

На правах рукописи



Умеров Эмиль Ринатович

**ПОЛУЧЕНИЕ КЕРМЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО
СИНТЕЗА КЕРАМИЧЕСКИХ КАРКАСОВ TiC , Ti_3SiC_2 , Ti_3AlC_2 И
ПОСЛЕДУЮЩЕЙ САМОПРОИЗВОЛЬНОЙ ИНФИЛЬТРАЦИИ
РАСПЛАВАМИ МЕТАЛЛОВ Al , Sn , Cu**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель:

Амосов Александр Петрович, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Юхвид Владимир Исаакович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией жидкофазных СВС-процессов и литых материалов, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук», г. Черноголовка Московской области

Ковтунов Александр Иванович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Сварка, обработка материалов под давлением и родственные процессы», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти Самарской области

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»), г. Москва

Защита состоится «13» октября 2023, в 13 час. 30 мин. на заседании объединённого диссертационного совета 99.2.039.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»:

<http://d99912202.samgtu.ru>

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 99.2.039.02.

Автореферат разослан « » _____ 2023 г.

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



А.Р. Луц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Наиболее эффективным решением проблемы растущих требований современной техники к уровню свойств материалов является создание новых композиционных материалов, позволяющих объединить преимущества разнородных материалов, а также разработка новых энергосберегающих технологий их получения. Керамико-металлические композиты (керметы) благодаря присутствию металлической фазы меньше подвержены хрупкости керамических фаз, обеспечивая повышенную пластичность и прочность за счет улучшения вязкости (трещиностойкости) композитов при сохранении их «керамических» свойств (твердости, износостойкости, жаропрочности, химической стойкости, низкого удельного веса). Такой набор свойств делает их привлекательным материалом для авиакосмической техники, энергетики, химического машиностроения, автомобильного транспорта и других отраслей промышленности.

Однако существующие технологии их получения являются энергозатратными и реализуются с применением сложного дорогого оборудования, а процесс их синтеза может протекать длительное время. Поэтому существует настоятельная необходимость в разработке простых энергосберегающих методов получения керметов с повышенными свойствами. В основу такого перспективного метода может лечь явление самопроизвольной инфильтрации (пропитки) пористого керамического тела (каркаса) металлическим расплавом за счет капиллярного эффекта. К достоинствам этого метода относятся возможность изготавливать габаритные изделия сложной формы и низкой стоимостью по сравнению с методами порошковой металлургии. Однако осуществление самопроизвольной инфильтрации неразрывно связано с обеспечением хорошего смачивания расплавом металла керамической фазы, а также с получением керамической фазы в виде заготовки с равномерной открытой пористо-капиллярной структурой, способной впитать расплав металла.

Для решения данных задач несомненный интерес представляет применение простого энергосберегающего процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), позволяющего синтезировать многие керамические соединения в режиме горения, продуктом которого являются пористые каркасы с высокой температурой (2000-3000°C), обеспечивающей смачивание расплавом металла. В известных методах силового СВС-компактирования и центробежной инфильтрации большой тепловой эффект реакции СВС используется одновременно для синтеза керамического каркаса и расплавления металла для вынужденной инфильтрации синтезированного каркаса. Но эти методы связаны с применением достаточно сложного оборудования и ограничены тем, что счет тепла реакции СВС может быть расплавлено только ограниченное количество металла. Из-за последнего ограничения попытки использования большого теплового эффекта СВС одновременно для расплавления металла и самопроизвольной пропитки этим расплавом пористого СВС-каркаса без

приложения избыточного давления приводят только к частичной инфильтрации и получению керметов со значительной неоднородностью и высокой остаточной пористостью. Применение расплава металла, полученного предварительно за счет нагрева от внешнего источника, может устранить указанное ограничение и использовать массу расплава, достаточную для полной пропитки керамического СВС-каркаса, без приложения избыточного давления, обеспечивая высокую энергоэффективность и интенсивность процесса изготовления керметов увеличенных габаритов на воздухе без применения сложного и специального оборудования.

В связи с этим актуальной является задача изучения возможности получения керметов с инфильтрацией расплавами металлов без приложения избыточного давления керамических каркасов, полученных методом СВС при невакуумном сжигании на воздухе.

Цель работы: разработка нового способа изготовления керамико-металлических композитов (керметов) с применением самопроизвольной инфильтрации приготовленными предварительно за счет нагрева от внешнего источника расплавами металлов Al, Sn или Cu горячих пористых керамических каркасов, полученных при сжигании на воздухе с использованием следующих СВС-реакций: $Ti+C \rightarrow TiC$, $3Ti+Si+2C \rightarrow Ti_3SiC_2$, $3Ti+Al+2C \rightarrow Ti_3AlC_2$.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Исследование закономерностей формирования наименее дефектных СВС-каркасов TiC , Ti_3AlC_2 и Ti_3SiC_2 для последующей самопроизвольной инфильтрации.

2. Исследование взаимодействия горячих СВС – каркасов с расплавами металлов ($TiC-Al$, Ti_3AlC_2-Al , Ti_3SiC_2-Cu , Ti_3SiC_2-Sn): смачивание, закономерности самопроизвольной инфильтрации, полнота пропитки, микроструктура, фазовый состав в зависимости от температур каркаса и расплава, времени задержки между окончанием горения и началом пропитки, легирования каркаса и расплава.

3. Экспериментальное получение образцов СВС-керметов $TiC-Al$, Ti_3AlC_2-Al , Ti_3SiC_2-Cu , Ti_3SiC_2-Sn .

4. Исследование физических и механических свойств полученных керметов.

5. Разработка нового способа получения керметов в виде различных экспериментальных схем, объединяющих процесс СВС керамического каркаса и самопроизвольную инфильтрацию расплава металла.

Научная новизна работы:

1. Впервые проведено исследование возможности применения метода СВС для синтеза пористой керамической заготовки на воздухе и последующего обеспечения самопроизвольной инфильтрации расплавом металла, приготовленным предварительно за счет нагрева от внешнего источника, с целью получения малопористого кермета.

2. Впервые получены образцы новых СВС-керметов $TiC-Al$, Ti_3AlC_2-Al , Ti_3SiC_2-Cu , Ti_3SiC_2-Sn при невакуумном горении на воздухе с приблизительно равными объемными долями металла и керамики, и сравнительно низкой

остаточной пористостью, а также разработаны и экспериментально опробованы различные схемы сочетания СВС и последующей самопроизвольной пропитки расплавом, представляющие новый способ получения керметов.

3. Впервые исследованы закономерности процесса самопроизвольной инфильтрации приготовленных заранее расплавов металлов в неостывшие пористые СВС-каркасы.

4. Впервые исследованы структура и фазовый состав полученных новых СВС-керметов, а также их физико-механические свойства.

Практическая значимость работы:

1. Получены керамические СВС-каркасы TiC , Ti_3AlC_2 и Ti_3SiC_2 с однородной структурой, высокой долей открытых пор, а также достаточной прочностью путем проведения синтеза в атмосфере воздуха, без предварительной термовакuumной обработки порошковых реагентов.

2. Разработаны технологические основы реализации простого и энергоэффективного способа получения керметов с применением СВС для синтеза пористой керамической заготовки с последующей самопроизвольной инфильтрацией расплавом, не требующей сложного и дорогого технологического оборудования (реакторы, высокотемпературные печи, прессовое оборудование и т.п.).

3. Полученные СВС-керметы имеют приблизительно равное объемное соотношение металла и керамики, что позволяет эффективно совмещать преимущества обоих компонентов в одном композитном материале, который обладает повышенным пределом текучести по сравнению с металлом матрицы, пониженным коэффициентом трения и повышенной износостойкостью. СВС-керметы имеют структуру двух взаимопроникающих матриц во всех трех пространственных направлениях и при этом обладают относительно высокой площадью контакта между керамикой и металлом, обеспеченной глубоким проникновением жидкого металла в наиболее мелкие поры и капилляры (менее 1 мкм) керамического каркаса.

4. Разработан новый способ получения керметов, защищенный патентом РФ на изобретение.

Соответствие паспорту заявленной специальности. Тема и содержание диссертационной работы соответствует пунктам 1 и 4 паспорта специальности 2.6.17. (05.16.09) – «Материаловедение (по отраслям)».

1. Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры материалов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности материалов и изделий.

4. Разработка физико-химических и физико-механических процессов формирования новых материалов, обладающих уникальными функциональными, физико-механическими, эксплуатационными и технологическими свойствами, оптимальной себестоимостью и экологической чистотой.

Положения, выносимые на защиту:

1. СВС позволяет при горении в атмосфере воздуха синтезировать пористые керамические каркасы TiC , Ti_3AlC_2 , Ti_3SiC_2 с достаточной прочностью и температурой после синтеза для обеспечения смачивания и самопроизвольной инфильтрации расплавом металла на воздухе за счет действия капиллярных сил.

2. Сочетанием метода СВС с последующей самопроизвольной инфильтрацией расплавом металла, приготовленным предварительно за счет нагрева от внешнего источника, возможно получение керамики-металлических композиционных материалов.

3. Полученные в результате горения горячие каркасы МАХ-фаз Ti_3AlC_2 , Ti_3SiC_2 необходимо подвергать самопроизвольной инфильтрации расплавом металлов с паузой до 7-10 с после завершения горения с целью обеспечения завершения структурообразования МАХ-фаз в каркасе.

4. Начальная температура приготовленного инфильтруемого расплава наряду с легированием и временной паузой после окончания горения и перед началом инфильтрации существенно влияют на степень химического взаимодействия между расплавом и каркасом, на глубину и полноту пропитки, а также на физико-механические свойства СВС-керметов.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность результатов работы обеспечена использованием аппаратных методов с помощью современного научно-исследовательского оборудования, необходимым количеством полученных экспериментальных данных, сопоставлением полученных результатов с результатами других авторов. Достоверность научных и практических результатов подтверждается заключениями экспертов Российского фонда фундаментальных исследований, публикациями в рецензируемых научных журналах, а также полученным патентом РФ.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проектам № 20-08-00435 и № 20-33-90056, а также Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

Апробация результатов работы.

Основные результаты и положения диссертации были представлены на следующих научных конференциях: 6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects “EFRE-2018”, 16-22 September 2018, Tomsk, Russia; Международная конференция «Синтез и консолидация порошковых материалов» SCPM-2018, 23-26 октября 2018, Черногоровка; XV International Symposium on Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 16-20 September, Moscow, Russia; 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects “EFRE-2020”, 14-26 September 2020, Tomsk, Russia; 10-й Международной научно-практической конференции «Перспективное развитие науки, техники и технологий», 30 октября 2020, Курск; Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», 23-25 июня 2021, Самара; International Conference on Physics and Chemistry of Combustion and Processes in Extreme Environments (ComPhysChem'22), July 2022, Samara, Russia.

Публикации. В результате проведенных исследований опубликовано 18 работ, в том числе 4 в изданиях, входящих в перечень рецензируемых журналов ВАК РФ, 7 в изданиях, входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus, а также получен 1 патент РФ.

Личный вклад автора. В рамках диссертационного исследования автором выполнен анализ литературных данных и современного состояния исследований по теме диссертации. Автором проведен выбор исходных порошковых компонентов, используемых в качестве СВС-реагентов для получения керамических каркасов. Автором разработаны и экспериментально опробованы различные схемы сочетания СВС и пропитки расплавом металла на воздухе с учетом особенностей структурообразования МАХ-фаз и интенсивного процесса инфильтрации расплава. Автор принимал участие в изготовлении СВС-керметов, в изучении физико-механических свойств полученных образцов керметов, их микроструктуры и фазового состава. Участвовал в написании научных статей и подготовке докладов для научных конференций, заявок на получение патента РФ и заявок на гранты РФФИ.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 151 наименований. Диссертация изложена на 186 страницах и содержит 79 рисунков и 13 таблиц.

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 популярность керметов как инструментальных и конструкционных материалов продолжает неуклонно расти, находя новые сферы применения. Поэтому исследования и разработки новых энергоэффективных технологий получения керметов является актуальной задачей. В литературе не встречаются работы, рассматривающие вопрос применения СВС в сочетании с самопроизвольной инфильтрацией расплавом металла, приготовленного отдельно в объеме, достаточном для заполнения всего порового объема керамического каркаса для получения керметов с минимальной остаточной пористостью. Исходя из этого, сделан вывод, что метод СВС может внести существенный вклад в развитие инфильтрационных методик создания керметов путем удешевления технологии их производства за счет применения простого оборудования, а также благодаря обеспечению смачивания горячей, не остывшей после окончания СВС, керамики расплавами металлами, позволяя проводить инфильтрацию в самопроизвольном режиме.

Во второй главе представлено описание исходных порошковых компонентов для СВС с учетом доступности и рыночной стоимости: титана марки

ТПП-7, кремния марки Кр0, графита марки С-2, алюминия марки ПА-4. Для получения расплава Al использовались алюминии марок А7 и А85, расплав меди получали из электротехнической меди марки М-1, расплав олова получали из олова марки О-1. Приведены данные по структуре, чистоте и размерам исходных порошковых СВС-реагентов. Кроме того, определены методы исследования: сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) с приставкой энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) – для изучения микроструктуры и элементного состава получаемых керметов; рентгенофазовый анализ (РФА) – для определения фазового состава СВС-керметов; порометрия – для определения пористости исходных непропитанных СВС-каркасов и для изучения остаточной пористости пропитанных СВС-керметов на основе данных плотности, которая находилась методом гидравлического взвешивания в дистиллированной воде. Высокоскоростная видеосъемка применялась для изучения интенсивных процессов СВС каркаса и инфильтрации расплава металла в поры каркаса. Также описаны использованные общепринятые методики определения твердости, микротвердости, прочности для объективной оценки уровня механических свойств получаемых СВС-керметов.

В третьей главе рассмотрены особенности синтеза СВС-каркасов TiC, и показано, что с помощью невакуумного СВС в атмосфере воздуха можно синтезировать относительно однородные пористые заготовки (каркасы) с минимальным количеством дефектов структуры и изменений начальной геометрической формы. Установлено, что различный фракционный состав и форма исходных реагентов значительно влияют на физико-химические процессы горения и, соответственно, определяют структуру и фазовый состав конечного пористого СВС-каркаса. Показано, что наиболее однородные и бездефектные по структуре с минимальными изменениями геометрической формы каркасы TiC получаются с использованием сравнительно крупной фракции порошкового титана марки ТПП-7 и графитных порошков С-2 и ГЛ-1. Показана структура, фазовый состав и свойства наиболее однородных бездефектных (шихта на основе порошков ТПП-7 и графита С-2, с соответствующим порошком алюминия ПА-4 или кремния Кр0) СВС-каркасов, в которых целевой фазой синтеза являлись МАХ-фазы Ti_3AlC_2 и Ti_3SiC_2 . Общей особенностью пористых СВС-каркасов МАХ-фаз Ti_3AlC_2 и Ti_3SiC_2 являются повышенный объем закрытых пор (до 10-20%), наличие значительного количества карбида титана TiC и алюминидов титана или силицидов титана, соответственно, как побочных фаз. С учетом полученных результатов в дальнейших экспериментах по получению СВС-керметов методом самопроизвольной инфильтрации, для синтеза соответствующих бездефектных пористых каркасов применялись марки титана ТПП-7, графита С-2, алюминия ПА-4 и кремния Кр0.

В четвертой главе описаны различные подходы к формованию реакционной шихты для получения керамических каркасов и обеспечения непосредственного контакта с расплавом металлом с целью осуществления самопроизвольной инфильтрации и получения СВС-керметов TiC-Al, Ti_3AlC_2 -Al, Ti_3SiC_2 -Sn, Ti_3SiC_2 -Cu.

Сущность разрабатываемого способа получения СВС-керметов основана на особенностях СВС продукта (каркаса): высокая температура непосредственно после окончания синтеза и открытая пористо-капиллярная структура. Высокая температура каркаса обеспечивает его смачивание расплавами металлов, а открытая пористо-капиллярная структура каркаса создает условия для возникновения капиллярного эффекта при контакте с расплавом металла, который самопроизвольно впитывается в каркас, заполняя пустоты керамического тела, сформированные в результате СВС. Важно отметить, что самопроизвольная инфильтрация расплава металла в СВС-каркас существенно зависит от температуры каркаса, которая быстро снижается после СВС. Влияние температуры каркаса TiC на возможность инфильтрации расплава Al и их адгезии было исследовано посредством выдерживания временной паузы между завершением СВС и контактом каркаса с расплавом (Рисунок 1).



Рисунок 1 – СВС-каркасы TiC (1 – не контактировавший с расплавом Al; 2 – контактировавший, не пропитанный; 3 – контактировавший, пропитанный)

На рисунке 1 видно 3 одинаковых СВС-каркаса TiC. Образец №1 был синтезирован без контакта с расплавом алюминия. На этом образце отсутствуют следы алюминия, можно заметить темную нижнюю часть, так как образец был погружен в песок, и данная часть, в отличие от верхней желтой, осталась не окисленной. Каркас №2 был залит расплавом алюминия спустя 7-8 секунд после завершения СВС. Видно, что алюминий (и Al_2O_3) в виде тонкой фольги остался на средней части образца, однако образец не пропитался расплавом, вероятно, из-за более низкой температуры каркаса в момент его контакта с расплавом. Каркас №3 был синтезирован, находясь погруженным наполовину в расплаве алюминия, т.е. инфильтрация проходила одновременно с СВС. Данный каркас полностью пропитался расплавом металла, при этом, расплав поднялся по капиллярно-пористой структуре каркаса вверх, что видно по бело-серебристому оттенку образца. Вид поперечного излома данного образца представлен на рисунке 2.

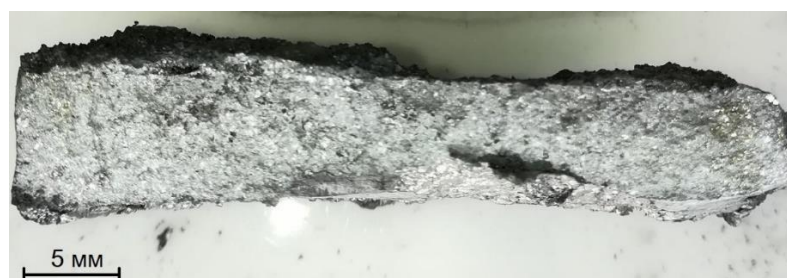


Рисунок 2 – Излом TiC-Al

Из рисунка 2 видно, что излом имеет относительно однородный серебристый цвет, схожий с изломом чистого алюминия. Отсутствие темных включений и пустот на изломе СВС-кермета свидетельствует о хорошем смачивании каркаса TiC расплавом Al, при том, что объемное содержание TiC и Al в композите приблизительно равно.

В рамках предлагаемого способа были разработаны различные схемы сочетания СВС керамического каркаса и процесса самопроизвольной инфильтрации расплава металла с целью получения СВС-керметов. Общий вид разработанной схемы № 1 представлен на рисунке 3.

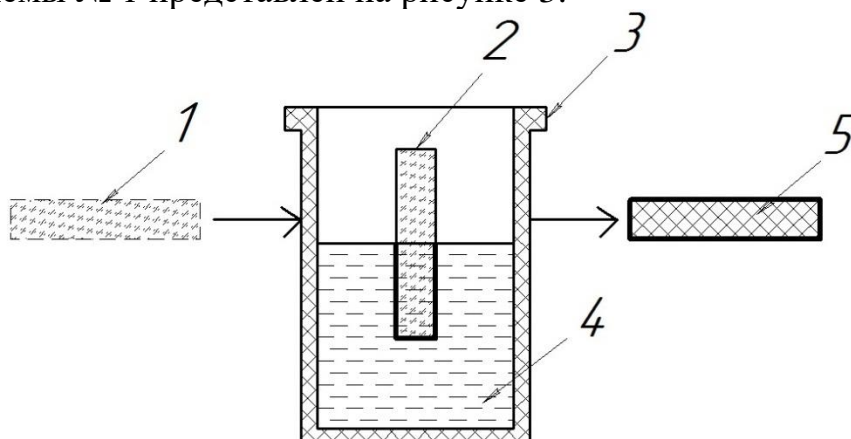


Рисунок 3 – Схема № 1 получения СВС-кермета методом погружения горячего каркаса в расплав металла (1 – СВС-каркас, 2 – погруженный в расплав металла СВС-каркас, 3 – огнеупорный тигель, 4 – расплав металла, 5 – СВС-кермет)

Данная схема (рисунок 3) была разработана для получения относительно небольших образцов кермета (до 23 мм в диаметре, массой около 10 г). Ограничение по габаритам связано, в первую очередь, с технологическими трудностями манипулирования разогретым до высокой температуры СВС-каркасом (до $\sim 2900^{\circ}\text{C}$), а также экономическими и техническими ограничениями, связанными с диаметром тигля для получения расплава металла и объемом расплава, необходимым для полной инфильтрации.

Для получения образцов кермета большего диаметра была разработана схема № 2, в которой СВС-каркас оставался неподвижным, а производилось перемещение расплава металла, которым заливали частично углубленный в песок сгоревший СВС-каркас. Чтобы расплав не растекался, использовался огнеупорный тигель без дна, размещенный на песке так, чтобы СВС-каркас находился внутри него (рисунок 4).

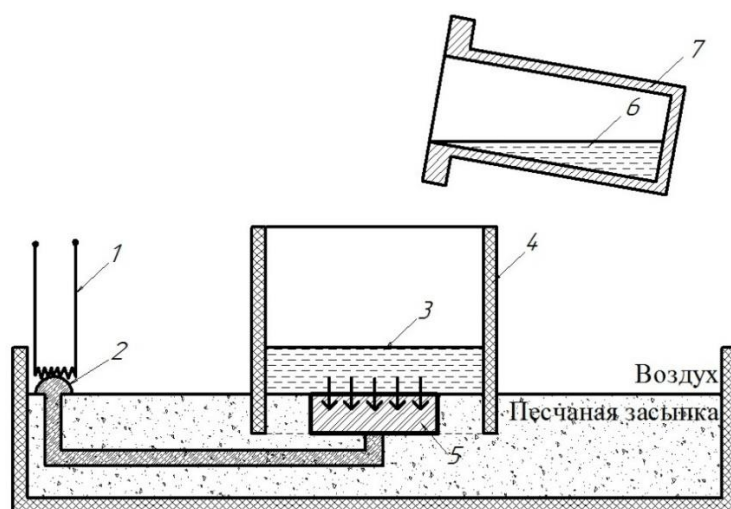


Рисунок 4 – Схема № 2 получения габаритного СВС-кермета в песчаной засыпке (1 – спираль накаливания, 2 – запальная смесь, 3 – расплав металла, 4 – огнеупорный тигель без дна, 5 – шихтовой брикет, 6 – расплав металла, 7 – огнеупорный тигель)

Особенностью методики, представленной на рисунке 4, является возможность получения более габаритных образцов ($d = 54$ мм, $m = 80$ г). В данном случае также нет необходимости манипулировать брикетом ни на стадии шихтовой заготовки, ни после завершения СВС, так как шихтовой брикет, углубленный в песок, контактирует с расплавом металла, подогреваясь от него. Подогрев крупного брикета от расплава облегчает инициирование реакции СВС, а погружение в песок способствует сохранению начальной геометрической формы образца. Инфильтрация расплава происходит самопроизвольно при прогорании брикета. В этом случае приток воздуха к СВС-каркасу ограничен, что снижает количество оксидных соединений на поверхности каркаса. Недостатками данной методики были трудности обеспечения надежного инициирования СВС и относительно большой расход запальной смеси, так как запал подводился от спирали к шихтовому брикету под слоем песка на сравнительно большое расстояние. Также вызывало затруднение частичное оплавление песка вокруг СВС-каркаса и проникновение в песок расплава металла, который после застывания «склеивал» СВС-каркас с соизмеримым по массе количеством песка вокруг. Это существенно затрудняло дальнейшую механическую обработку СВС-кермета TiC-Al.

На основе двух предыдущих методик была разработана усовершенствованная схема № 3 получения кермета, в которой шихтовой брикет размещался на дне огнеупорного тигля, а запал насыпался сверху в небольшом количестве, достаточном для запуска СВС. Общий вид такой схемы представлен на рисунке 5:

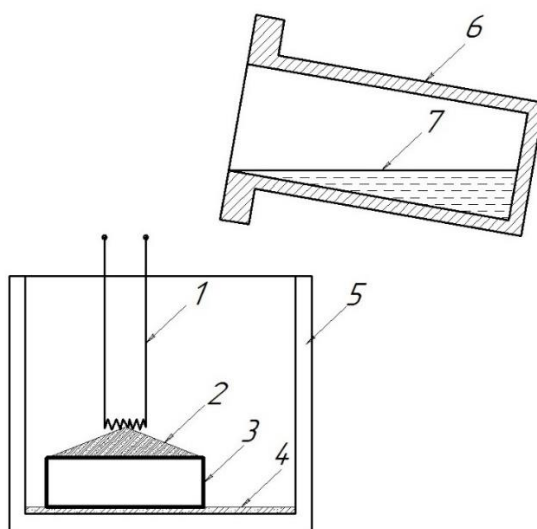


Рисунок 5 – Схема № 3 получения СВС-кермета методом заливки расплавом (1 – спираль накаливания, 2 – запальная смесь, 3 – шихтовой брикет, 4 – тонкий слой порошка TiC, 5 – огнеупорный тигель большего диаметра, 6 – огнеупорный тигель меньшего диаметра, 7 – расплав металла для инфильтрации)

В данном случае СВС-каркас формировался на тонком слое порошка TiC, лежащего дне огнеупорного тигля, в который сразу после завершения горения либо после определенной временной паузы заливался расплав металла с целью его инфильтрации в каркас. Технологическая пауза после завершения СВС и перед заливкой расплава могла понадобиться в случае необходимости обеспечения завершения процесса структурообразования целевого соединения в СВС-каркасе. Как будет показано далее, в результате в рамках данной схемы также удалось обеспечить формирование МАХ-фазы в СВС-каркасе, и обеспечить инфильтрацию расплава металла в поры полученного каркаса, соединя МАХ-фазу и металл в единый композиционный материал МАХ-кермет. Получение кермета TiC-Al по данной схеме было возможным, однако образец при извлечении из расплава часто деформировался, а также имел склонность привариваться посредством сгоревшей и пропитанной расплавом металла запальной смеси к спирали накаливания, что затрудняло его извлечение.

Эксперименты по предыдущим схемам позволяли получать цилиндрические образцы с относительно небольшой высотой. Поэтому далее была разработана схема № 4, позволявшая получать длинномерные СВС-керметы TiC-Al. В такой схеме из отдельно спрессованных цилиндрических шихтовых брикетов формировался относительно длинный составной цилиндр, полностью или частично углубленный в песок так, чтобы с одного конца можно было сформировать углубление в песке для расплава металла, который контактировал с первым шихтовым брикетом, к которому подводился запал (рисунок 6).

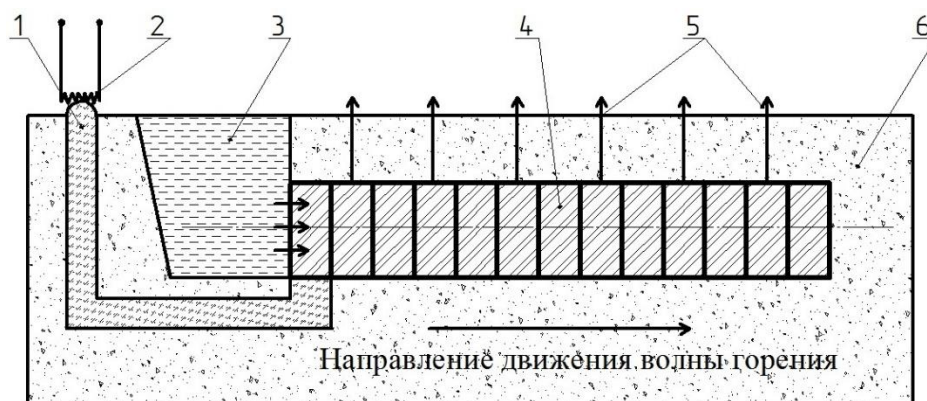


Рисунок 6 - Схема № 4 получения СВС-кермета с длиномерной пропиткой (1 – запальная смесь, 2 – спираль накаливания, 3 – расплав металла, 4 – шихтовые брикеты смеси порошков, 5 – направление выхода газов при СВС, 6 – песчаная засыпка)

Из рисунка 6 видно, что плотно уложенные друг с другом в песке небольшие шихтовые брикеты ($d = 23$ мм, $h = 10$ мм, $m = 10$ г) представляют собой удлиненный стержень с постоянным диаметром 23 мм и регулируемой длиной, в зависимости от количества уложенных брикетов (высота 1 брикета около 10 мм). Запальная смесь подведена от спирали накаливания к первому брикету в ряду, обеспечивая передачу теплового импульса для запуска реакции СВС в брикетах. В углублении в песке размещается также расплав металла в контакте с первым брикетом, при этом расплав не пропитывает холодную шихту. Инфильтрация расплава в брикет начинается только после начала реакции СВС в шихтовом брикете, который очень быстро саморазогревается до ~ 2900 °С. При запуске СВС реакции волна горения продвигается от одного брикета к следующему, а вслед за фронтом горения движется фронт инфильтрации металлического расплава по пористо-капиллярной структуре прогоревших разогретых брикетов. В зависимости от скоростей продвижения фронтов горения и инфильтрации возможны два случая. Первый, когда фронт горения движется быстрее, и фронт инфильтрации проходит по уже синтезированному каркасу. Второй, когда скорость инфильтрации выше, тогда фронт пропитки достигает фронта горения и движется вместе с ним далее. В этом случае может происходить локальное опережение инфильтрируемого расплава фронта горения, а также участие металла в реакции СВС непосредственно во фронте горения. В данной методике нет необходимости манипуляции брикетами и расплавом, поэтому после зажигания запальной смеси процесс проходит в автоматическом, самопроизвольном режиме. После завершения СВС с инфильтрацией расплавом и остывания пропитанных брикетов, закристаллизованный металл прочно скрепляет между собой СВС-брикеты, образуя длинный керамико-металлический стержень. Следует отметить, что глубина инфильтрации расплава при спутной пропитке спрессованных отдельно и уложенных вместе брикетов составила не менее 130 мм, а при встречной пропитке около 80 мм, при диаметре образцов 23 мм. Общий вид образца длиной 130 мм представлен на рисунке 7.



Рисунок 7 – СВС-кермет TiC-Al

Из рисунка 7 видно, что из исходных составных шихтовых брикетов в результате СВС и инфильтрации расплавом чистого алюминия, кермет имеет цельный вид. В левой части образца осталась часть сгоревшего запала, который был частично пропитан алюминием.

Для решения проблемы неплотного контакта между брикетами при получении длинномерных СВС-керметов была опробована возможность синтеза не сборного (составного), а единого, цельного СВС-каркаса путем использования шихты в насыпном виде (схема № 5). Чтобы обеспечить цилиндрическую форму будущего каркаса, шихта насыпалась в цилиндрический полый форму, сделанную из одного слоя бумаги. Наполненная шихтой форма помещалась на песок, в котором, как и в предыдущей схеме было приготовлено углубление для расплава металла, который должен был контактировать с одним концом шихтовой заготовки. Принципиальная схема № 5 показана на рисунке 8.

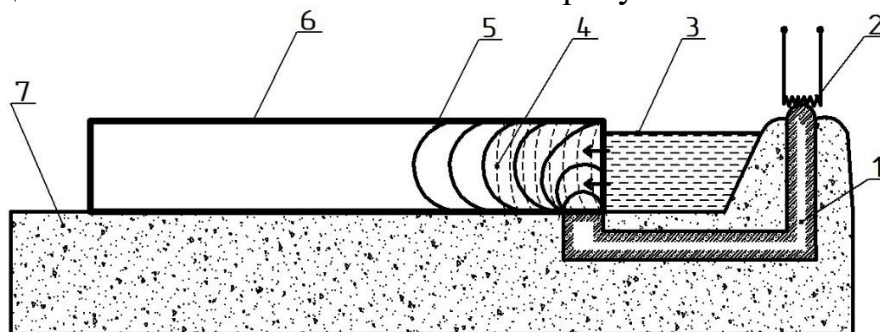


Рисунок 8 – Схема № 5 получения композита TiC-Al методом СВС с пропиткой:

1 – запальная смесь, 2 – спираль накаливания, 3 – расплав Al при $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 – фронт инфильтрации расплавом, 5 – фронт горения, 6 – цилиндрическая шихтовая заготовка смеси Ti-C, 7 – песок

При иницировании горения посредством запальной смеси (1) и электрической спирали (2) СВС волна начинает движение по цилиндрической шихтовой заготовке (6) со стороны расплава алюминия (3), что вызывает самопроизвольное проникновение расплава в прогоревшую часть заготовки и дальнейшее движение фронта инфильтрации (4) вслед за движением фронта горения (5) (рисунок 8). В этом случае, более быстродвигающийся фронт инфильтрации, как правило, настигает фронт горения, что приводит к интенсивному перегреву части алюминия с последующим его кипением. Такое кипение наблюдается в виде визуальных парожидкостных струй, выходящих из заготовки. Данный режим характеризуется максимально высокими температурами

каркаса TiC и расплава Al. При этом, максимальная глубина инфильтрации расплава алюминия в TiC-каркас, синтезированный из шихты насыпной плотности, составила около 300 мм. Важно отметить, что наблюдалось изменение химического состава алюминия по длине, а также появление продуктов взаимодействия Al и TiC, в том числе $TiAl_3$, Al_4C_3 и Ti_3AlC .

Влияние масштабного фактора на глубину пропитки было показано через исследование зависимости диаметра СВС-каркаса TiC от глубины инфильтрации расплава алюминия (таблица 1).

Таблица 1 – Глубина инфильтрации расплава алюминия в СВС-каркас TiC

Диаметр СВС-каркаса, мм	Глубина пропитки, мм
6	До 10
13	160
23	250-300

Из таблицы 1 видно, что с увеличением диаметра СВС-каркаса с 6 до 23 мм глубина пропитки растет с ~10 до 250-300 мм. Иными словами, с ростом диаметра в ~4 раза, глубина инфильтрации увеличилась в 25-30 раз.

Образцы кермета TiC-Al из средней части длинного образца ($D=24$ мм), полученные методом спутной пропитки плотно уложенных шихтовых брикетов, имели плотность около $(3,5 \pm 0,15) \cdot 10^3$ кг/м³, что свидетельствует о равномерном распределении алюминия по длине и соответствует остаточной пористости 11.5%. Данные микротвердости кермета TiC-Al подтвердили двухфазную структуру, имеющие твердость 2700-2900 НВ, что соответствует фазе TiC, и твердость ~50 НВ, что характерно для алюминия. Типовые результаты испытаний цилиндрических образцов с диаметром 24 мм и высотой 9-10 мм представлены на рисунке 9.

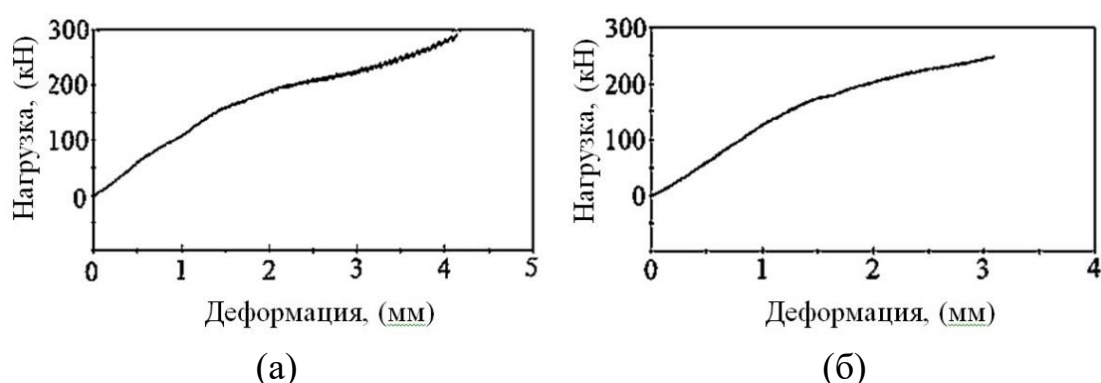


Рисунок 9 – Кривые нагружения композитов TiC-Al: (а) – встречная пропитка, Al+5%Cu, $T=900^{\circ}C$; (б) – спутная пропитка, Al, $T=750^{\circ}C$

Характер зависимости нагрузки от деформации аналогичен алюминию и его сплавам, с отличием в том, что при относительной деформации 11-16% наблюдается резкий рост деформации, сопровождающийся появлением крупных трещин в образце. Этот момент был принят за предел прочности для образцов кермета: 330-390 МПа (150-180 кН по рисунку 9). Однако дальнейший рост

нагрузки показывает, что образец продолжает деформироваться, сохраняя несущую способность вплоть до 500-650 МПа (250-290 кН). Это свидетельствует о значительной прочности полученных образцов кермета TiC-Al, при том, что предел прочности на сжатие чистого алюминия марки А7 составляет 75 МПа.

Получение керметов Ti_3AlC_2 -Al проводилось по схеме № 3. Для экспериментального выявления факторов, влияющих на возможность инфильтрации, ее полноту и наличие Ti_3AlC_2 после пропитки были проведены серии испытаний, результаты которых представлены в таблице 2. Факт пропитки определялся визуально, а полнота пропитки - путем измерения плотности образца после эксперимента. Присутствие Ti_3AlC_2 в полученном кермете устанавливали с помощью исследования микроструктуры скола образца и РФА.

Таблица 2 – Возможность самопроизвольной инфильтрации, плотность и пористость композита, наличие Ti_3AlC_2 в зависимости от состава и температуры инфильтруемого сплава и паузы перед инфильтрацией

Расплав	$T_{расп}$, °С	Пауза, с	Наличие пропитки	Плотность кермета, г/см ³	Фазовый состав кермета
Al	750	3	Есть	3,15-3,21	TiC, Al, TiAl ₃
	750	5	Есть		
	750	7	Есть		
	750	8	Нет	-	-
	900	8	Есть	3,16	TiC, Al, TiAl ₃
	900	10	Нет	-	-
Al+12%Si	700	7	Есть	3,22-3,30	TiC, Ti_3AlC_2 , Al, Si
	700	8	Есть		
	700	10	Есть		
	750	8	Есть		
Al+32%Cu	700	8	Есть	3,45-3,61	TiC, Ti_3AlC_2 , Al, TiAl ₃ , CuAl ₂
Al+2%Mg	750	8	Нет	-	-

По таблице 2 видно, что на возможность самопроизвольной инфильтрации влияет, главным образом, временная пауза, выдерживаемая после окончания горения и перед началом инфильтрацией, а также химический состав расплава, в то время как влияние начальной температуры расплава в пределах 700-900°С на возможность самопроизвольной пропитки менее выражено. При паузе ~8 с расплав

Al прекращает инфильтроваться в каркас Ti_3AlC_2 , при этом повышение температуры расплава с 700 до 900°C позволяет осуществлять пропитку, однако дальнейшее увеличение паузы до 10 с приводит к отсутствию самопроизвольной инфильтрации. Визуально на срезах образцов керметов наблюдались единичные поры, что могло составлять до нескольких процентов остаточной пористости.

Для получения длинномерных образцов Ti_3AlC_2 -Al была разработана схема № 6 (рисунок 10).

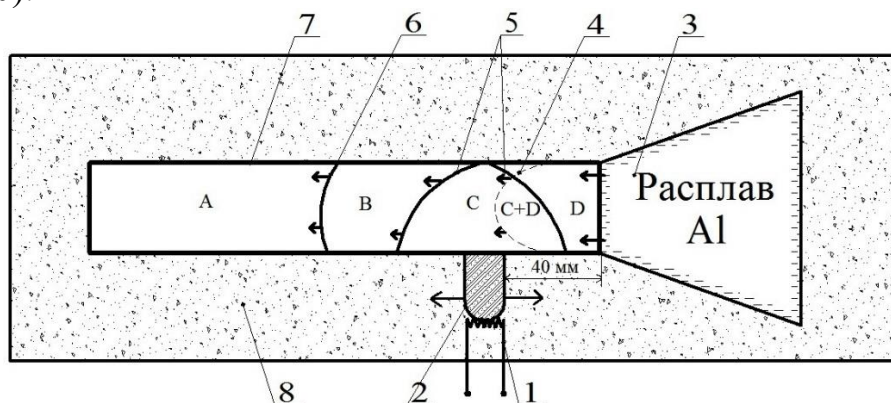


Рисунок 10 – Схема № 6 получения СВС кермета Ti_3AlC_2 -Al (вид сверху): 1 – спираль накаливания, 2 – запал, 3 – расплав Al при $T = 900\text{ }^\circ\text{C}$, 4 – фронт инфильтрации расплавом, 5 – условный фронт вторичного структурообразования Ti_3AlC_2 , 6 – фронт горения, 7 – шихта СВС.

(A – область исходных реагентов $3Ti-1Al-2C$, B – область первичного структурообразования TiC_x+TiAl_x , C – область вторичного структурообразования Ti_3AlC_2 , D – область инфильтрации Al, C+D – область Ti_3AlC_2 , содержащая инфильтрованный алюминий в порах)

Из рисунка 10 видно, что место инициирования СВС можно смещать вдоль шихтовой заготовки, регулируя таким путем паузу между прохождением волны горения и фронтом инфильтрации. Возможность регулирования паузы необходима для обеспечения определенной временной задержки для шихтовых смесей различного состава и плотности прессования, которые могут иметь значительно отличающиеся скорости горения. Из рисунка 10 видно, что первый фронт горения,двигающийся в сторону ванны расплава, пройдя путь в 40 мм, достигал конца шихтовой заготовки, и уже раскаленный СВС-каркас расплавлял оксидную пленку на поверхности ванны расплава. В этот момент начиналась инфильтрация расплава алюминия в СВС-каркас, в котором продолжал двигаться второй фронт горения в противоположном от ванны расплава направлении. Таким образом, обеспечивалась временная пауза между вторым (основным) фронтом горения,двигающимся в противоположном направлении от ванны расплава и инфильтрационным фронтом, приблизительно 7 с. Показано, что после прохождения волны горения из шихты (область A) образуется СВС-каркас с областью первичного структурообразования (область B) с промежуточными продуктами горения: TiC_x+TiAl_x . Затем с задержкой 5-7 секунд следует условно обозначенный фронт вторичного структурообразования, после которого образуется область C с целевым соединением Ti_3AlC_2 . Областью D обозначена пропитанная расплавом алюминия часть СВС-каркаса. Целевой фазовый состав состоит из областей C и D, которые обозначают получение СВС-кермета Ti_3AlC_2 -Al. Кроме того, было установлено,

что глубина пропитка при реализации данной схемы составляет порядка 110-130 мм при использовании расплава алюминия или силумина при температуре 900°C. При этом, показано, что расплав чистого алюминия преимущественно разрушает Ti_3AlC_2 при инфильтрации, а добавки 12% кремния и 32% меди способствуют сохранению Ti_3AlC_2 .

При получении СВС-керметов Ti_3SiC_2-Sn было обнаружено, что расплав олова при $T=400^\circ C$ не пропитывается самопроизвольно в СВС-каркас Ti_3SiC_2 , однако перегрев расплава олова до температуры 800°C позволил осуществить самопроизвольную инфильтрацию и получить целевой кермет. В результате удалось пропитать весь СВС-каркас, длина которого составляла 100 мм. Внешний вид такого цилиндра из центральной части (образец №4) после шлифования представлен на рисунке 11:

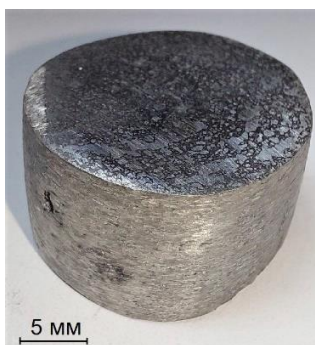


Рисунок 11 – Образец СВС-кермета Ti_3SiC_2-Sn

Из рисунка 11 видно, что образец имеет металлический блеск, что указывает на равномерное распределение олова по СВС-каркасу. Визуально наблюдаемых пустот и пор обнаружено не было. Распределение плотности по длине полученного кермета путем определения плотности каждого из 7 его образцов представлено на рисунке 12.

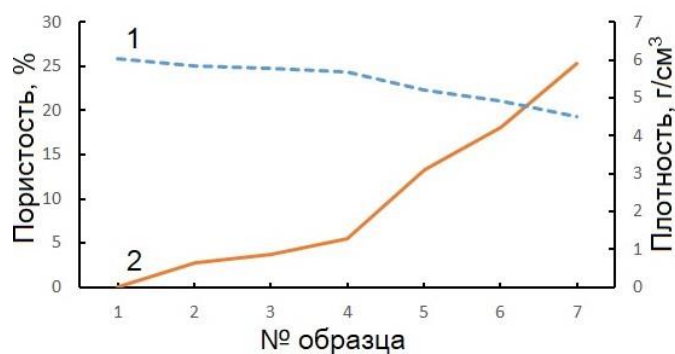


Рисунок 12 – Распределение плотности (1) и остаточной пористости (2) по длине СВС-кермета Ti_3SiC_2-Sn

Из рисунка 12 видно, что плотность пропитанного оловом СВС-каркаса Ti_3SiC_2 (100 мм) стабильно снижается по мере удаления от основания образца, контактировавшего с расплавом олова, с 6,05 до 4,49 г/см³. Такое снижение плотности соответствует росту остаточной пористости с ~0% до 25,3%. Важно отметить, что распределение плотности в системе $TiC-Al$ и Ti_3AlC_2-Al имеет относительно равномерный характер, когда значения плотности находятся в

определенном диапазоне по всей длине инфильтрированного образца. Такое различие, вероятно, можно объяснить отличающимися механизмами смачивания и самопроизвольной инфильтрации в реакционной межфазной системе ($TiC-Al$ и Ti_3AlC_2-Al) и слабо или нереакционной межфазной системе (Ti_3SiC_2-Sn). При этом, было отмечено, что инфильтрация расплавом олова не приводит к существенному снижению содержания Ti_3SiC_2 , что может указывать на нереакционный характер смачивания в данном случае. В кермете Ti_3SiC_2-Sn с помощью микротвердости были выявлены 3 области с различной микротвердостью: $\sim 0,19$ ГПа, $10,7 \pm 0,5$ ГПа и $6,0 \pm 0,3$ ГПа, что приблизительно соответствует фазами олова, карбида титана и карбосилицида титана. Условный предел прочности на сжатие для кермета $Ti_3SiC_2-Sn(Pb)$ составил около 117 МПа, что практически в 3 раза больше, чем у сплава $Sn(Pb)$.

Показано, что путем самопроизвольной инфильтрации расплава меди и ее сплавов в СВС-каркас из Ti_3SiC_2 можно получить кермет, однако требуется решить задачу одновременного обеспечения сохранения Ti_3SiC_2 и достижения полной пропитки. Расплавы медных сплавов для инфильтрации готовились при температуре 1100°C. По схеме №3 было установлено, что добавки 10% Si и 20% Sn к меди, при ее самопроизвольной инфильтрации в СВС-каркас спустя паузу 6-7 с, способствуют сохранению Ti_3SiC_2 в получаемом СВС-кермете. Добавление 10%Si или 20%Sn к меди позволило получить СВС-керметы с наличием фазы Ti_3SiC_2 по схеме №6, однако достичь полного заполнения пор СВС-каркаса не удалось.



Рисунок 13 – Образец кермета $Ti_3SiC_2-(Cu-20\%Sn)$

Из рисунка 13 видно, что глубина пропитки сплавом $Cu-20\%Sn$ составила около 70 мм, где заканчивается металлический блеск и начинается темная пористая структура каркаса Ti_3SiC_2 . Глубина пропитки сплавом $Cu-10\%Si$ составила около 90 мм.

Добавка 30% алюминия к меди способствует существенному повышению равномерности пропитки по сечению кермета, однако сплав $Cu-30\%Al$ разрушает Ti_3SiC_2 . Глубина инфильтрации составила около 70 мм. При инфильтрации эвтектических сплавов $Cu-20\%Sn$ и $Cu-30\%Al$ было установлено, что температура предварительного перегрева расплава является важным технологическим фактором наряду с химическими добавками к расплаву меди и паузой после горения и перед инфильтрацией.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые предложен простой и энергоэффективный способ получения керамики-металлических композитов (керметов) на основе сочетания процесса СВС пористого керамического каркаса с последующей самопроизвольной инфильтрацией расплавом металла, приготовленным предварительно за счет нагрева от внешнего источника, что позволяет использовать массу расплава, достаточную для полной пропитки керамического каркаса без приложения избыточного давления. Предложенный способ защищен патентом РФ на изобретение № 2733524, зарегистрированным 02.10.2020 г.

2. Показано, что порошки титана марки ТПП-7 и графита С-2 позволяют синтезировать однородные наименее дефектные СВС-каркасы TiC , Ti_3AlC_2 и Ti_3SiC_2 .

3. Разработаны и экспериментально опробованы 6 схем, сочетающих СВС каркаса и процесс его самопроизвольной инфильтрации расплавом металла. Обнаружено, что временная пауза, выдерживаемая между завершением СВС и моментом контакта каркаса с расплавом металла существенно влияет на возможность инфильтрации и ее полноту, а в случае с каркасами из МАХ-фаз на микроструктуру и фазовый состав керметов.

4. Установлено, что добавки Si, Cu к Al способствуют самопроизвольной инфильтрации расплава Al в каркасы TiC и Ti_3AlC_2 , а добавки Al, Sn и Si к Cu способствуют инфильтрации расплава меди в каркас Ti_3SiC_2 . Отмечено, что повышение начальной температуры расплава Sn-10Pb с 400 до 800°C также существенно способствует самопроизвольной инфильтрации расплава в каркас Ti_3SiC_2 .

5. Экспериментально получены СВС-керметы $TiC-Al$, Ti_3AlC_2-Al , Ti_3SiC_2-Sn , Ti_3SiC_2-Cu . Предел прочности на сжатие составил 330-390 МПа, 410 МПа, 117 МПа для СВС-керметов $TiC-Al$, $Ti_3AlC_2-(Al-12Si)$, $Ti_3SiC_2-(Sn-Pb)$, что значительно превышает прочность металлов (сплавов), входящих в состав соответствующих керметов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Амосов А.П., Латухин Е.И., Умеров Э.Р., Давыдов Д.М. Получение длинномерного МАХ-кермета Ti_3AlC_2-Al методом СВС с самопроизвольной инфильтрацией расплавом алюминия // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2022. №3. С. DOI: 10.17073/1997-308X-2022-3-24-36.
2. Латухин Е. И., Амосов Е. А., Умеров Э. Р., Давыдов Д. М. Формирование структуры и состава кермета TiC/Al при самопроизвольной инфильтрации расплава алюминия в пористый горячий каркас карбида титана, полученный методом СВС // Научно-технические технологии в машиностроении. 2022. №. 4. С. 3-12. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-4-3-12.
3. Латухин Е.И., Умеров Э.Р., Луц А.Р. СВС заготовок пористого карбида титана для последующей инфильтрации расплавами // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. Т. 19. №7. С. 322-330.

4. Амосов А.П., Латухин Е.И., Умеров Э.Р. Применение процессов инфильтрации и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для получения керметов. Обзор. // Известия вузов. Цветная металлургия. 2021. Т. 27. №. 6. С. 52–75. DOI: 10.17073/0021-3438-2021-6-52-75. (Переводная версия: Amosov, A.P., Latukhin, E.I. & Umerov, E.R. Applying Infiltration Processes and Self-Propagating High-Temperature Synthesis for Manufacturing Cermets: A Review. Russ. J. Non-ferrous Metals 63, 81–100 (2022). doi: 10.3103/S1067821222010047. *Scopus*.)

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

5. Latukhin, E.I., Umerov, E.R. & Amosov, A.P. Preparation of Ti_3AlC_2 -Al Cermets by Combined Use of SHS of Ti_3AlC_2 Porous Skeleton and Spontaneous Infiltration with Al and Al-Based Melts // Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. **32**, 23–29 (2023). <https://doi.org/10.3103/S1061386223010041>

6. Umerov, E.R., Latukhin, E.I., Amosov, A.P. *et al.* Preparation of Ti_3SiC_2 -Sn(Pb) Cermet by SHS of Ti_3SiC_2 Porous Skeleton with Subsequent Spontaneous Infiltration with Sn-Pb Melt // Int. J Self-Propag. High-Temp. Synth. **32**, 30–35 (2023). <https://doi.org/10.3103/S1061386223010089>

7. Latukhin E.I., Umerov E.R. and Amosov A.P. Preparation of Ti_3SiC_2 -Sn Cermet by the Combustion Synthesis of Ti_3SiC_2 Porous Skeleton with Subsequent Spontaneous Infiltration by Tin Melt // 2021 International Scientific and Technical Engine Conference, Samara, Russian Federation, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/EC52789.2021.10016803.

8. Latukhin E.I., Umerov E.R. and Amosov A.P. Combustion Synthesis of Ti_3AlC_2 Porous Skeleton with Spontaneous Infiltration by Aluminum Melt for Ti_3AlC_2 -Al Cermet Preparation // 2021 International Scientific and Technical Engine Conference, Samara, Russian Federation, 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/EC52789.2021.10016882

9. Latukhin E.I., Umerov E.R., Amosov A.P., Amosov E.A., and Novikov V.A. Physical and chemical fundamentals of combustion synthesis of skeleton ceramic metal composites TiC-Al // AIP Conference Proceedings 2304, 020013 (2020). 5 p. <https://doi.org/10.1063/5.0033883>.

10. Amosov A., Amosov E., Latukhin E., Kichaev P., Umerov E. Producing TiC-Al Cermet by Combustion Synthesis of TiC Porous Skeleton with Spontaneous Infiltration by Aluminum Melt // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2020) Proceedings. IEEE Xplore: 10 November 2020. P. 1057–1062. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9241903.

11. Amosov A.P., Latukhin E.I., Ryabov A.M., Umerov E.R., Novikov V.A. Application of SHS process for fabrication of copper-titanium silicon carbide composite (Cu- Ti_3SiC_2) // J. of Physics: Conf. Series. – 2018. - V.1115. - No. 4, Art. no 042003. DOI :10.1088/1742-6596/1115/4/042003.

Патенты:

12. Амосов А.П., Латухин Е.И., Умеров Э.Р. Способ получения керамико-металлических композиционных материалов: Пат. 2733524 (РФ). 2020.

Публикации в других изданиях:

13. Давыдов Д.М., Умеров Э.Р., Латухин Е.И. Сравнительный анализ методик оценки пористости СВС каркасов // Современные материалы, техника и технологии. №6 (39). С. 24-31. 2021

14. Умеров Э.Р., Латухин Е.И., Марков Ю.М. Инфильтрация расплава алюминия в пористый Ti_3AlC_2 после его синтеза // Современные материалы, техника и технологии, №5(32), 2020, С.106-114. DOI: 10.47581/2020/30.10.2020/SMТТ/32.5.018.

15. Умеров Э.Р., Барабаш С.В., Латухин Е.И. Влияние фракционного состава СВС шихты на структуру TiC // Современные материалы, техника и технологии, №5(32), 2020, С.106-114. DOI: 10.47581/2020/30.10.2020/SMТТ/32.5.002.

Научное издание

Умеров Эмиль Ринатович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук на тему:

Получение керметов с использованием самораспространяющегося высокотемпературного синтеза керамических каркасов TiC , Ti_3SiC_2 , Ti_3AlC_2 и последующей самопроизвольной инфильтрации расплавами металлов Al , Sn , Cu

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева» (протокол № 5 от «22» июня 2023 г.)

Формат 60x84 1/16. Набор компьютерный
Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ № _____.
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Отдел
типографии и оперативной печати
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.