

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.

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 (пумициты, 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 новых класс 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 керамики-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.

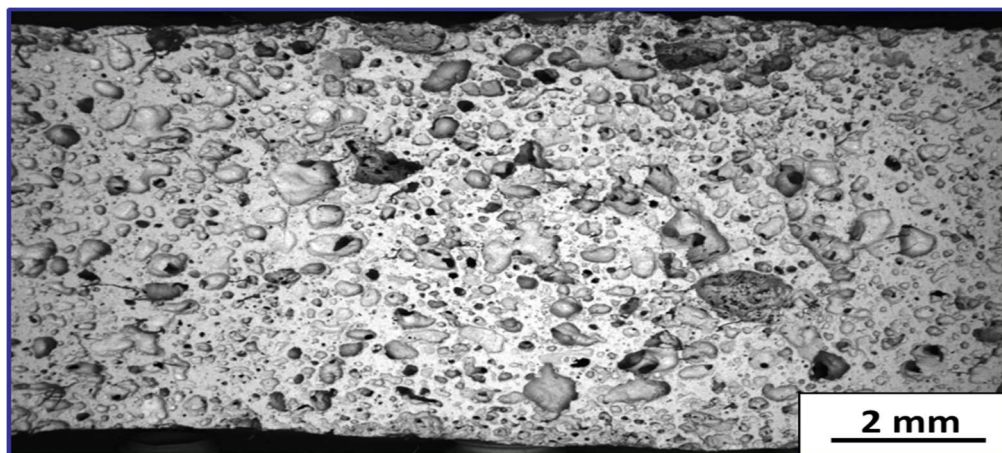


Рисунок 1 - Макроструктура пористого каркаса МАХ-фазы Ti_3SiC_2 , полученного методом СВС в режиме горения на воздухе в засыпке из песка

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.

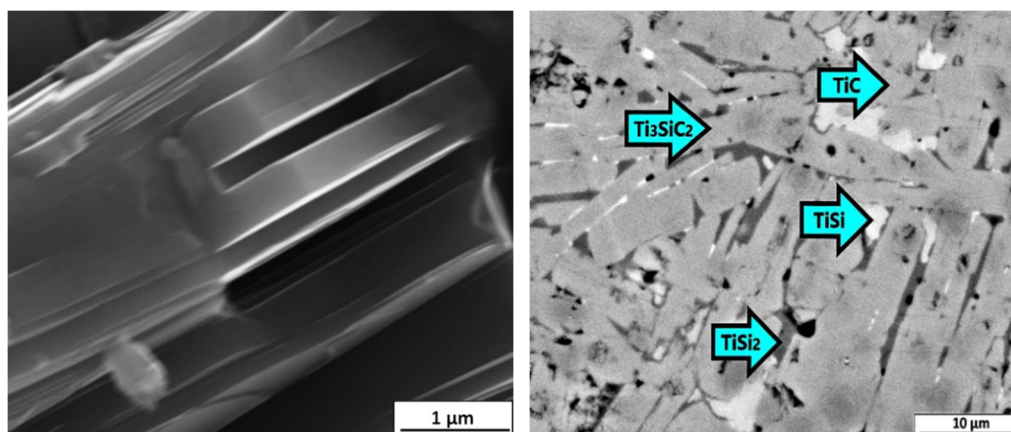


Рисунок 2 – Микроструктура пористого каркаса МАХ-фазы Ti_3SiC_2

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.

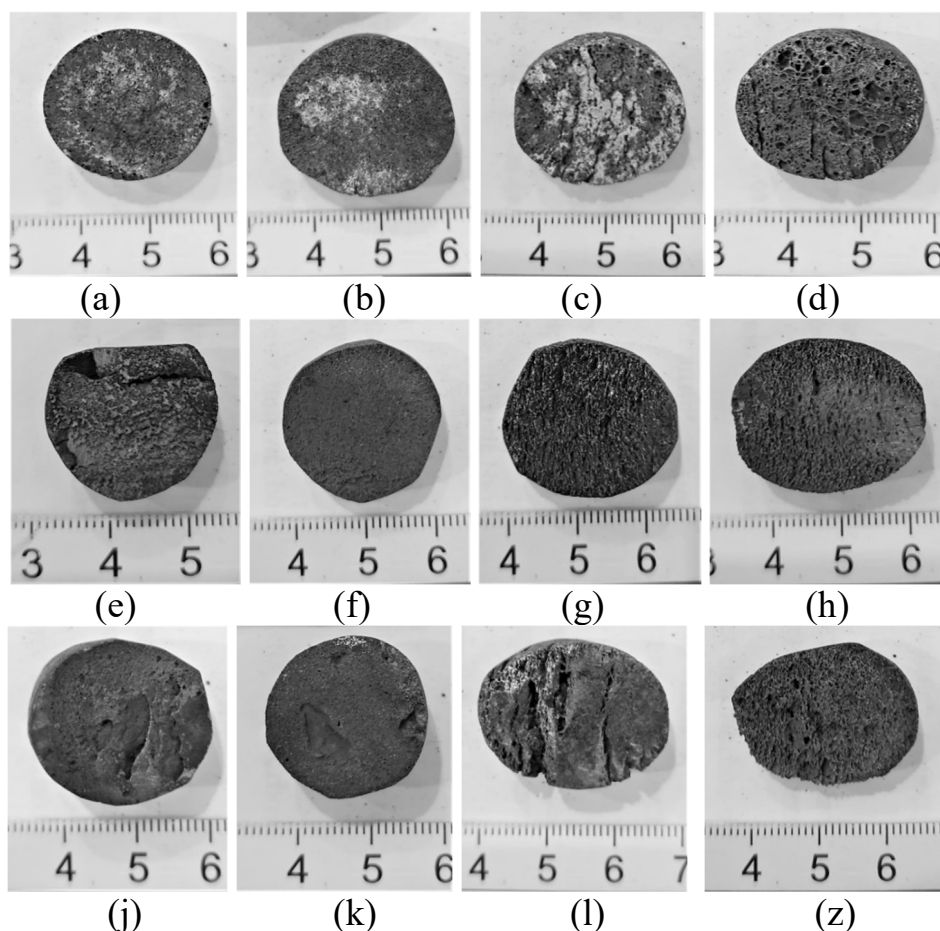


Рисунок 3 - Образцы после СВС в системе $Ti(x)-Si(Kp0)-C(y)$, где x (a,b,c,d – ТПП-7; e,f,g,h – ПТС-1; j,k,l,z – ПТМ-1), y (a,e,j- C-2; b,f,k – ГЛС-1; c,g,l – Т 900; d,h,z – П 701)

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).

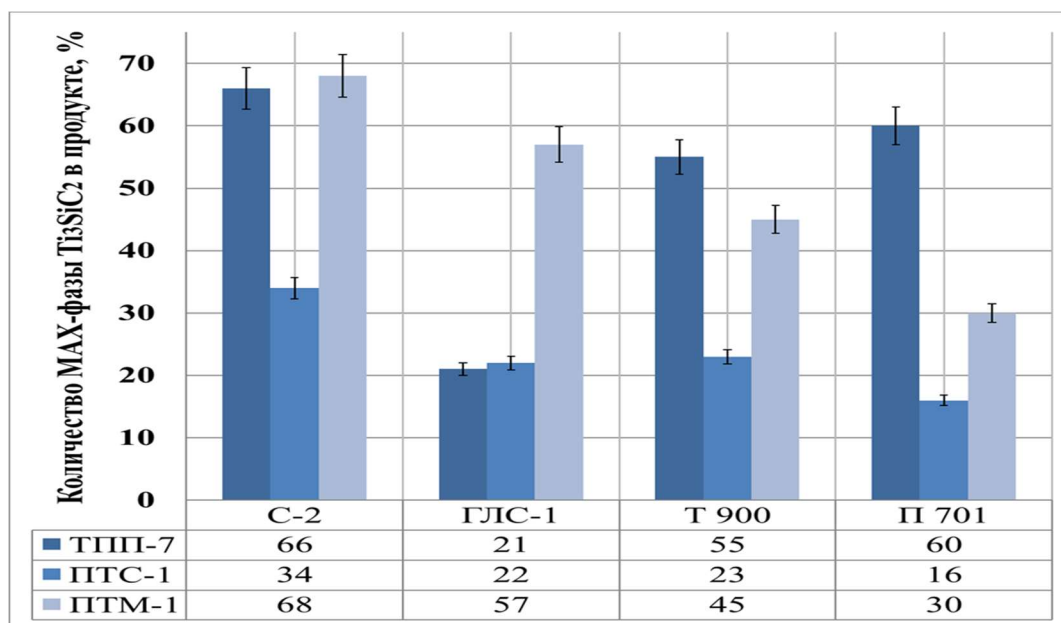


Рисунок 4 – Количественный РФА содержания МАХ-фазы Ti_3SiC_2 в образцах СВС-каркасов для различных форм углерода и марок порошка титана, масс. %

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, сформированной давлением прессования 22,5 МПа в цилиндрической пресс – форме диаметром 23 мм (рисунок 5). Общая пористость этого каркаса составляет 49 %.

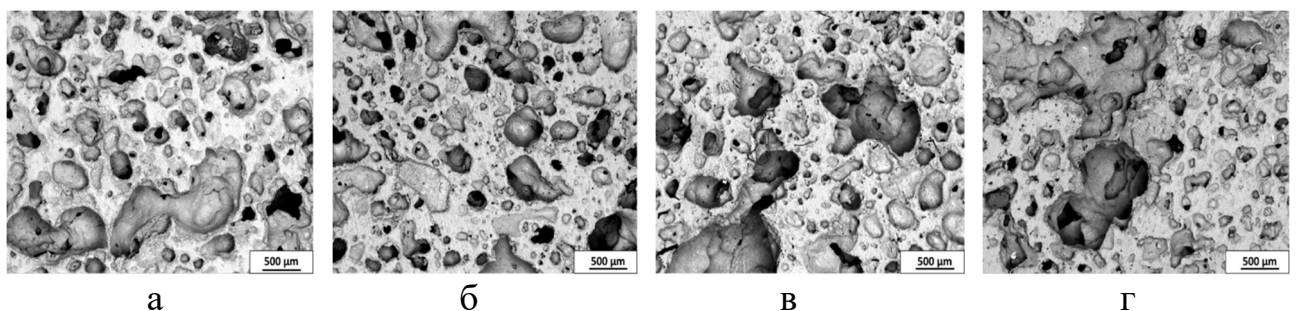


Рисунок 5 – Фотографии сечения пористого каркаса Ti_3SiC_2 при различных давлениях прессования заготовки, МПа: а – 11,2; б – 22,5; в – 33,6; г – 44,8

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.

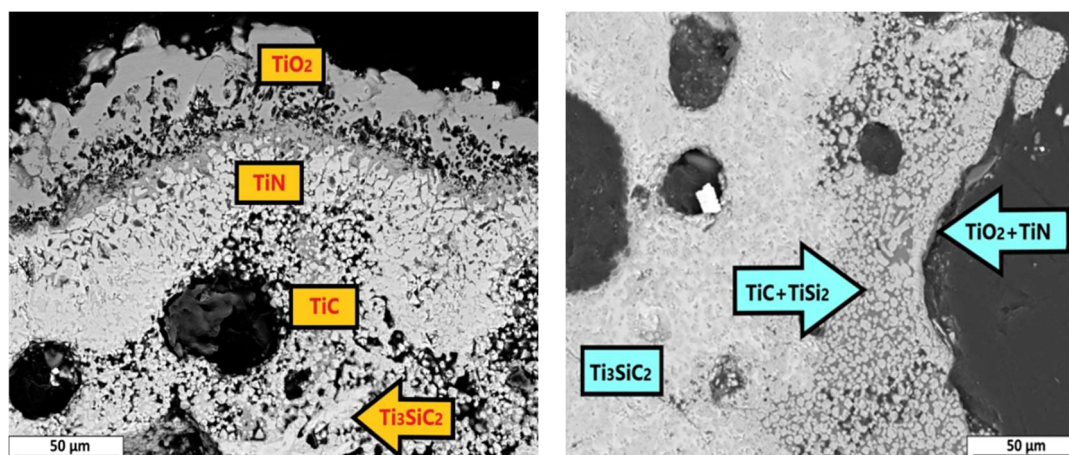


Рисунок 6 – Поверхностные пленки при СВС МАХ-фазы Ti_3SiC_2 на открытом воздухе (слева) и на воздухе в засыпке из песка (справа)

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 алюминида титана $TiAl$ составляет 46 масс. % и 2 масс.% соответственно.

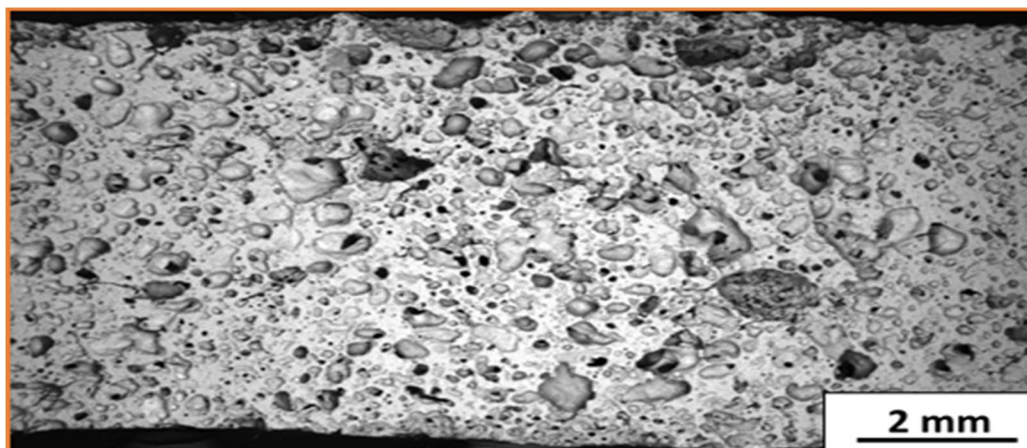


Рисунок 7 - Макроструктура пористого каркаса МАХ-фазы Ti_3AlC_2 , полученного методом СВС в режиме горения на воздухе в засыпке из песка

На изломе блока пластин МАХ-фазы карбоалюминида 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 карбоалюминида титана Ti_3AlC_2 и частиц карбида титана TiC в связке интерметаллида $TiAl$.

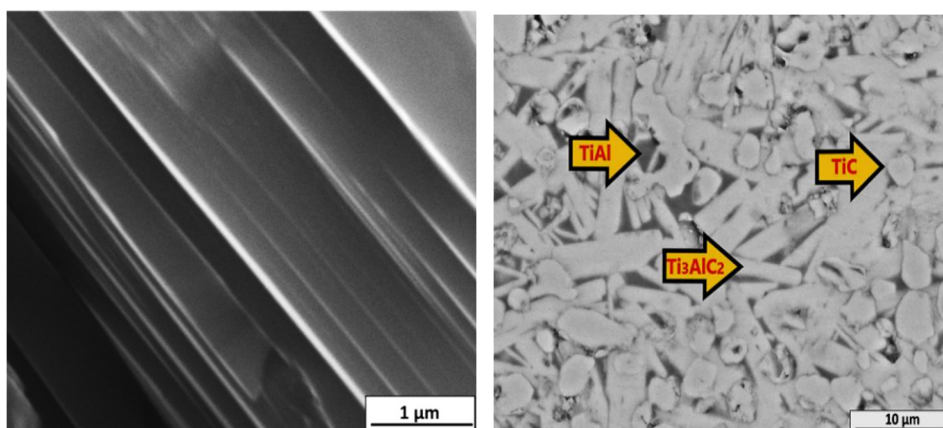


Рисунок 8 – Микроструктура пористого каркаса МАХ-фазы Ti_3AlC_2

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.

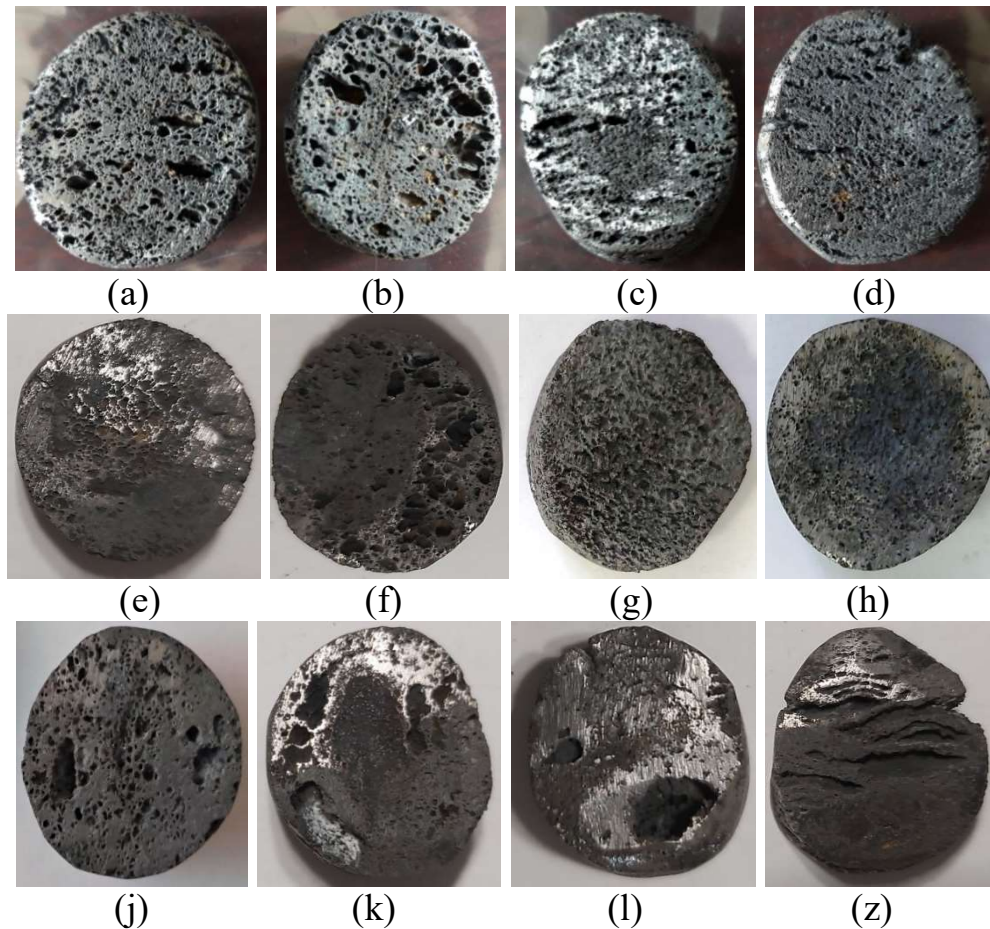


Рисунок 9 - Образцы после СВС в системе Ti (x)-Al (ПА-4)-C(y), где x (a,b,c,d – ТПП-7; e,f,g,h – ПТС-1; j,k,l,z – ПТМ-1), y (a,e,j- C-2; b,f,k – ГЛС-1; c,g,l – Т 900; d,h,z – П 701)

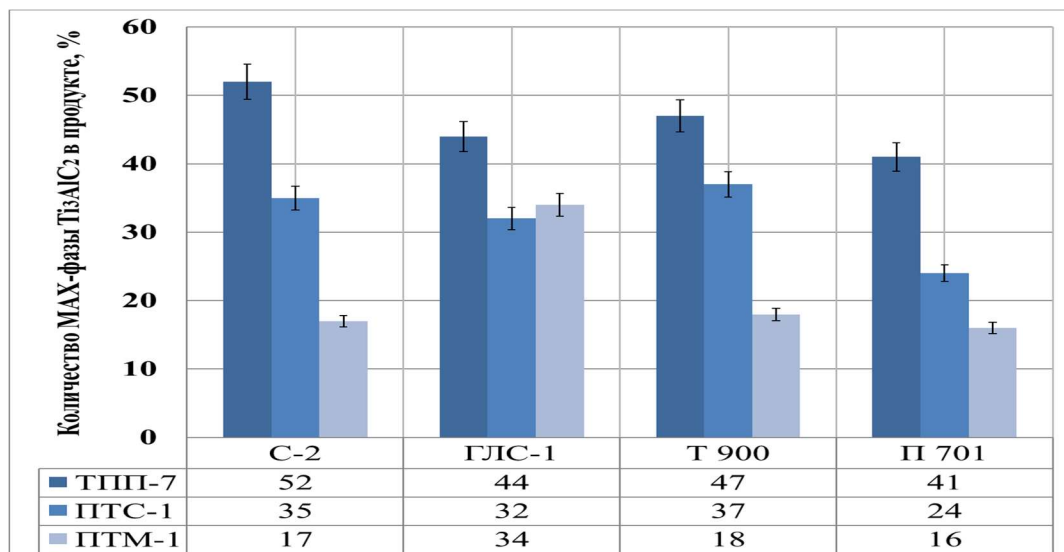


Рисунок 10 - Количественный РФА содержания МАХ-фазы Ti_3AlC_2 в образцах, синтезированных из различных форм углерода и марок порошка титана

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).

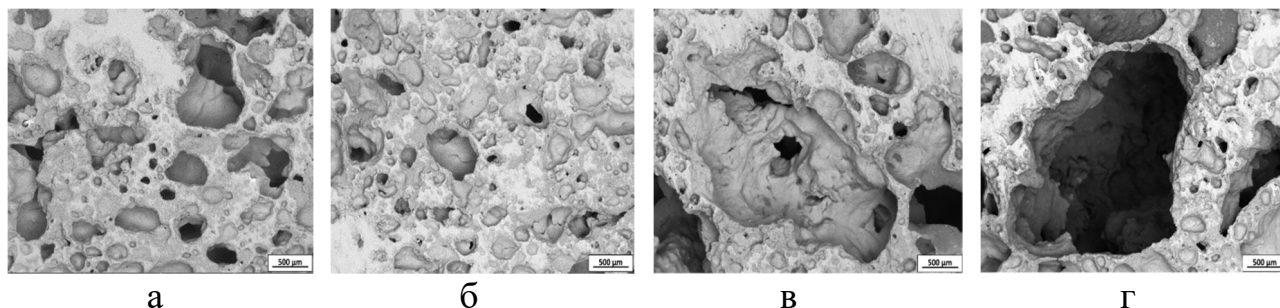


Рисунок 11 – Фотографии сечения пористого каркаса Ti_3AlC_2 при различных давлениях прессования заготовки, МПа: а – 11,2; б – 22,5; в – 33,6; г – 44,8

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 .

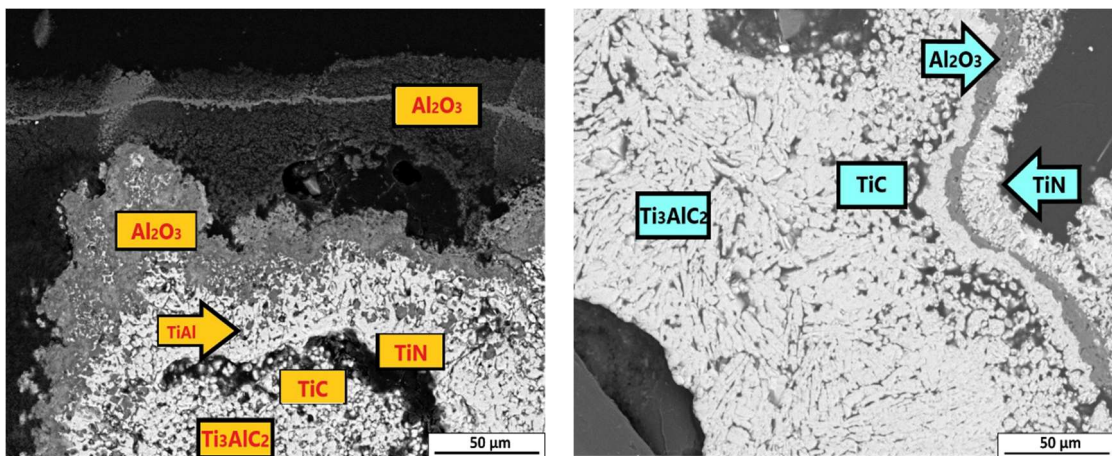


Рисунок 12 – Поверхностные пленки при СВС МАХ-фазы Ti_3AlC_2 на открытом воздухе (слева) и на воздухе в засыпке из песка (справа)

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/см³. 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 – карбоалюминид 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 ³	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 алюминид 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.

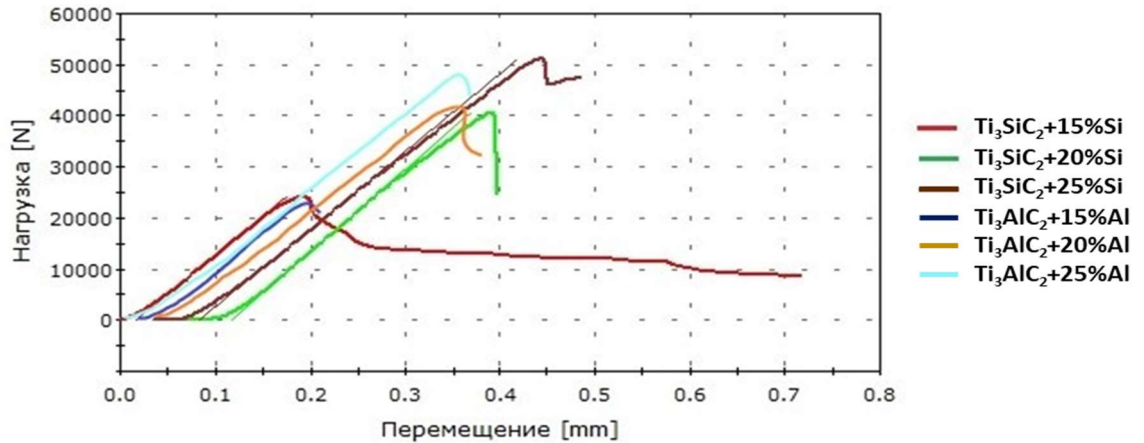


Рисунок 13 – Кривые нагружения на сжатие пористых образцов синтезированных МАХ-фаз Ti_3SiC_2 и Ti_3AlC_2 с избытками кремния и алюминия от 15% до 25% в шихте

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».

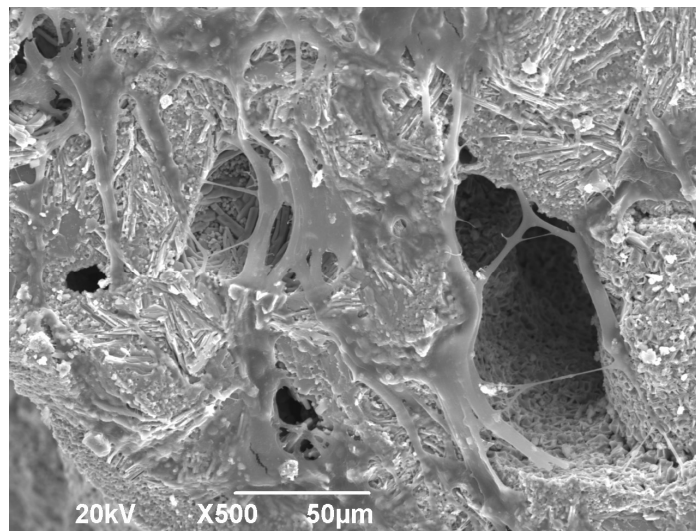


Рисунок 14 - Клетки костного мозга в порах каркаса МАХ-фазы Ti_3SiC_2

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 CO_2 - коррозии. Средняя скорость коррозии для испытанных МАХ – фаз Ti_3SiC_2 и Ti_3AlC_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 Ti_3SiC_2 и Ti_3AlC_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 Ti_3SiC_2 и Ti_3AlC_2 в количестве до 66 масс.% и 52 масс.% соответственно, а также содержат побочные фазы карбида титана TiC и силицида титана TiSi_2 или алюминида титана TiAl . Максимальные температуры горения при получении МАХ-фаз Ti_3SiC_2 и Ti_3AlC_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 Ti_3SiC_2 для ТПП-7 и С-2, 60 МПа у Ti_3AlC_2 для ТПП-7 и сажи П 701). В итоге для получения пористых каркасов МАХ-фаз Ti_3SiC_2 и Ti_3AlC_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 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 Ti_3SiC_2 и Ti_3AlC_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.