пропиткой расплавами металлов неостывших горячих пористых каркасов МАХ – фаз  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  и  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ , предварительно полученных невакуумным методом СВС на открытом воздухе без использования реактора.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Энергоэффективным методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) в простейших условиях безреакторного горения на открытом воздухе и на воздухе в засыпке из речного песка прессованных стехиометрических смесей порошковых реагентов (шихт)  $3\text{Ti}+\text{Si}+2\text{C}$  и  $3\text{Ti}+\text{Al}+2\text{C}$  получены пористые керамические каркасы с однородной структурой без макродефектов (раковин, трещин, расслоений), общей пористостью 50 – 65%, открытой пористостью 40 - 45%, с размером пор от 5 до 350 мкм, которые состоят преимущественно из МАХ-фаз  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  и  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  в количестве до 66 масс.% и 52 масс.% соответственно, а также содержат побочные фазы карбида титана  $\text{TiC}$  и силицида титана  $\text{TiSi}_2$  или алюминида титана  $\text{TiAl}$ . Максимальные температуры горения при получении МАХ-фаз  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  и  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  составили 1780 °С и 1880 °С соответственно.

2. Выявлены марки исходных порошков титана и углерода, обеспечивающие наиболее однородную бездефектную структуру пористых каркасов МАХ-фаз (крупный порошок титана марки ТПП-7 и крупные графитовые порошки марок С-2 и ГЛС-1), наибольшее содержание МАХ-фаз (ТПП-7 и С-2), наибольшую прочность при сжатии (104 МПа у  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  для ТПП-7 и С-2, 60 МПа у  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  для ТПП-7 и сажи П 701). В итоге для получения пористых каркасов МАХ-фаз  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  и  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  рекомендовано применение порошков ТПП-7 и С-2 с использованием давления прессования их шихтовых заготовок 22,5 МПа.

3. Показано, что добавление порошков кремния  $\text{Kp0}$  и алюминия ПА-4 в избытке в стехиометрические шихты  $3\text{Ti}+\text{Si}+2\text{C}$  и  $3\text{Ti}+\text{Al}+2\text{C}$  увеличивает количество МАХ-фаз  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  и  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  в синтезированных пористых каркасах до максимальных значений 70 масс.% и 57 масс.% соответственно при избытке 15

масс.%, а при избытке 25 масс.% прочность пористых каркасов при сжатии возрастает до 141 МПа и 125 МПа соответственно.

4. Исследовано влияние состава газовой атмосферы (воздуха, азота, аргона) и вакуума на образование тонких пленок на поверхности и в поровом пространстве пористых образцов при СВС МАХ-фаз карбосилицида и карбоалюминида титана. При синтезе на открытом воздухе образуются оксидно–нитридные пленки толщиной около 100 мкм, засыпка из песка уменьшает толщину оксидно–нитридных пленок до 20 мкм. Под оксидно-нитридными пленками зафиксирован слой, обедненный МАХ-фазой, толщиной 30-50 мкм. При синтезе в атмосфере азота образуются пленки нитрида титана толщиной около 20 мкм. При синтезе в аргоне или в вакууме образование оксидно–нитридных пленок не наблюдается.

5. Результаты коррозионных испытаний показали высокую стойкость пористых каркасов МАХ –фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$ , синтезированных на воздухе в засыпке из песка, к  $CO_2$  – коррозии, средняя скорость коррозии составила не более 0,028 мм/год, что может быть связано с образованием тонких поверхностных оксидно-нитридных пленок при синтезе пористых каркасов.

6. При исследовании биосовместимости синтезированного в песчаной засыпке пористого каркаса МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$  зафиксированы отсутствие его токсичности к культурам мезенхимальных мультипотентных стволовых клеток, хорошие адгезивные свойства клеток к поверхности материала и их пролиферативная активность, что также может быть связано с образованием тонких поверхностных оксидно-нитридных пленок при синтезе пористого каркаса и открывает перспективу его применения в качестве биомпланта.

7. Синтезированные на открытом воздухе пористые керамические каркасы МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  в неостывшем, горячем состоянии успешно применены для последующей самопроизвольной инфильтрации расплавами металлов при получении керамики-металлических композиционных материалов (керметов)  $Ti_3SiC_2-Sn$ ,  $Ti_3SiC_2-(Cu-10\%Si)$  и  $Ti_3AlC_2-(Al-12\%Si)$  с повышенными механическими и трибологическими свойствами.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и/или Web of Science:

1. Davydov, D.M. Influence of Starting Reagents on the Formation of  $Ti_3SiC_2$  Porous Skeleton by SHS in Air / D.M. Davydov, A.P. Amosov, E.I. Latukhin, E.R. Umerov // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 2024. - Vol.33. - №.1. - P. 26–32. DOI: 10.3103/S1061386224010023.

2. Davydov, D.M. SHS of Porous Skeletons of  $Ti_3AlC_2$  and  $Ti_3SiC_2$  МАХ Phases Using Different Brands of Starting Powders / D.M. Davydov, A.P. Amosov, E.I. Latukhin, E.R. Umerov // AIP Conference Proceedings 2533. - 2022. - №020031. – P. 1-5. DOI: 10.1063/5.0098878.

3. Davydov, D.M. The influence of elemental powder raw material on the formation of the porous frame of  $Ti_3AlC_2$  МАХ-phase when obtaining by the SHS method / D.M.

Davydov, E.R. Umerov, E.I. Latukhin, A.P. Amosov // Science Vector of Togliatti State University. – 2021 - №3. – P. 37-47. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-3-37-47.

4. Davydov, D.M. Synthesis of MAX-Phase of Titanium Silicon Carbide ( $Ti_3SiC_2$ ) as a Promising Electric Contact Material by SHS Pressing Method / D.M. Davydov, A.P. Amosov, E.I. Latukhin // Applied Mechanics and Materials. – 2015. - Vol.792. – P. 596-601. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.792.596.

5. Davydov, D.M. The Influence of Gas Atmosphere Composition on Formation of Surface Films in Self-propagating High-temperature Synthesis of Porous  $Ti_3SiC_2$  // D.M. Davydov, A.P. Amosov, E.I. Latukhin / Modern Applied Science. – 2015. - Vol. 9. - №3. - P. 17-24. DOI: 10.5539/mas.v9n3p17.

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

6. Давыдов, Д.М. Особенности состава и микроструктуры пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3AlC_2$  и  $Ti_3SiC_2$ , получаемых методом СВС на воздухе и в защитной оболочке из песка / Д.М. Давыдов, А.П. Амосов, Е.И. Латухин, Э.Р. Умеров, В.А. Новиков // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. - 2023. - №4(46). – P. 88-97. DOI: 10.57070/2304-4497-2023-4(46)-88-97.

7. Амосов, А.П. Исследование возможности получения длинномерных образцов МАХ-кермета  $Ti_3AlC_2-Al$  методом СВС с самопроизвольной инфильтрацией расплавом алюминия / А.П. Амосов, Е.И. Латухин, Э.Р. Умеров, Д.М. Давыдов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. - 2022. - Т.16. - №3. - С.24–36. DOI: 10.17073/1997-308X-2022-3-24-36.

8. Латухин, Е.И. Формирование структуры и состава кермета  $TiC/Al$  при самопроизвольной инфильтрации расплава алюминия в пористый горячий каркас карбида титана, полученный методом СВС / Е.И. Латухин, Е.А. Амосов, Э.Р. Умеров, Д.М. Давыдов // Научно-технические технологии в машиностроении. - 2022. – №4(130). – С. 3-12. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-4-3-12.

9. Давыдов, Д.М. Получение СВС-процессом новых алюмокерамических каркасных композиционных материалов / Д.М. Давыдов, А.П. Амосов, Е.И. Латухин // Металлургия машиностроения. – 2016. - №2. - С. 30-33. eLIBRARY ID: 25817898.

10. Амосов, А.П. Влияние газифицирующих добавок на фазовый состав продуктов горения при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе МАХ-фаз в системе  $Ti-C-Al$  / А.Ф. Федотов, Е.И. Латухин, А.А. Ермошкин, Д.М. Давыдов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2014. - Т.16. - №6. - С. 50-55.

#### **Публикации в других изданиях:**

11. Davydov, D.M. Synthesis of porous MAX phases  $Ti_3SiC_2$  and  $Ti_3AlC_2$  by combustion in air and river sand / D.M. Davydov, A.P. Amosov // 3d International Conference on Physics and Chemistry of Combustion and Processes in Extreme Environments (ComPhysChem'24), Samara, 2024. – P. 75.

12. Давыдов, Д.М. Термодинамический анализ процесса получения МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  / Д.М. Давыдов, Д.В. Закамов // Сборник трудов XXI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Высокие технологии в машиностроении», Самара, 2024. – С. 231-233.

13. Davydov, D.M. Influence of elemental powder raw materials on the formation of the porous skeleton of the MAX phase  $Ti_3SiC_2$  when obtained by the non-vacuum SHS method / D.M. Davydov // Abstracts of the IV International Conference and School of Young Scientists "Advanced High Entropy Materials", Chernogolovka, 2022. – P. 39.

14. Давыдов, Д.М. СВС пористых каркасов МАХ-фаз  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  с использованием различных марок исходных порошков / Д.М. Давыдов, А.П. Амосов, Э.Р. Умеров, Е.И. Латухин // Сборник тезисов докладов Международной конференции «Физика и технологии перспективных материалов–2021», Уфа, 2021. – С. 106.

15. Давыдов, Д.М. Влияние элементного порошкового сырья на формирование пористого каркаса МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$  при получении методом СВС / Д.М. Давыдов, А.П. Амосов, Э.Р. Умеров, Е.И. Латухин // Сборник материалов LXIII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» и X Международной школы «Физическое материаловедение», Тольятти, 2021. – С. 111-112.

Давыдов Денис Михайлович

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук на тему:

**САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ  
ПОРИСТЫХ МАХ-ФАЗ  $Ti_3SiC_2$  и  $Ti_3AlC_2$  ПРИ ГОРЕНИИ НА ВОЗДУХЕ И В ПЕСКЕ**

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.01  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
(протокол № 3 от «27» сентября 2024г.)

Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.