

На правах рукописи



Рыбаков Антон Дмитриевич

**ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ УГЛЕРОДА ДЛЯ СВС
ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО КАРБИДА ТИТАНА В РАСПЛАВЕ ПРИ
ПОЛУЧЕНИИ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара - 2021

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. Мержанова 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 «23» декабря 2021, в 13 час. 00 мин. на заседании объединённого диссертационного совета 99.2.039.02 (Д 999.122.02) 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/sites/d99912202.samgtu.ru/files/Rybakov_diss.pdf

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 (Д 999.122.02).

Автореферат разослан « » _____ 2021 г.

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



А.Р. Луц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Алюмоматричные композиционные материалы (АМКМ), дисперсно-упрочненные керамическими частицами, представляют собой передовые материалы с повышенными характеристиками удельной прочности и износостойкости, в том числе при повышенных температурах, коррозионной стойкости и других свойств. Эти материалы занимают первое место по объему применения среди металломатричных композитов и используются в автомобилестроении и авиастроении для изготовления деталей двигателей и тормозных систем. В массовом производстве в качестве матрицы используют в основном промышленные алюминиевые сплавы и керамические частицы карбида кремния SiC и оксида алюминия Al₂O₃ микронных размеров до 50 мкм и содержанием до 25 об. %. Но таким АМКМ присущи недостатки в виде низкой трещиностойкости, плохой механической обрабатываемости, невысокой твердости и прочности при повышенных температурах. Преодолеть эти недостатки можно за счет перехода от армирующих частиц микронного размера к высокодисперсным субмикронным (0.1–1 мкм) и наноразмерным (менее 0.1 мкм = 100 нм) частицам, поэтому в настоящее время особое внимание уделяется исследованию и разработке АМКМ с наноразмерными частицами армирующей фазы.

Другое важное направление развития дисперсно-упрочненных АМКМ – использование карбида титана TiC в качестве армирующей фазы. В отличие от SiC и Al₂O₃, карбид титана имеет такую же кристаллическую решетку ГЦК как и α -Al, а также более высокие значения твердости и прочности. В связи с этим армирующие частицы TiC могут придать АМКМ комплекс свойств, превосходящий все другие дисперсно армированные системы на алюминиевой матрице. Композиты системы Al-TiC можно получать как методами ex-situ путем введения в состав алюминиевой матрицы частиц заранее приготовленного порошка карбида титана, так и методами in-situ путем синтеза частиц TiC в матрице алюминия непосредственно во время изготовления АМКМ. Тонкие порошки микронного размера, субмикронные порошки и особенно нанопорошки TiC имеют высокую стоимость, что значительно удорожает ex-situ методы. Поэтому экономически более выгодно применять in-situ методы химического синтеза TiC из недорогих доступных реагентов. При этом обеспечивается высокая термодинамическая стабильность, более плотный контакт и адгезия между матрицей и частицами TiC со свежей чистой поверхностью, так эти частицы образуются непосредственно в матрице, не контактируют с атмосферой, загрязняясь оксидами и адсорбированными газами.

Среди in-situ методов несомненный интерес представляет применение такого простого и энергосберегающего метода как самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), в котором высокоэкзотермическая реакция синтеза карбида титана из смеси порошков титана и углерода

Ti+C=TiC в режиме горения с температурой 2800°C является одной из самых распространенных химических реакций. В СамГТУ с 2001 года проводятся систематические исследования по получению литых АМКМ системы Al-TiC с использованием стехиометрической смеси порошков титана и технического углерода (сажи) для реализации реакции СВС карбида титана в расплаве алюминия. Композит с содержанием 10мас.% TiC в виде частиц размером 2-4 мкм показал наилучшее сочетание механических свойств, поэтому дальнейшие исследования проводились в направлении применения классических приемов нанотехнологии СВС с целью увеличения дисперсности карбидной фазы в композите Al-10мас.%TiC. Разбавление шихты инертными добавками, замена исходных порошков чистых элементов на их прекурсоры, использование флюсов позволило снизить размер частиц армирующей фазы в этом композите до высокодисперсного субмикронного и наноразмерного уровня. Однако полученные результаты нельзя считать окончательными, поскольку при использовании технического углерода (сажи) в качестве источника углерода остались не до конца решенными вопросы полноты протекания СВС-реакции, равномерности распределения частиц по его объему, образования побочных фаз, пористости композита. Решение этих проблем может заключаться в применении не только сажи, но и других, особенно новых, химически более активных форм углерода в качестве источника углерода в шихте Ti+C, что и определяет актуальность настоящей диссертационной работы.

Цель работы: исследовать влияния различных форм углерода на процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза высокодисперсных частиц карбида титана в расплаве алюминия и его сплавах при получении литых дисперсно-армированных алюмоматричных композиционных материалов Al-10мас.%TiC и Al-5мас.%Cu-10мас.%TiC.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Подбор оптимальных углеродных форм для проведения СВС в алюминиевом расплаве с целью синтеза АМКМ.

2. Проведение термодинамических расчетов реакций синтеза систем Al-10%TiC и Al-5%Cu-10%TiC с применением различных форм углерода для анализа состава продуктов синтеза при различных начальных температурах расплава.

3. Исследование смешиваемости исходных порошковых компонентов шихты Ti+C с использованием порошка титана и различных источников углерода, и последующее определение параметров горения полученных смесей порошков и микроструктуры продуктов СВС.

4. Экспериментальное исследование влияния углеродных форм на СВС частиц карбида титана в расплавах матричных основ Al и Al-5%Cu.

5. Исследование физических, технологических и механических свойств синтезированных алюмоматричных композитов на основах Al и Al-5%Cu.

Научная новизна работы:

1. Впервые предпринято сравнительное исследование влияния различных форм углерода (активированного углерода марок БАУ и АГ-2, коллоидного графита марки С-1, технического углерода (сажи) марок Т 900 и П 701, углеродных нанотрубок марки «Таунит») на СВС высокодисперсного карбида титана в расплаве при получении дисперсно-армированных литых алюмоматричных композиционных материалов.

2. Впервые проведен сравнительный термодинамический анализ протекания реакции $Ti+C=TiC$ в алюминиевых расплавах при использовании различных углеродных форм. Рассчитаны адиабатические температуры и состав продуктов реакции, определены оптимальные интервалы начальных температур расплавов для реализации СВС целевой фазы TiC .

3. Впервые исследовано смешивание и горение смеси $Ti+C$ с углеродными нанотрубками без инертного разбавления металлом.

4. Впервые экспериментально исследовано и сравнено влияние УНТ «Таунит», активированного угля марок БАУ и АГ-2 и коллоидного графита С-1 на процесс СВС частиц карбида титана в матричных системах Al и Al-5%Cu.

5. Впервые определено влияние УНТ «Таунит», активированного угля марок БАУ и АГ-2 и коллоидного графита С-1 на физические, технологические и механические свойства полученных с применением процесса СВС алюмоматричных композитов Al-10%TiC и Al-5%Cu-10%TiC.

Практическая значимость работы:

1. Технология изготовления литых алюмоматричных композиционных материалов Al-10%TiC и Al-5%Cu-10%TiC с применением процесса СВС дополнена результатами использования таких форм углерода как активированный уголь, коллоидный графит и углеродные нанотрубки в качестве источника углерода в шихте $Ti+C$ с обеспечением инициирования реакции СВС в алюминиевом расплаве и дисперсного армирования целевой фазой TiC .

2. Изготовлены опытные партии композитов Al-10%TiC и Al-5%Cu-10%TiC с применением следующих углеродных форм: активированного углерода марок БАУ и АГ-2, коллоидного графита марки С-1, технического углерода (сажи) марок Т 900 и П 701, углеродных нанотрубок марки «Таунит», исследованы и сравнены свойства этих композитов.

3. Определены оптимальные углеродные формы (технический углерод марки П-701 и УНТ марки «Таунит»), позволяющие получить наиболее удовлетворительные структуру и свойства в конечных литых композитах на основе алюминия. Размер отдельных частиц армирующей фазы карбида титана для композитов Al-10%TiC и Al-5%Cu-10%TiC составил 200-500 нм и 140-350 нм соответственно.

4. Результаты проведенных экспериментальных исследований показывают, что применение таких углеродных форм как активированный уголь, коллоидный графит и углеродные нанотрубки не дает преимуществ перед применением технического углерода (сажи) для СВС высокодисперсного

карбида титана в расплаве при получении дисперсно-армированных литых алюмоматричных композиционных материалов, поэтому для практического применения при изготовлении таких АМКМ методом СВС рекомендуется использовать такую форму углерода как технический углерод (сажа).

Соответствие паспорту заявленной специальности. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 2.6.17. (05.16.09) Материаловедение (машиностроение) по пунктам: 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.

Методология и методы исследования: термодинамические расчеты температуры и равновесного состава продуктов горения проводились с использованием компьютерной программы «THERMO», разработанной в Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН и основанной на методе минимизации термодинамического потенциала. Экспериментальные исследования процесса СВС в расплаве проводились с применением плавильной печи ПП20/12. Для анализа продуктов горения применялись методы металлографического, спектрального и рентгенофазового анализов. Исследовались структура, плотность, пористость, механические и литейные свойства синтезированных АМКМ.

Объект исследования: в качестве объектов исследования выбраны исходные порошковые смеси (шихты) различного состава для проведения процесса СВС и получаемые в результате проведения процесса СВС в расплаве композиционные материалы на основе алюминия и его сплавов.

Предмет исследования: физико-химические процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в расплаве алюминия при использовании различных форм углерода, состав, структура и свойства образцов синтезированных композитов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального исследования процесса СВС с применением различных углеродных форм с описанием результатов образования целевой армирующей фазы TiC.

2. Результаты термодинамических расчетов процесса СВС карбида титана в расплаве матрицы с различными углеродными формами, входящими в состав шихты для получения композитов Al-10%TiC и Al-5%Cu-10%TiC.

3. Результаты влияния углеродных форм на структуру и свойства синтезированных композитов Al-10%TiC и Al-5%Cu-10%TiC с определением наиболее оптимальных углеродных форм.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается использованием современного оборудования и аттестованных методик исследований, значительным количеством экспериментальных данных и применением статических методов обработки результатов, сопоставлением полученных результатов с результатами других авторов.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях: Международная конференция «СВС-50», приуроченная к 50-летию юбилею научного открытия «Явление волновой локализации автотормозящихся твердофазных реакций...» 20 – 21 ноября 2017 г. (г. Черноголовка), Синтез и консолидация порошковых материалов: Сборник тезисов Международной конференции 23-26 октября 2018 г. (г. Черноголовка), Семьдесят первая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием 18 апреля 2018 г. (г. Ярославль), 6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects 2018 г. 16-22 сентября 2018 г. (г. Томск), XV International Symposium on Self-Propagating High-Temperature Synthesis 2019 г. (г. Москва), Семьдесят вторая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием 24 апреля 2019 г. (г. Ярославль), 2d International Conference on Physics and Chemistry of Combustion and Processes in Extreme Environments (ComPhysChem'20) July 27-31, 2020, Samara, Russia, Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» 23-25 июня 2021 г. (г. Самара).

Работа выполнялась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №19-38-90032).

Публикации: По материалам диссертации опубликовано 17 печатных работ, включая 2 статьи в изданиях из перечня ВАК, 3 статьи в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора. Все результаты, включенные в диссертацию, получены лично автором или при его непосредственном участии. Автором проведены исследования влияния различных форм углерода на СВС алюмоматричных композиционных материалов, армированных высокодисперсными частицами карбида титана. Автор принимал активное участие в постановке задач диссертационной работы, в обсуждении результатов исследования, в изучении свойств полученных опытных образцов, а также в написании научных статей и подготовке докладов на научных конференциях.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников из 157 наименований. Диссертация изложена на 186 страницах и содержит 114 рисунков и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, обозначаются цель и задачи исследований, отражена научная новизна работы и ее практическая значимость. Излагаются основные положения, выносимые на защиту. Приводятся сведения об апробации работы и публикациях, структуре и объеме диссертации.

В **первой главе** приведен аналитический обзор литературы. Подчеркивается актуальность и востребованность алюмоматричных композиционных материалов (АМКМ) в промышленности. Приведена классификация АМКМ и методов их изготовления. Подробно рассматривается применение метода СВС для синтеза композиционных материалов на алюминиевой матрице, дисперсно-упрочненных частицами карбида титана, и его преимущества. Приводится обзор углеродных форм и их применение для получения композиционных материалов. В результате анализа литературных данных сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** приводится описание и характеристики исходных материалов, используемых для получения КМ на алюминиевой основе: алюминий чушковый марки А7, медная проволока марки М1, порошок титана марки ТПП-7, активированный углерод марок БАУ и АГ-2, коллоидный графит марки С-1, технический углерод (сажа) марок Т-900 и П-701, многослойные углеродные нанотрубки марки «Таунит», галоидная соль Na_2TiF_6 . Приведена методика подготовки исходной порошковой шихты, проведения процесса СВС в расплаве и получения экспериментальных образцов АМКМ.

Описываются методики термодинамического анализа, отбора проб для исследования синтезированных образцов АМКМ, исследования их физических, механических и литейных свойств, проведения металлографического, рентгенофазового и рентгеноспектрального анализов, статистической обработки данных.

В **третьей главе** приведены результаты термодинамических расчетов возможных химических реакций в системах исходных порошковых реагентов ($\text{Ti}+\text{C}+2\text{мас.}\%\text{Na}_2\text{TiF}_6$) в расплаве Al и Al-5%Cu для получения АМКМ Al-10%TiC и Al-5%Cu-10%TiC с применением различных форм углерода, для которых известны энтропии и энтальпии образования в стандартных условиях (графит, алмаз, технический углерод (сажа), фуллерен C_{60} , фуллерен C_{70} , УНТ). Ориентируясь на обычное получение в экспериментах образцов композита Al-10%TiC массой 200 г, первоначально был определен состав в молях исходных компонентов при введении порошковой шихты Ti+C (20 г) с активирующей добавкой 2% Na_2TiF_6 (0.4 г) от массы порошковой шихты в соответствующее количество расплава алюминия (180 г): $6.67\text{Al}+0.333(\text{Ti}+\text{C})+0.0019\text{Na}_2\text{TiF}_6$. Далее с использованием компьютерной программы «THERMO» проводились термодинамические расчеты зависимости адиабатической температуры T_{ad} и равновесного химического состава продуктов химического взаимодействия

исходных компонентов от начальной температуры T_0 этих исходных компонентов (температуры расплава). Результаты расчетов частично представлены на рис. 1.

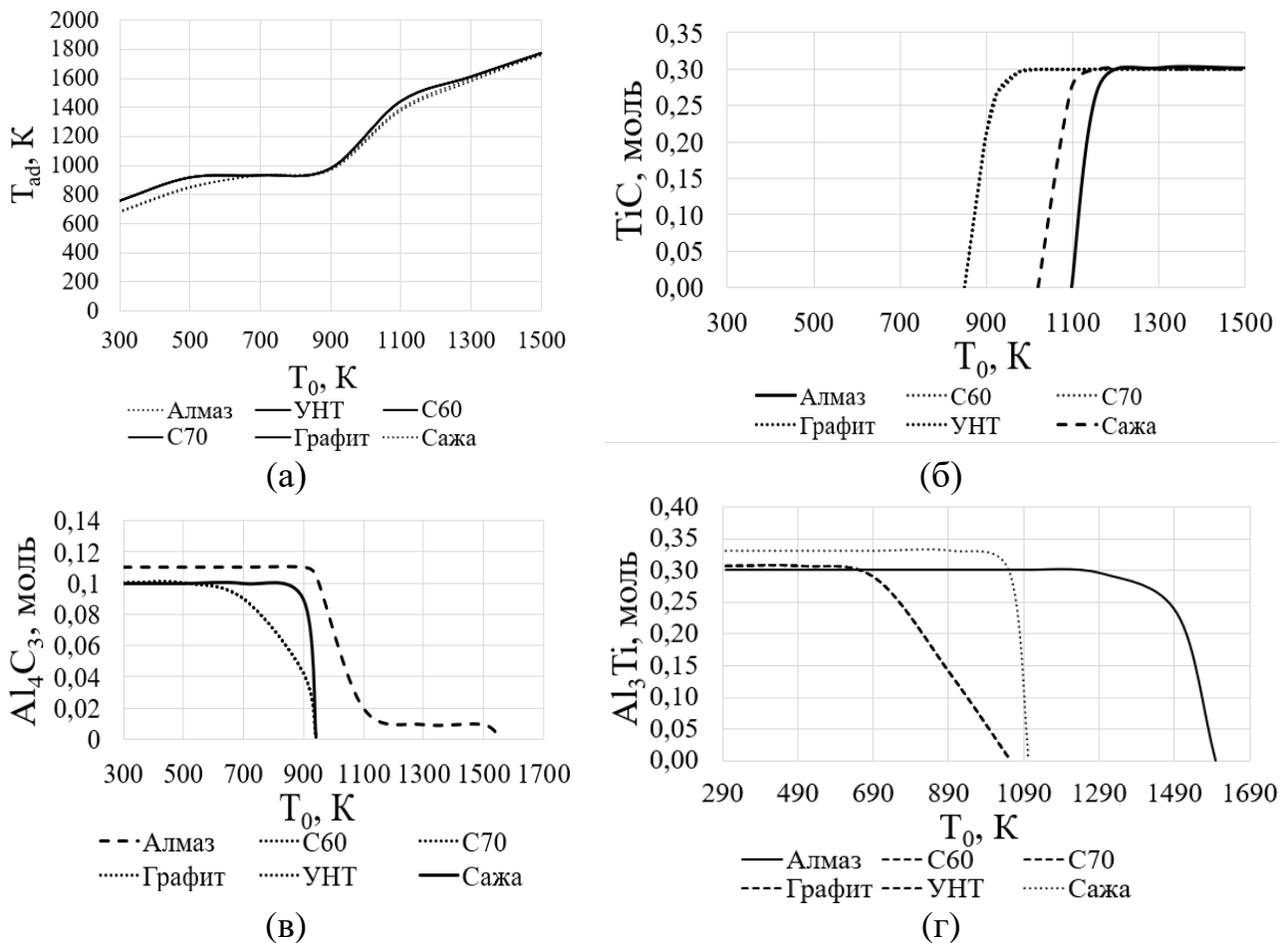


Рис. 1. Зависимости адиабатической температуры T_{ad} (а) и содержания фаз TiC (б), Al_4C_3 (в), Al_3Ti (г) в конечных продуктах от начальной температуры T_0 исходных компонентов

Из рис. 1, а видно, что для всех углеродных форм характерно непрерывное увеличение T_{ad} при увеличении T_0 за исключением интервала начальных температур 700 - 900 К, при котором T_{ad} удерживается на уровне температуры плавления алюминия 945 К. Значения T_{ad} для таких углеродных форм как графит, C_{60} , C_{70} и УНТ практически совпадают и при одинаковых значениях T_0 превышают примерно на 100 К значения T_{ad} для технического углерода (сажи) с алмазом, что свидетельствует о большей химической активности графита, фуллеренов C_{60} и C_{70} и УНТ по сравнению с техническим углеродом (сажей) и алмазом.

Из рис. 1, б-г следует, что к основным продуктам реакции с содержанием в десятые доли моля следует отнести целевую фазу TiC, а также побочные фазы Al_4C_3 и Al_3Ti , которые являются нежелательными в составе композитов Al-TiC, так как сказываются отрицательно на свойствах алюмоматричных композитов.

При начальных температурах реагентов ниже 850К целевая фаза TiC не синтезируется ни при каких формах углерода, а образуются только нежелательные побочные фазы Al₄C₃ и Al₃Ti. Синтез карбидной фазы при использовании таких активных форм как графит, C₆₀, C₇₀ и УНТ начинается около T₀ = 850К, а полное превращение Ti+C=TiC, то есть полная карбидизация титана, достигается при T₀ = 1000 К. При этом нежелательные фазы Al₄C₃ и Al₃Ti в конечном составе продуктов отсутствуют. В случае же применения технического углерода и алмаза полная карбидизация титана происходит только при T₀ = 1200 К и выше. При этом в случае алмазной формы нежелательные фазы Al₄C₃ и Al₃Ti сохраняются при более высоких начальных температурах до 1500 К. Таким образом, и по составу продуктов реакции такие формы углерода как графит, C₆₀, C₇₀, УНТ демонстрируют более высокую химическую активность и позволяют синтезировать карбид титана в полном объеме без примесей побочных фаз Al₄C₃ и Al₃Ti при начальных температурах компонентов 1000 К, которая на 200 К меньше, чем в случае применения технического углерода и алмаза. Термодинамический расчет также показывает, что добавка в состав начальных компонентов соли Na₂TiF₆ в результате взаимодействия с алюминием приводит к образованию легкогазифицирующихся соединений алюминия, натрия и фтора, способных оказывать рафинирующее воздействие на матричный расплав.

Подобные результаты термодинамических расчетов получаются и в случае синтеза алюмоматричного композита Al-5%Cu-10%TiC. Дополнительным фактором здесь является образование фазы алюминида меди CuAl₂, присутствие которой способствует повышению дисперсности фазы карбида титана. Результаты показывают, что в наибольшем количестве данная фаза CuAl₂ формируется при использовании технического углерода.

В **четвертой** главе описывается оценка степени смешиваемости и прессуемость, а также процесс горения в шихтовых двойных смесях Ti+C, содержащих титан марки ТПП-7 и следующие формы углерода: активированный уголь марок БАУ и АГ-2, коллоидный графит С-1, технический углерод Т-900 и П-701, углеродные нанотрубки марки «Таунит». Стоит отметить, что фуллерены C₆₀ и C₇₀ являются сложными в производстве и дорогими, поэтому далее в рамках нашего экспериментального исследования не использовались.

На основе данных картирования выявлено, что активированный уголь марок БАУ и АГ-2 характеризуется наименьшей степенью смешиваемости с порошком титана марки ТПП-7, в то время как порошки графита С-1, технического углерода Т-900 и П-701, углеродные нанотрубки «Таунит» показывают удовлетворительную степень смешиваемости. Также выявлено, что шихтовые смеси на основе порошков БАУ и АГ-2 не обладают прессуемостью, то есть способностью образовывать прессовки заданной формы под действием внешнего давления и удерживать эту форму после снятия нагрузки при

давлении 15 кг/см²; на основе остальных углеродных форм получены формованные навески шихтовых смесей достаточной прочности.

Инициирование горения в прессованных двойных смесях без разбавления металлом Ti+C с порошками графита, технического углерода и углеродных нанотрубок на открытом воздухе и в среде аргона проводилось при использовании дополнительного теплового источника в виде зажигательной термитной смеси из Fe₂O₃ и Mg. Данные микроструктурного и рентгенофазового анализа позволяют утверждать, что графит, технический углерод и углеродные нанотрубки являются реакционноспособными формами углерода, которые в двойных смесях Ti+C полностью вступают в реакцию с порошком титана и образуют целевую фазу карбида титана. Морфология и размер частиц карбида титана, синтезированного при горении двойных смесей, представляли собой либо неоднородный пористый каркас из крупных сплавленных беспористых агрегатов со средним размером 50 мкм и пористых агломератов из мелких частиц размером до 5 мкм на поверхности пор каркаса, либо более однородный пористый каркас из частиц с размером 2-5 мкм. При горении двойных смесей Ti+C без разбавления инертным материалом при использовании любой исследованной формы углерода, в том числе УНТ, карбид титана синтезируется не в виде высокодисперсных субмикронных или наноразмерных частиц, а в виде пористого каркаса спекшихся частиц с размером от 2 до 50 мкм.

В **пятой главе** показаны результаты экспериментальных исследований по влиянию углеродных форм на процесс протекания СВС в расплаве алюминия и на структуру экспериментальных образцов алюмоматричных композитов.

Первая серия экспериментов проводилась на алюминиевой матрице. Использование активированного угля марок БАУ и АГ-2 было признано нецелесообразным, так как при использовании БАУ, несмотря на получение целевой фазы карбида титана в виде мелких агломератов, состоящих из высокодисперсных частиц с размерами 150-300 нм, происходит формирование хрупкой фазы алюминида титана. При использовании АГ-2 также наблюдается наличие фазы Al₃Ti в виде большого количества мелкоигольчатых включений, и свободного углерода в матрице.

При применении коллоидного графита С-1 также не получено удовлетворительных результатов. Несмотря на то, что была образована целевая фаза карбида титана в виде разных по размеру агломератов, состоящих из блочных частиц с размерами 170-600 нм, без включений Al₃Ti, в составе матричной основы также регистрируется наличие свободного углерода, что свидетельствует о неполноте прошедшей СВС-реакции.

С применением сажи марки Т-900 помимо образования мелких агломератов карбида титана, состоящих из округлых частиц с размерами 300-600 нм, было зарегистрировано наличие кислорода. Это можно объяснить тем, что термическая сажа состоит в основном из отдельных, не связанных между

собой частиц, позволяющих кислороду проникать в ее состав в значительном количестве и делающих результаты синтеза с Т-900 неудовлетворительными.

При использовании сажи П-701, в отличие от предыдущих случаев, был получен качественный излом образцов без посторонних включений и с незначительной пористостью. Анализ микроструктуры показал присутствие скоплений блочных частиц размером 200-500 нм (рис.4).

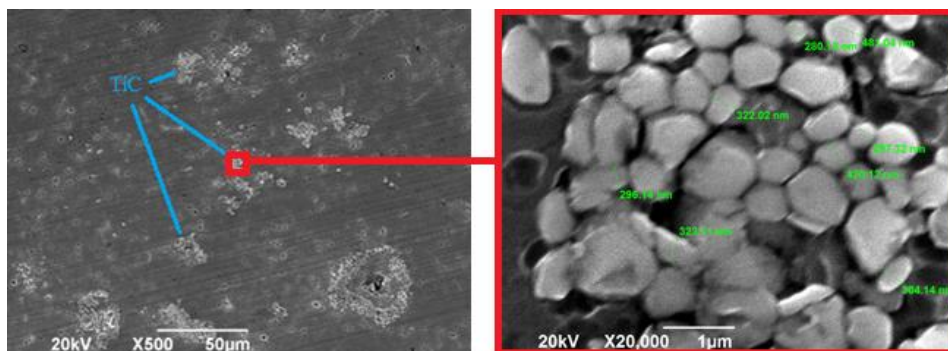


Рисунок 4 – Микроструктура образца Al-10%TiC, синтезированного с применением П-701

Результаты МРСА и РФА позволяют сделать выводы о том, что синтезирована высокодисперсная карбидная фаза, а отсутствие свободного углерода в матричной основе свидетельствует о полноценном прохождении СВС-реакции. Использование технического углерода марки П-701 является оправданным и его можно рекомендовать для синтеза литого композиционного материала на основе алюминия.

После ввода шихтовой смеси с УНТ и проведения синтеза в расплаве, анализ микроструктуры показал наличие довольно крупных агломератов карбида титана, неравномерно распределенных по объему матрицы. При большом увеличении видно, что частицы в агломератах имеют размеры 100-240 нм. МРСА показал, что в некоторых областях количество углерода превышает его содержание в TiC, что свидетельствует о наличии свободного углерода. Результаты РФА показывают наличие и фазы Al_3Ti , которая присутствует в виде очень мелких включений. Таким образом, УНТ «Таунит» образуют карбидную фазу, но не вступают в полноценную реакцию синтеза и поэтому результаты признаны неудовлетворительными.

По результатам синтеза TiC на алюминиевой основе было сделано предположение, что после ввода навесок Ti+C СВС-реакция в полной мере происходит только в местах непосредственного соприкосновения шихты с расплавом алюминия, где затем образуется плотный карбидный слой, который препятствует полноценному синтезу TiC по всему объему навески. По этой причине в состав матрицы было решено добавить легирующий элемент, который бы позволил повысить смачиваемость карбида титана расплавом алюминия, его проникание между частицами в навеске. По результатам анализа характеристик двухкомпонентных систем с алюминием было выявлено, что в

наибольшей степени поставленной задаче соответствует добавка меди в количестве 4,5-5,3%. Кроме того, положительным фактором является то, что в этом случае возможно образование мелкодисперсной упрочняющей фазы CuAl_2 . Поэтому следующая серия экспериментов была проведена на основе Al-5\%Cu .

В ходе плавки с применением активированного угля марки БАУ на полученном образце был получен равномерный серый пористый излом. Анализ микроструктуры показал наличие двух фаз: остроугольной пластинчатой Al_3Ti и агломератов TiC из частиц блочной формы с размерами 200-900 нм. Результаты МРСА и РФА подтверждают наличие фаз Al , TiC , CuAl_2 , Al_3Ti . Из-за присутствия нежелательной интерметаллидной фазы Al_3Ti синтез с применением активированного угля БАУ признан неудовлетворительным.

При использовании активированного угля АГ-2 излом и структурные составляющие образцов композитов оказались, в целом, аналогичными образцам на алюминиевой основе. Следует отметить, что, хотя размер частиц карбида титана в составе агломератов составил 200-400 нм, результаты МРСА свидетельствовали о наличии свободного углерода. Поэтому в данном случае следует, что АГ-2 является менее реакционноспособным, чем БАУ, и рекомендовать его к использованию также не стоит.

При синтезе с коллоидным графитом С-1 анализ микроструктуры показал наличие неравномерно распределенных крупных агломератов из частиц TiC блочной формы размером 400-750 нм, подтвержденных данными МРСА и РФА. Также была зафиксирована фаза CuAl_2 и свободный углерод. Очевидно, крупные исходные размеры порошка графита не позволяют шихте раствориться в расплаве и вступить полностью в химическое взаимодействие, в связи с чем в ходе быстрой СВС-реакции образуются крупные агломераты, вокруг и внутри которых остается непрореагировавший углерод. Таким образом, применение данной формы углерода не рекомендовано.

В образце с применением технического углерода Т-900 данные РФА и МРСА показывают наличие целевых фаз Al , CuAl_2 , TiC , а также наличие нежелательной фазы Al_3Ti , что позволяет сделать вывод о нецелесообразности использования марки Т-900 для синтеза композиционного материала.

При применении марки технического углерода П-701 фаза карбида титана представляла собой высокодисперсные частицы блочной формы с размерами 100-210 нм, а матричная основа содержала только целевые элементы – алюминий и медь (рис. 5). Рентгенограмма также свидетельствует о присутствии только требуемых фаз – Al , TiC , CuAl_2 . Результаты, полученные с применением данной формы углерода, можно считать удовлетворительными и рекомендовать для дальнейшего использования.

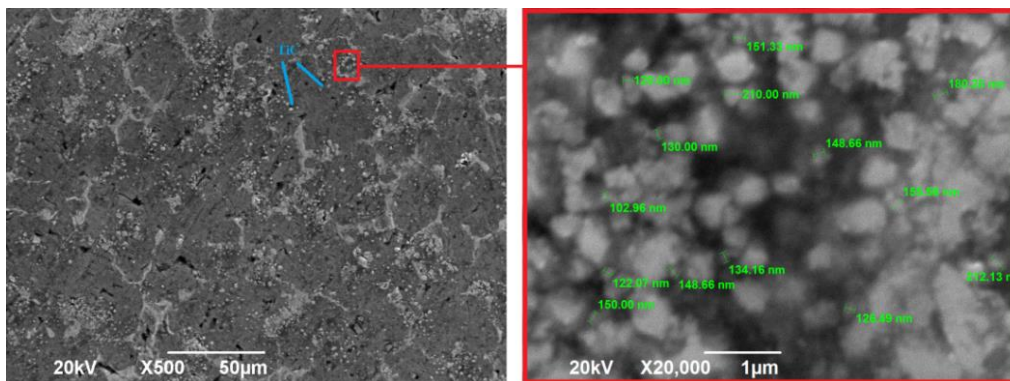


Рисунок 5 – Микроструктура образца Al-5%Cu-10%TiC, синтезированного с применением П-701

При использовании в СВС-шихте УНТ «Таунит» микроструктура полученного образца представляла собой относительно равномерно распределенные небольшие агломераты и включения отдельных частиц карбидной фазы более крупного размера 250-800 нм (рис. 6).

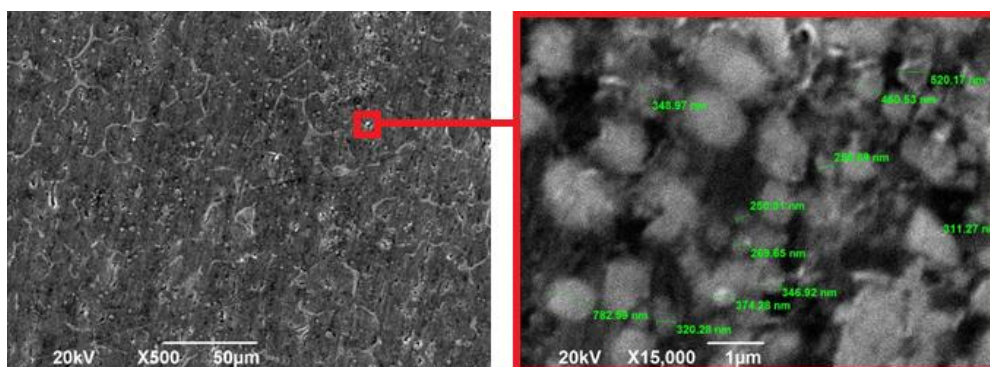


Рисунок 6 – Микроструктура образца Al-5%Cu-10%TiC, синтезированного с применением УНТ

В отличие от результатов, полученных на алюминиевой основе, при добавке меди отмечается отсутствие и спекшихся агломератов карбидной фазы, и свободного углерода в составе матрицы. Очевидно, присутствие меди, которую можно рассматривать как инертную добавку, ведет к снижению температуры СВС-реакции и, если в случае с крупнодисперсными формами углерода это приводило к затуханию синтеза, в данном случае, ввиду более полного проникновения расплава алюминия внутрь шихты, реакция продолжается вплоть до полного вступления углерода во взаимодействие с порошком титана. РФА подтвердил, что в составе образца присутствуют только целевые фазы Al, TiC, CuAl_2 . Полученные результаты свидетельствуют, что синтез литых образцов с применением УНТ «Таунит» на алюминиево-медной основе приводит к более равномерному распределению более крупных частиц TiC и позволяет рекомендовать использовать эту углеродную форму в дальнейшей работе.

В **шестой** главе представлены результаты исследования физических, литейных и механических свойств композиционных алюминиевых материалов, синтезированных при использовании различных форм углерода.

Полученные значения плотности исходных матричных основ Al и Al-5%Cu составили соответственно 2700 и 2780 кг/м³. Анализ плотности композитов показывает в большинстве случаев более высокие значения, что свидетельствует о присутствии карбида титана (рис. 7).

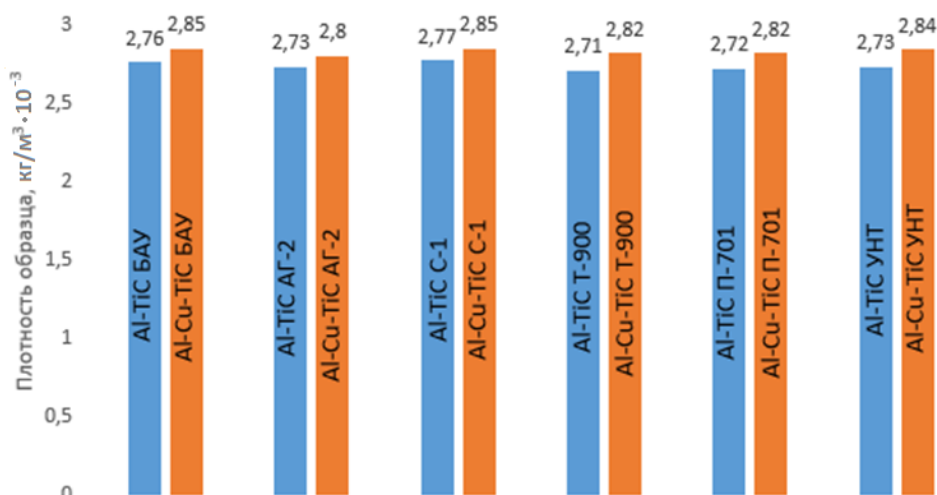


Рисунок 7 – Плотность литых образцов композитов

Анализ пористости образцов показывает, что в образцах, где синтез карбидной фазы произошел частично, пористость возрастает. Добавка меди в состав композита с Т-900, П-701 и УНТ способствует снижению пористости (рис 8).

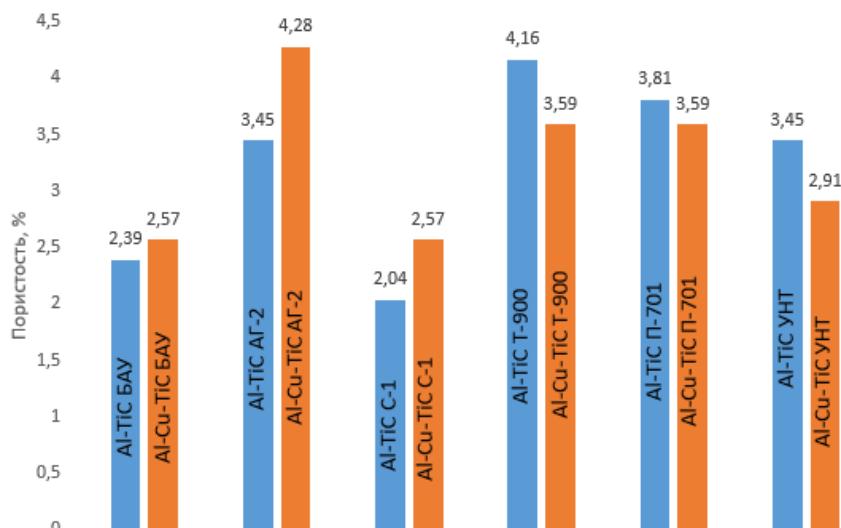


Рисунок 8 – Пористость литых образцов композитов

Электропроводность является структурно чувствительной величиной, и при одинаковом химическом составе на нее существенное влияние оказывают

параметры структуры фаз, распределение фаз по объему образца и наличие легирующих элементов и неметаллических примесей. Полученные значения электропроводности для композитов рекомендованных составов: на алюминиевой матрице с техническим углеродом П-701 составляет 20,67 МСм/м, а на алюминиево-медной матрице с П-701 и УНТ соответственно 15,57 и 15,08 МСм/м.

Значения жидкотекучести в пробах оценивалось по высоте залитого столба, с максимально возможным значением, равным 400 мм, и составили 310, 290, 290 мм для матрицы Al-5%Cu и композитов Al-5%Cu-10%TiC (П-701) и Al-5%Cu-10%TiC (УНТ) соответственно. Частицы карбида титана субмикронных и наноразмеров, присутствующие в обоих образцах синтезированных композитов, незначительно (на 6,45%) снижают жидкотекучесть, которая находится на приемлемом уровне.

Исследования твердости опытных образцов (табл. 1) показывают повышение ее значений во всех образцах на алюминиевой основе на 7,5%-27,8%. Наиболее высокие показатели в образцах, полученных с применением двух марок активированного угля БАУ и АГ-2, обусловлены большим содержанием нежелательной фазы Al_3Ti .

В образцах композитов, синтезированных на алюминиево-медной основе, также отмечается повышенная твердость в образцах, включающих нежелательную фазу Al_3Ti , но следует отметить общее увеличение твердости на 21,7-46,3%, связанное с легированием медью.

Таблица 1 – Твердость опытных образцов АМКМ

Состав образца АМКМ	Твердость, НВ	Состав образца АМКМ	Твердость, НВ
Al (А7)	20,0	Al-5%Cu	48,0
Al-10%TiC (БАУ)	33,3	Al-5%Cu-10%TiC (БАУ)	64,2
Al-10%TiC (АГ-2)	33,1	Al-5%Cu-10%TiC (АГ-2)	66,2
Al-10%TiC (ГК-С-1)	21,5	Al-5%Cu-10%TiC (С-1)	58,4
Al-10%TiC (Т-900)	22,4	Al-5%Cu-10%TiC (Т-900)	70,2
Al-10%TiC (П-701)	25,5	Al-5%Cu-10%TiC (П-701)	63
Al-10%TiC (УНТ)	25,6	Al-5%Cu-10%TiC (УНТ)	63,6

Результаты испытаний прочности при растяжении в образцах композитов, синтезированных с использованием П-701 и УНТ «Таунит», а также матричного сплава Al-5%Cu, показывают, что в обоих синтезированных образцах прочность при растяжении значительно увеличилась по сравнению с показателями основы (матрицы), при этом пластичность осталась на приемлемом уровне (табл. 2). Особо надо отметить, что у сплава АМ5 в литом состоянии, без термической обработки прочность при растяжении составляет 188 МПа, относительное удлинение 7%, относительное сужение 8%, поэтому полученные результаты следует считать удовлетворительными.

Таблица 2 – Результаты испытаний прочности при растяжении

Состав литого образца	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
Al-5%Cu	135	18	31
Al-5%Cu-10%TiC (П-701)	223	6	7
Al-5%Cu-10%TiC (УНТ)	203	6	6,6

Наличие в составе полученных образцов значительного количества карбидной фазы может способствовать увеличению прочности и при сжатии. Полученные данные представлены в таблице 3 для образцов диаметром 20 мм и высотой 20 мм.

Таблица 3 – Результаты испытания прочности при сжатии

Состав образца АМКМ	Время нагрузки, с	Максимум нагрузка, кН	Деформация при сжатии, %	Предел текучести, МПа
Al-5%Cu-10%TiC (П-701)	290	290	59	278
Al-5%Cu-10%TiC (УНТ)	290	290	63	241

Оба образца в ходе испытаний при максимальной нагрузке 290 кН и времени эксперимента 290 секунд деформировались до формы шайбы без каких-либо признаков разрушения, поэтому по максимальным значениям нагрузки и деформации определялся не предел прочности, а предел текучести. Полученные значения для образцов на основе П-701 и УНТ составили соответственно 278 и 241 МПа, что, ожидаемо, больше прочности на растяжение и можно считать удовлетворительным результатом.

В заключении обобщены результаты работы и представлены выводы:

1. Результаты термодинамических расчетов показали возможность синтеза карбида титана по реакции $Ti+C=TiC$ с применением следующих форм углерода: графит, алмаз, технический углерод, фуллерены C_{60} , C_{70} , углеродные нанотрубки при начальной температуре алюминиевого расплава выше 850 °С. При меньших начальных температурах синтезируются нежелательные побочные фазы Al_4C_3 и Al_3Ti , количество которых убывает при увеличении начальной температуры. Графит, фуллерены C_{60} и C_{70} , УНТ проявляют более высокую химическую активность и позволяют синтезировать TiC в полном объеме без примесей побочных фаз Al_4C_3 и Al_3Ti при начальных температурах расплава 1000 К, которая на 200 К меньше, чем в случае применения технического углерода и алмаза. В системе Al-Cu-Ti-C наибольшее количество упрочняющей фазы $CuAl_2$ образуется при использовании технического углерода. Результаты термодинамических исследований показывают, что для

получения композитов Al-10%TiC и Al-5%Cu-10%TiC более предпочтительно использование таких форм углерода как графит, технический углерод (сажа), фуллерены C₆₀ и C₇₀, УНТ.

2. Экспериментальные исследования смешивания и прессования порошковой СВС-шихты Ti+C показали, что активированный уголь марок БАУ и АГ-2 характеризуется наименьшей степенью смешиваемости с порошком титана марки ТПП-7 и не обеспечивает прессуемость шихты, в то время как порошки графита С-1, технического углерода Т-900 и П-701, углеродные нанотрубки «Таунит» показывают удовлетворительную степень смешиваемости и обеспечивают образование прессовок шихты достаточной прочности. Данные микроструктурного и рентгенофазового анализов продуктов горения шихт Ti+C на воздухе и в аргоне подтвердили высокую реакционную способность графита С-1, технического углерода Т-900 и П-701, углеродных нанотрубок «Таунит», которые полностью вступают в реакцию с порошком титана и образуют целевую фазу карбида титана в виде пористого каркаса спекшихся частиц с размером от 2 до 50 мкм. Таким образом, при горении двойных смесей Ti+C без разбавления инертным материалом, например, металлом, при использовании любой исследованной формы углерода, в том числе УНТ, не удастся синтезировать карбид титана в высокодисперсном виде субмикронных или наноразмерных частиц.

3. Экспериментальные исследования показали, что все рассмотренные в работе формы углерода являются реакционноспособными и образуют карбид титана в результате реализации процесса СВС в расплаве чистого алюминия. При этом расплав играет роль разбавителя, способствует уменьшению размера частиц синтезируемого карбида титана и образованию его в высокодисперсном виде субмикронных частиц. Однако формирования композиционного материала Al-10%TiC оптимального фазового состава удастся достичь с использованием только технического углерода марки П-701. Исследования микроструктуры показали наличие карбида титана в матрице КМ в виде отдельных, не спекшихся частиц с размером 200-500 нм, при этом синтезированная карбидная фаза в КМ близка к стехиометрическому составу, а отсутствие углерода в матричной основе указывает на полноценное протекание СВС-реакции. Остальные углеродные формы не способствуют достаточной полноте прохождения СВС, а также приводят к формированию нежелательной побочной фазы Al₃Ti.

4. В расплаве сплава Al-5%Cu также все рассмотренные формы углерода являются реакционноспособными и образуют частицы карбида титана субмикронных размеров. Но формирование композиционного материала Al-5%Cu-10%TiC с оптимальными параметрами возможно только с применением технического углерода марки П-701 и углеродных нанотрубок «Таунит». При использовании П-701 синтезированная фаза карбида титана представляет собой разделенные частицы блочной формы с размером 100-200 нм, при этом в матричной основе наблюдаются только целевые элементы – Al и Cu. При

использовании УНТ «Таунит» наблюдается достаточно равномерное распределение небольших скоплений и включений отдельных частиц карбидной фазы, но значительно более крупного размера 250-800 нм. Применение БАУ, АГ-2, С-1 и Т-900 в качестве исходного компонента шихты Ti+C при получении композита Al-5%Cu-10%TiC также не целесообразно по причинам присутствия нежелательной фазы Al₃Ti и свободного углерода в составе композита.

5. Исследование плотности синтезированных композитов с использованием различных форм углерода показало, что по плотности образцы синтезированных композитов отличаются незначительно. Наибольшей плотностью обладают образцы Al-10%TiC (С-1) (2770 кг/м³) и Al-5%Cu-10%TiC (С-1) (2850 кг/м³). При исследовании пористости наилучший результат, то есть наименьшую пористость, показали образцы систем Al-10%TiC (С-1) и Al-5%Cu-10%TiC (С-1) со значениями 2,03% и 2,57% соответственно. При использовании Т-900, П-701 и УНТ «Таунит» в расплаве Al-5%Cu значения пористости КМ снижаются по сравнению с композитами на основе алюминия, при этом обратная тенденция наблюдается в случае использования БАУ, АГ-2 и С-1.

6. Результаты исследования механических свойств показали повышение твердости в синтезированных композитах с алюминиевой матрицей на 7,5% - 27,8%, в образцах с Al-5%Cu матрицей - на 22% - 46%. Лучшие образцы Al-5%Cu-10%TiC (П-701) и Al-5%Cu-10%TiC (УНТ) с твердостью 63 и 63,6 НВ соответственно подвергались испытанию на растяжение и показали значительный рост предела прочности в сравнении с неармированным матричным сплавом Al-Cu: 223 и 203 МПа соответственно по сравнению с 135 МПа. При испытании на сжатие эти образцы выдержали максимальную нагрузку на установке, их предел текучести достиг значений 280 и 240 МПа соответственно, а деформация составила 59,70 и 63,22%.

7. В целом, результаты проведенных экспериментальных исследований показывают, что использование таких углеродных форм как активированный уголь, коллоидный графит и углеродные нанотрубки не дает преимуществ перед использованием технического углерода (сажи) для СВС высокодисперсного карбида титана в расплаве при получении дисперсно-армированных литых алюмоматричных композиционных материалов Al-10%TiC и Al-5%Cu-10%TiC, поэтому для практического применения при изготовлении таких АМКМ методом СВС целесообразно использовать такую форму углерода как технический углерод (сажа).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, индексируемых базами Web of Science и/или SCOPUS:

1. Amosov, A.P. Using different powdered carbon forms for reinforcing aluminum composite materials with carbon and titanium carbide: a review / A.P. Amosov, A.R. Luts, A.D. Rybakov, E.I. Latukhin // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2020. Vol. 61. No. 5. P. 500–516. DOI: 10.3103/S1067821220050028. Амосов, А.П. Применение различных порошковых форм углерода для армирования алюмоматричных композиционных материалов углеродом и карбидом титана. Обзор / А.П. Амосов, А.Р. Луц, А.Д. Рыбаков, Е.И. Латухин // Известия вузов. Цветная металлургия. 2020. № 4. С. 44-64 (ВАК).

2. Rybakov, A.D. Carbon form influence on combustion synthesis of titanium carbide / A.D. Rybakov, A.R. Luts, E.I. Latukhin, A.P. Amosov // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2304. No. 020030. 5 p. DOI: 10.1063/5.0034549.

3. Amosov, A.P. Effect of alloying on structure and properties of particle – reinforced aluminum matrix composites Al/TiC produced by SHS in aluminum melt / A.P. Amosov, E.I. Latuhin, A.D. Rybakov, V.A. Novikov, S.I. Shipilov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1115. No. 042002. 6 p. DOI :10.1088/1742-6596/1115/4/042002.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Рыбаков, А.Д. Термодинамическая оценка влияния аллотропной формы углерода на синтез фазы карбида титана в расплаве алюминия / А.Д. Рыбаков, А.Р. Луц, Д.В. Закамов, А.П. Амосов // Прикладная физика и математика. № 2. 2021. С. 11-20. DOI: 10.25791/pfim.02.2021.1193.

2. Луц, А.Р. Влияние температуры расплава алюминия на формирование дисперсных частиц карбида титана в ходе реализации процесса СВС / А.Р. Луц, Е.А. Амосов, А.Д. Рыбаков // Вестник Брянского государственного технического университета, 2018. № 4(56). С. 31-36.

Публикации в других изданиях:

1. Рыбаков, А.Д. Термодинамическая оценка влияния аллотропной формы углерода на синтез фазы карбида титана при горении в расплаве алюминия / А.Д. Рыбаков, А.Р. Луц, Д.В. Закамов, А.П. Амосов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: сборник докладов Междунар. научн.-техн. конф. 23–25 июня 2021 г. В 2 т. Т. 2. Самара: Издательство Самарского университета, 2021. 372 с. С. 255-256.

2. Рыбаков, А.Д. Оценка литейных характеристик образцов Al-5%Cu-10%TiC, полученных методом СВС с применением различных углеродных форм / А.Д. Рыбаков, А.Р. Луц // Современные материалы, техника и технологии. 2020. №5 (32). С. 87-91.

3. Луц, А.Р. Оценка коррозионной стойкости образцов Al-10%TiC и Al-5% Cu-10%TiC, получаемых методом СВС с применением различных углеродных форм / А.Р. Луц, А.Д. Рыбаков, Д.В. Закамов // Современные материалы, техника и технологии. 2020. №5 (32). С. 58-62.

4. Рыбаков, А.Д. Патентный анализ возможности применения различных углеродных форм для синтеза карбида титана в составе

алюмоматричных композиционных материалов / А.Д. Рыбаков, А.Р. Луц // Современные материалы, техника и технологии. 2020. №3 (30). С. 48-52.

5. Рыбаков, А.Д. Применение углеродных нанотрубок в СВС алюмоматричных композитов Al(Cu)-TiC / А.Д. Рыбаков, А.П. Амосов, А.Р. Луц, В.А. Новиков // Семьдесят вторая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 24 апреля 2019 г., Ярославль: сб. материалов конф. В. 3 ч. Ч. 2 [Электронный ресурс]. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2019. С. 494-497.

6. Рыбаков, А.Д. Исследование процесса получения армированного карбидом титана алюмоматричного сплава методом СВС в расплаве с применением углеродных нанотрубок в качестве источника углерода / А.Д. Рыбаков, А.Р. Луц // Современные материалы, техника и технологии. 2019. №5 (26). С. 159-164.

7. Рыбаков, А.Д. О взаимодействии частиц графита разного размера с расплавом титана в ходе СВС реакции / А.Д. Рыбаков, Е.А. Амосов, Э.Р. Умеров // Современные материалы, техника и технологии. 2019. №5 (26). С. 154-158.

8. Luts, A.R. Structure and properties of alloyed composites Al-TiC fabricated by SHS method / A.R. Luts, A.P. Amosov, E.I. Latuhin, A.D. Rybakov, S.I. Shipilov // XV International Symposium on Self-Propagating High-Temperature Synthesis. Chernogolovka: IPCP RAS. 2019. P. 242-245.

9. Луц, А.Р. О возможности применения различных углеродных форм для синтеза карбида титана методом СВС в расплаве алюминия / А.Р. Луц, А.Д. Рыбаков // Современные материалы, техника и технологии. 2019. №5 (26). С. 82-79.

10. Рыбаков, А.Д. Термодинамический анализ влияния флюсов Na_3AlF_6 и Na_2TiF_6 на синтез карбида титана в составе системы Al-10%TiC методом / А.Д. Рыбаков, Ю.В. Махонина, А.Р. Луц, А.П. Амосов // С30 Семьдесят первая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 18 апреля 2018 г., Ярославль: сб. материалов конф. В. 3 ч. Ч. 2 [Электронный ресурс]. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2018. С. 493-496.

11. Луц, А.Р. О влиянии легирования расплава алюминия на СВС композиционного сплава Al-10%TiC / А.Р. Луц, А.П. Амосов, Е.И. Латухин, А.Д. Рыбаков, В.А. Новиков, С.И. Шипилов // Синтез и консолидация порошковых материалов: Сборник тезисов Международной конференции (23–26 октября 2018 г., Черногловка). М.: ТОРУС ПРЕСС, 2018. С. 443-449.

12. Шерина, Ю.В. Образование и влияние побочных фаз Al_4C_3 , Al_3Ti на процесс СВС композиционного сплава Al-10%TiC / Ю.В. Шерина, А.Р. Луц, А.Д. Рыбаков // Современные материалы, техника и технологии. 2018. №4 (19). С. 59-64.

13. Рыбаков, А.Д. Выбор методов для расчета термодинамических параметров интерметаллидных соединений на основе алюминия / А.Д. Рыбаков, А.Р. Луц, Д.В. Закамов // Современные материалы, техника и технологии. 2018. №2 (17). С. 106-109.

14. Луц, А.Р. Влияния добавок галоидных солей на in-situ процесс СВС наноструктурного композиционного сплава Al-10%TiC, его структуру и свойства / А.Р. Луц, С.И. Шипилов, А.Д. Рыбаков // Международная конференция «СВС-50», приуроченная к 50-летию юбилею научного открытия «Явление волновой локализации автотормозящихся твердофазных реакций...» 20 – 21 ноября, 2017. Черноголовка, Россия. С. 143-144.

Научное издание

Рыбаков Антон Дмитриевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук на тему:

Применение различных форм углерода для СВС карбида титана в расплаве при
получении дисперсно-армированных алюмоматричных композиционных
материалов

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного диссертационного совета
99.2.039.02 (Д 999.122.02) на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный
исследовательский университет имени С.П. Королева»
(протокол №18 от «15» октября 2021г.)

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.