



На правах рукописи

ШЕРИНА Юлия Владимировна

**ВЛИЯНИЕ АРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ КАРБИДА
ТИТАНА, СИНТЕЗИРОВАННОЙ В РАСПЛАВЕ, И ТЕРМООБРАБОТКИ
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ
СПЛАВОВ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2024

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

Научный руководитель:

Амосов Александр Петрович, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Курганова Юлия Анатольевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Материаловедение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Прусов Евгений Сергеевич, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии функциональных и конструкционных материалов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», Владимирская область, г. Владимир.

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

Защита состоится «4» октября 2024, в 12 час. 00 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. Королёва» 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».

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 «___» _____ 2024 г.

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



А. Р. Луц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. АМКМ, дисперсно армированные тугоплавкими высокодисперсными частицами карбида титана, представляют большой интерес для использования в различных отраслях производства: автомобилестроении, авиастроении и др., что обусловлено высокими прочностью и твердостью этих частиц, а также их хорошей совместимостью с алюминиевой матрицей. Однако в настоящее время в промышленных масштабах производятся фирмами DURALCAN, ALCAN и ALCOA только АМКМ, армированные SiC и Al₂O₃. При этом объемы их промышленного производства малы, а АМКМ, армированные карбидом титана, массово не производятся вовсе. Применение метода СВС учеными СамГТУ позволило достичь значительных успехов в получении композитов системы Al-TiC и определить оптимальное содержание армирующей фазы - 10 масс. % TiC. Также ранее были проведены исследования по легированию матричной основы, в результате которых выявлено, что введение в расплав алюминия элементных порошков меди, марганца, никеля, а также шихты из порошков титана и углерода с добавлением 5% соли Na₂TiF₆ позволяет провести полноценный процесс СВС в расплаве алюминия с получением модельных композиционных материалов, включающих 10 масс.% фазы TiC высокой дисперсности и отличающихся повышенными механическими и эксплуатационными (трибологическими) свойствами.

Анализ современных научных публикаций показал, что в качестве матричной основы для изготовления подобных АМКМ все чаще используется не чистый алюминий, а производимые промышленностью алюминиевые сплавы, в которых в качестве основных легирующих элементов применяются Si, Cu, Mg, Mn, Zn, Fe, Ni, Ti и др. Алюминий и кремний образуют эвтектику Al-11,7%Si, которая служит основой для литейных алюминиевых сплавов (силуминов) и обладает температурой плавления 577°C. В других случаях легирующие элементы создают с алюминием твердые растворы с ограниченной переменной растворимостью и/или вторичные интерметаллические фазы (CuAl₂, CuMgAl₂, MgZn₂, TiAl₃, MnAl₆ и др.), характеризующиеся повышенной твердостью и температурой плавления. Наличие таких интерметаллических соединений способствует упрочнению за счет твердого раствора и дисперсионного твердения, когда понижение температуры вызывает уменьшение растворимости одного из компонентов и из пересыщенного и, следовательно, неравновесного твердого раствора выделяется когерентно большое количество дисперсных частиц вторичной фазы, эффективно препятствующих движению дислокаций и повышающих прочность сплава. Дисперсионное упрочнение достигается путем термической обработки алюминиевых сплавов, включающей закалку на пересыщенный твердый раствор с последующим искусственным или естественным старением. Однако механизм дисперсионного твердения не позволяет достичь высокого объемного содержания вторичных фаз из-за ограниченной переменной растворимости, что ограничивает

возможности существенного повышения твердости и прочности сплава. Тогда как формирование большого количества дополнительной высокодисперсной твердой фазы карбида титана в составе промышленных сплавов реализуемо и открывает возможности для значительного улучшения их характеристик. Помимо этого, проведение последующей термической обработки для полученных АМКМ создает возможности для дополнительного их улучшения. Эти результаты, наряду с использованием недорогих исходных реагентов, простотой исполнения, малой длительностью и энергосбережением процесса СВС открывают большие перспективы для качественного повышения свойств композитов. Однако закономерности протекания структурных и фазовых превращений, а также температурно-временные параметры термической обработки АМКМ на основе промышленных алюминиевых сплавов, дисперсно армированных фазой карбида титана, пока не изучены, что определяет актуальность данной темы.

Основная цель работы: разработка новых легких композиционных материалов с повышенными трибологическими свойствами (малым коэффициентом трения и высокой износостойкостью) на основе промышленных алюминиевых сплавов, дисперсно армированных фазой карбида титана методом СВС в расплаве и последующей термической обработки, для обеспечения надежности и долговечности деталей из них.

Для достижения данной цели в диссертационной работе решались следующие **основные задачи:**

1) Выбор промышленных алюминиевых сплавов для синтеза АМКМ с применением метода СВС, а также подбор оптимальных режимов термической обработки для улучшения свойств этих сплавов.

2) Проведение термодинамического анализа возможности синтеза композиционных материалов систем АМг2-10%TiC, АМг6-10%TiC, АМ4,5Кд-10%TiC и АК10М2Н-10%TiC.

3) Получение методом СВС композиционных материалов АМг2-10%TiC, АМг6-10%TiC, АМ4,5Кд-10%TiC и АК10М2Н-10%TiC.

4) Термическая обработка синтезированных АМКМ, исследование структуры и фазового состава композиционных материалов АМг2-10%TiC, АМг6-10%TiC, АМ4,5Кд-10%TiC и АК10М2Н-10%TiC до и после термической обработки.

5) Исследование физических, химических, механических, эксплуатационных и технологических свойств композиционных материалов АМг2-10%TiC, АМг6-10%TiC, АМ4,5Кд-10%TiC и АК10М2Н-10%TiC до и после термической обработки.

Научная новизна:

1) Впервые выполнен термодинамический анализ протекания реакции синтеза карбида титана $Ti+C=TiC$ в расплавах промышленных сплавов АМг2, АМг6, АМ4,5Кд, АК10М2Н, определены адиабатические температуры и состав продуктов реакции.

2) Установлены параметры проведения процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза фазы карбида титана с формированием частиц высокой

дисперсности размером от 130 нм до 2 мкм и обеспечением образования равноосной мелкозернистой структуры затвердевших слитков композиционных материалов АМг2-10%ТiС, АМг6-10%ТiС, АМ4,5Кд-10%ТiС и АК10М2Н-10%ТiС. Впервые определено количественное содержание карбида титана в объеме матрицы и доказана возможность его получения методом СВС в расплавах промышленных сплавов АМг2, АМг6, АМ4,5Кд, АК10М2Н с концентрацией 9-10 масс.%.

3) Впервые изучено влияние термической обработки на структуру и свойства синтезированных композиционных материалов, по результатам которой показано, что наличие высокодисперсных частиц карбидной фазы способствует выделению дополнительных интерметаллических фаз и изменению свойств. При нагреве композиционных материалов на основах АМг2 и АМг6 происходит выделение β -фазы (Al_3Mg_2). При термической обработке по режимам Т6 (закалка + искусственное старение) на основе АМ4,5Кд выделяется θ -фаза (Al_2Cu), а на основе АК10М2Н выделяются две фазы: Al_2Cu и Al_3Ni , что приводит к повышению характеристик твердости, микротвердости и износостойкости. Установлены оптимальные режимы термической обработки для композиционных материалов АМг2-10%ТiС, АМг6-10%ТiС, АМ4,5Кд-10%ТiС и АК10М2Н-10%ТiС.

4) Представлены результаты комплексного исследования свойств синтезированных и термообработанных композиционных материалов АМг2-10%ТiС, АМг6-10%ТiС, АМ4,5Кд-10%ТiС и АК10М2Н-10%ТiС, показывающие, что их можно рекомендовать в качестве легких износостойких материалов, перспективных для триботехнического применения.

Практическая значимость:

1) Разработаны практические рекомендации для синтеза высокодисперсной фазы карбида титана (от 130 нм до 2 мкм) в количестве 9-10 масс.% методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) в составе промышленных алюминиевых сплавов АМг2, АМг6, АМ4,5Кд и АК10М2Н с формированием равноосной мелкозернистой структуры.

2) Определены оптимальные режимы термической обработки для полученных методом СВС композиционных материалов АМг2-10%ТiС, АМг6-10%ТiС, АМ4,5Кд-10%ТiС и АК10М2Н-10%ТiС, применение которых обеспечивает заданный фазовый состав и требуемые свойства.

3) Согласно полученным актам практического использования результатов диссертации, композиционные материалы АМг2-10%ТiС, АМг6-10%ТiС, АМ4,5Кд-10%ТiС и АК10М2Н-10%ТiС после термической обработки рекомендованы для изготовления износостойких деталей узлов трения и автомобильных двигателей, а также в качестве легких конструкционных материалов для изготовления деталей нефтепромыслового оборудования с облегченным весом.

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

Объект исследования: композиционные материалы систем АМг2-10%TiC, АМг6-10%TiC, АМ4,5Кд-10%TiC и АК10М2Н-10%TiC.

Предмет исследования: физико-химические процессы СВС в расплаве различных промышленных алюминиевых сплавов; процесс термической обработки композитов на основе промышленных алюминиевых сплавов; состав, структура и свойства образцов синтезированных и термообработанных композитов.

Положения, выносимые на защиту:

1) Результаты термодинамического анализа протекания реакции синтеза карбида титана $Ti+C=TiC$ в расплавах промышленных алюминиевых сплавов АМг2, АМг6, АМ4,5Кд, АК10М2Н.

2) Параметры проведения процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза фазы карбида титана с формированием частиц высокой дисперсности в концентрации 9-10 масс.% в расплаве промышленных сплавов АМг2, АМг6, АМ4,5Кд, АК10М2Н.

3) Особенности структурно-фазовых превращений при термической обработке синтезированных композиционных материалов АМг2-10%TiC, АМг6-10%TiC, АМ4,5Кд-10%TiC и АК10М2Н-10%TiC, оптимальные режимы термической обработки.

4) Результаты комплексного исследования свойств синтезированных и термообработанных композиционных материалов АМг2-10%TiC, АМг6-10%TiC, АМ4,5Кд-10%TiC и АК10М2Н-10%TiC, определение возможных областей их применения.

Степень достоверности и апробация полученных результатов. Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается использованием современного оборудования и аттестованных методик исследований, значительным количеством экспериментальных данных и применением статистических методов обработки результатов, сопоставлением полученных результатов с результатами других авторов. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием (Ярославль, 2018); Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Высокие технологии в машиностроении» (Самара, 2018, 2021, 2022, 2023, 2024); Всероссийская школа-семинар по структурной макрокинетике для молодых ученых имени академика А.Г. Мержанова с международным участием (Черноголовка, 2019); Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием «Королёвские чтения» (Самара, 2019, 2023); Всероссийская научно-практическая конференция посвященная 65-летию ЛГТУ «Современные проблемы материаловедения» (Липецк, 2021); Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» (Минск, 2021); Международная научно-практическая конференция

«Перспективные материалы науки, технологий и производства» (Курск, 2022); Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов», посвященная памяти академика А.А. Байкова (Курск, 2022); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (Пермь, 2022, 2023); Международная молодёжная научная конференция «Гуполевские чтения» (Казань, 2023); Международная школа «Физическое материаловедение» (Тольятти, 2023); Всероссийская научно-техническая конференция «Перспективные материалы и технологии в авиадвигателестроении» (Самара, 2023).

Личный вклад автора в диссертационную работу. Автор участвовал в постановке цели и задач, разработке методологии исследования, интерпретации результатов и формулировке всех основных положений, определяющих научную новизну и практическую значимость работы, подготовке научных публикаций и представлении результатов работы на конференциях. Основные экспериментальные результаты получены лично автором или при его непосредственном участии. Часть экспериментов автор выполнил в творческих коллективах, что отражено в составе авторов опубликованных работ.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 13 работах, включая 11 статей в ведущих периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ для защиты диссертаций по специальности 2.6.17. Материаловедение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов, списка использованных источников из 127 наименований и четырех приложений. Материалы изложены на 207 страницах машинописного текста, содержат 115 иллюстраций 62 таблицы и 29 формул.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится обоснование актуальности диссертационной работы, цель и задачи исследований, обоснование новизны и практической значимости работы.

В первой главе приведен аналитический обзор научно-технической литературы, связанный с информацией о видах алюмоматричных композиционных материалов (АМКМ). Обсуждаются наиболее распространенные и перспективные методы получения АМКМ. Подробно рассмотрены виды термической обработки, применяемые для алюминиевых сплавов и композиционных материалов, полученных на их основах. Приведены общие сведения о наиболее перспективных областях применения дисперсно армированных композитов на основе промышленных алюминиевых сплавов. Раздел заканчивается выбором наиболее перспективных алюминиевых сплавов для синтеза армирующей фазы карбида титана методом СВС в расплаве, формулировкой цели и задач для проведения настоящего диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена описанию исходных компонентов, методик, приборов и оборудования, применяемых в данном исследовании. Описаны химические составы выбранных

для проведения диссертационного исследования алюминиевых промышленных сплавов марок АМг2, АМг6, АМ4,5Кд и АК10М2Н, а также характеристики шихтовых компонентов (порошок титана ТПП-7, углерод технический П-701, галоидная соль Na_2TiF_6). Показана методика получения композиционных материалов АМг2-10%TiС, АМг6-10%TiС, АМ4,5Кд-10%TiС и АК10М2Н-10%TiС методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) в расплаве. Представлено используемое оборудование, применяемое для проведения термической обработки образцов. Представлены основы проведения термодинамического анализа, а также используемое оборудование и методы для определения структурно-фазового состава синтезируемых материалов. Описаны методики и применяемое оборудование для определения физических (плотность, пористость, электропроводность, коэффициента термического линейного расширения), химических (коррозионная стойкость), механических (твердость, микротвердость, напряжение течения, логарифмическая деформация, предел прочности, относительное удлинение), технологических (жидкотекучесть, линейная усадка, степень деформации, коэффициент уковки, свариваемость) и эксплуатационных (скорость износа, коэффициент трения, температура саморазогрева, задиристость, кратковременная жаропрочность) свойств.

Третья глава посвящена синтезу, термической обработке и свойствам композиционного материала АМг2-10%TiС. Представлены результаты термодинамического анализа возможности синтеза карбида титана методом СВС в расплаве промышленного алюминиевого сплава АМг2. Установлено, что рекомендуемая температура расплава 900 °С обеспечивает полноту образования карбида титана, а также необходимую для гарантированного обеспечения смачивания, а, следовательно, усвоения армирующих частиц расплавом, адиабатическую температуру не менее 1160 °С, а также отсутствие охрупчивающих фаз карбида алюминия и алюминида титана. Следует отметить, что аналогичные результаты получены на всех синтезируемых АМКМ.

Структурно-фазовый анализ после синтеза подтверждает наличие керамической фазы TiС в составе сплава АМг2 (рисунок 1, а) размером от 180 нм, а количественная обработка дифрактограммы показывает ее присутствие в количестве 9 масс.% (рисунок 1, б).

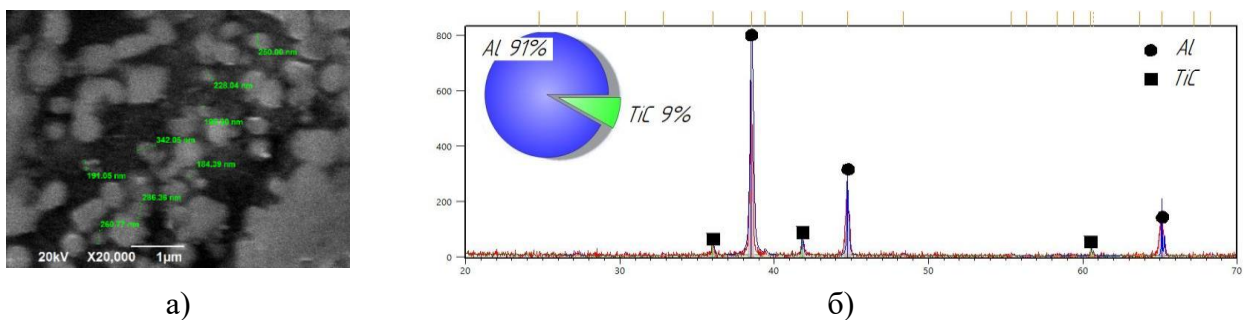


Рисунок 1 – Структурно-фазовый анализ композиционного материала АМг2-10%TiС: а) микроструктура; б) РФА

Экспериментальные данные по влиянию термической обработки на структуру и свойства показали, что оптимальным режимом для КМ АМг2-10%ТiС является нагрев при $T=150^{\circ}\text{C}$ с выдержкой в течение 3 часов и охлаждением на спокойном воздухе. После проведения термообработки размер частиц карбидной фазы и ее распределение остаются на прежнем уровне (рисунок 2, а), однако, следует отметить повышение уровня твердости с 59,4 до 67,6 НВ, что связано с выделением интерметаллической β -фазы состава Al_3Mg_2 в количестве 3 масс.% и подтверждается результатами рентгенофазового анализа (рисунок 2, б).

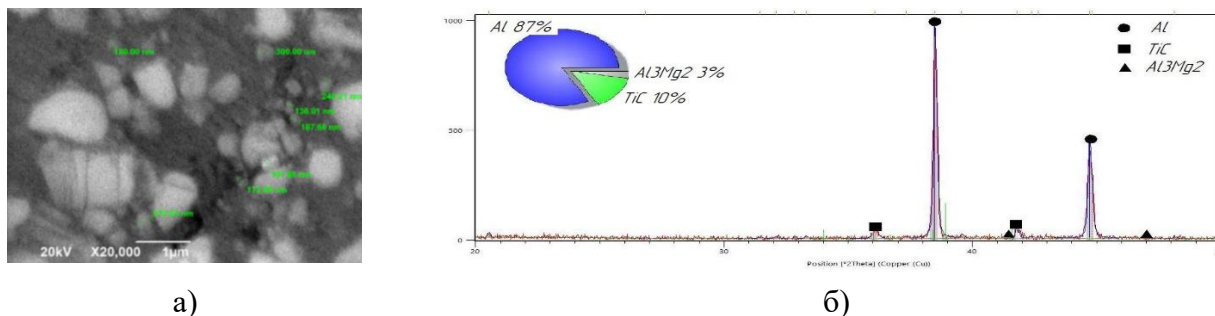


Рисунок 2 – Структурно-фазовый анализ композиционного материала АМг2-10%ТiС после дополнительного нагрева при $T=150^{\circ}\text{C}$ в течение 3 ч: а) микроструктура; б) РФА

По результатам экспериментальных исследований физических свойств выявлено, что плотность композиционного материала после термической обработки несколько выше плотности матричного сплава, что связано с наличием армирующей фазы TiC с плотностью $4,92 \text{ г/см}^3$, и составляет $2,83 \text{ г/см}^3$. Из сравнения теоретической и экспериментальной плотностей АМКМ следует, что в литых образцах после СВС пористость не превышает 1%, а после термической обработки снижается до 0%, что связано с улучшением адгезионной связи матрицы и наполнителя в результате нагрева.

При оценке уровня коррозионной стойкости глубинный показатель коррозии на всех образцах не превышает $0,003 \text{ мм/год}$, что позволяет отнести материалы к группе весьма стойких к коррозии.

Таблица 1. Механические свойства сплава АМг2 и композиционного материала АМг2-10%ТiС

Характеристики	АМг2	АМг2-10%ТiС	АМг2-10%ТiС, нагрев 150°C 3 ч.
Твердость, НВ	59,4	59,4	67,6
Микротвердость, НV, МПа	610	740	750
Напряжение течения, МПа	290	271	298
Относительная деформация, %	69,2	59,7	61,5

По результатам испытаний на определение твердости и микротвердости (таблица 1) выявлено, что проведение термической обработки способствует повышению данных

характеристик на 12 и 18%, соответственно, что связано с наличием карбида титана и интерметаллической β -фазы состава Al_3Mg_2 . Также показано, что проведение термообработки не только способствует повышению уровня твердости и микротвердости, но и сохранению уровня прочности в условиях сжимающих нагрузок с небольшим падением уровня пластичности (таблица 1, рисунок 3). Следует отметить, что за максимальные значения напряжения сжатия всех образцов принят момент появления первых трещин, однако несущая способность материала сохраняется.

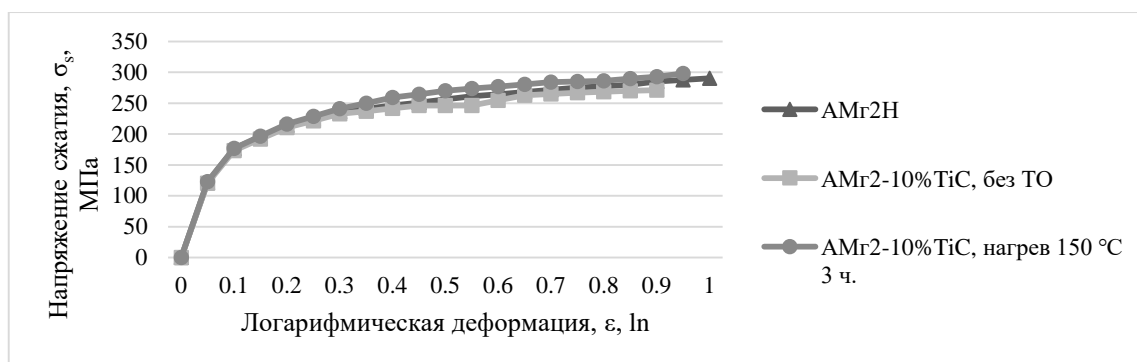


Рисунок 3 – Экспериментальная диаграмма одноосного сжатия

В качестве технологической характеристики КМ АМг2-10%ТiС в рамках данного диссертационного исследования была произведена оценка свариваемости методом аргодуговой сварки (АРДС). Результаты исследований показали наличие армирующей фазы во всех зонах сварного соединения, отсутствие скрытых дефектов, а также сохранение уровня механических свойств (твердость, прочность при сжатии) на уровне литого композиционного материала.

Так как большинство АМКМ обладают хорошими трибологическими свойствами, то в качестве эксплуатационных характеристик были оценены скорость износа и коэффициент трения. Армирование матричного сплава АМг2 высокодисперсными частицами ТiС в комплексе с термической обработкой приводит к значительному снижению скорости износа – до 9 раз, а также снижению коэффициента трения – до 4 раз (таблица 2).

Таблица 2. Трибологические свойства сплава АМг2 и композиционного материала АМг2-10%ТiС

Характеристики	АМг2	АМг2-10%ТiС	АМг2-10%ТiС, нагрев 150°С 3 ч.
Скорость изнашивания, мкм/час	37,6	6,4	4,0
Коэффициент трения	0,3	0,11	0,07

В четвертой главе показаны результаты исследований по синтезу, термической обработке и свойствам композита АМг6-10%ТiС.

Структурно-фазовый анализ после синтеза подтверждает наличие керамической фазы TiC в составе сплава АМг6 (рисунок 4, а) размером от 130 нм, а количественная обработка дифрактограммы показывает ее присутствие в количестве 10 масс.% (рисунок 4, б).

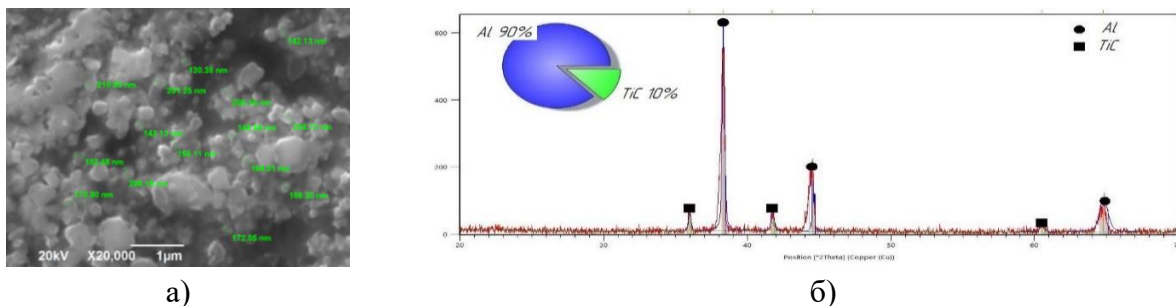


Рисунок 4 – Структурно-фазовый анализ композиционного материала АМг6-10%TiC: а) микроструктура; б) РФА

Результаты эксперимента по влиянию термообработки на структуру и свойства показали, что оптимальным режимом для КМ АМг6-10%TiC является нагрев при $T=230^{\circ}\text{C}$ с выдержкой в течение 3 часов и охлаждением на спокойном воздухе. После проведения термообработки размер частиц карбидной фазы и ее распределение остаются на прежнем уровне (рисунок 5, а), однако, следует отметить повышение уровня твердости с 90,9 до 99,9 НВ, что связано с выделением интерметаллической β -фазы состава Al_3Mg_2 в количестве 6 масс.% и подтверждается результатами РФА (рисунок 5, б).

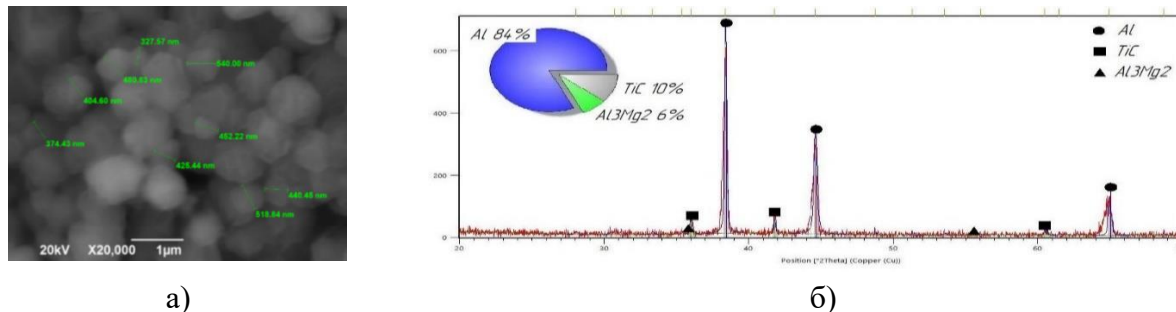


Рисунок 5 – Структурно-фазовый анализ композиционного материала АМг6-10%TiC после дополнительного нагрева при $T=230^{\circ}\text{C}$ в течение 3 ч: а) микроструктура; б) РФА

По результатам экспериментальных исследований физических свойств выявлено, что плотность композиционного материала после термической обработки несколько выше плотности матричного сплава и составляет $2,77 \text{ г/см}^3$, а уровень пористости близок к 0.

При оценке уровня коррозионной стойкости глубинный показатель коррозии на всех образцах не превышает $0,003 \text{ мм/год}$, что позволяет отнести материалы к группе весьма стойких к коррозии.

По результатам испытаний на определение твердости и микротвердости (таблица 3) выявлено, что проведение термообработки способствует повышению данных характеристик на 20 и 8%, соответственно, что связано с наличием карбида титана и интерметаллической β -фазы

состава Al_3Mg_2 . Следует отметить большой прирост твердости по сравнению с системой $AMg_2-10\%TiC$, что связано с большим количеством интерметаллической β -фазы (6% вместо 3%). Дальнейшее исследование механических характеристик показало, что проведение термообработки оказывает несколько негативное влияние на прочностные характеристики и пластичность композиционного материала (таблица 3, рисунок 6).

Таблица 3. Механические свойства сплава AMg_6 и композиционного материала $AMg_6-10\%TiC$

Характеристики	AMg_6	$AMg_6-10\%TiC$	$AMg_6-10\%TiC$, нагрев $230^\circ C$ 3 ч.
Твердость, НВ	83,0	90,9	99,9
Микротвердость, НV, МПа	990	1020	1070
Напряжение течения, МПа	449	403	395
Относительная деформация, %	32	19	14



Рисунок 6 – Экспериментальная диаграмма одноосного сжатия

В качестве технологической характеристики композиционного материала $AMg_6-10\%TiC$ была произведена оценка свариваемости методом АРДС. Результаты исследований показали наличие армирующей фазы во всех зонах сварного соединения, однако, на образцах композиционного материала отмечается присутствие таких скрытых дефектов, как поры и непровары, что оказывает негативное влияние на механические свойства (твердость, прочность при сжатии).

В заключении было произведено исследование трибологических характеристик. Армирование матричного сплава AMg_6 высокодисперсными частицами TiC в комплексе с термической обработкой приводит к значительному снижению скорости износа – до 4 раз, а также снижения коэффициента трения – до 2 раз (таблица 4).

Таблица 4. Трибологические свойства сплава АМг6 и композиционного материала АМг6-10%TiC

Характеристики	АМг6	АМг6-10%TiC	АМг6-10%TiC, нагрев 230°C 3 ч.
Скорость изнашивания, мкм/час	15,5	3,5	4,2
Коэффициент трения	0,15	0,07	0,08

Пятая глава посвящена синтезу, термической обработке и свойствам композита АМ4,5Кд-10%TiC.

Структурно-фазовый анализ после синтеза подтверждает наличие керамической фазы TiC в составе сплава АМ4,5Кд (рисунок 7, а) размером от 100 нм, а количественная обработка дифрактограммы показывает ее присутствие в количестве 9 масс.% (рисунок 7, б).

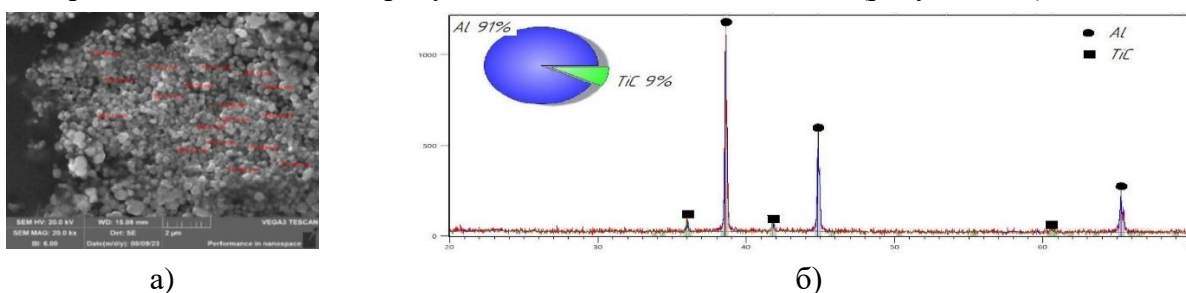


Рисунок 7 – Структурно-фазовый анализ композиционного материала АМ4,5Кд-10%TiC: а) микроструктура; б) РФА

Результаты эксперимента по влиянию термической обработки на структуру и свойства показали, что оптимальным режимом для АМКМ АМ4,5Кд-10%TiC является нагрев под закалку при $T=545^{\circ}\text{C}$ с выдержкой в течение 1 часа и последующим охлаждением в холодную воду в комплексе с искусственным старением при $T=170^{\circ}\text{C}$ с выдержкой в течение 4 часов, что несколько меньше, чем для достижения максимальной твердости матричного сплава (6 часов). После проведения термообработки размер частиц карбидной фазы и ее распределение остаются на прежнем уровне (рисунок 8, а), однако, следует отметить повышение уровня твердости со 136 до 142 НВ, что связано с выделением интерметаллической θ -фазы состава Al_2Cu и подтверждается РФА (рисунок 8, б).

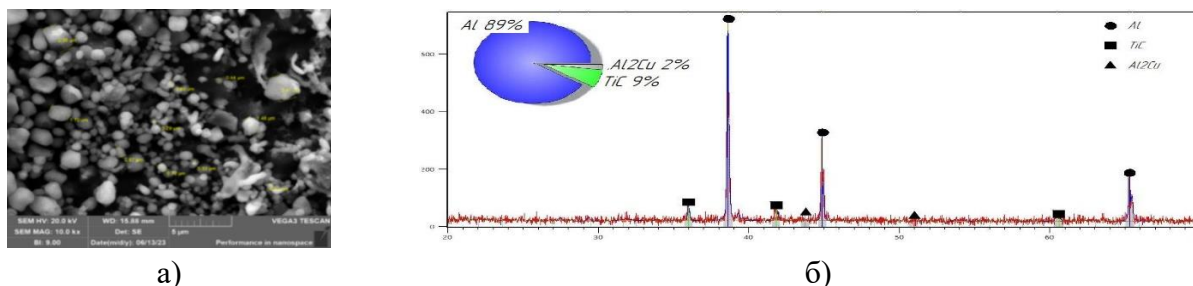


Рисунок 8 – Структурно-фазовый анализ композиционного материала АМ4,5Кд-10%TiC после закалки в холодную воду с $T=545^{\circ}\text{C}$ 1 ч. и последующего старения при $T=170^{\circ}\text{C}$ 4 ч.: а) микроструктура; б) РФА

По результатам экспериментальных исследований физических свойств выявлено, что плотность композиционного материала после термической обработки несколько выше плотности матричного сплава и составляет $2,93 \text{ г/см}^3$, уровень пористости составляет 0%, а температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) остается на уровне матричного сплава и составляет $30,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

Наличие в составе кадмия способствует повышению уровня коррозионной стойкости, таким образом глубинный показатель коррозии на всех образцах не превысил 0,003 мм/год, что позволило отнести материалы к группе весьма стойких к коррозии.

По результатам испытаний на определение твердости и микротвердости (таблица 5) выявлено, что проведение термической обработки способствует повышению данных характеристик на 4 и 5%, соответственно, что, очевидно, связано с наличием карбида титана и интерметаллической θ -фазы состава Al_2Cu в количестве 2 масс.%. Также показано, что проведение термообработки способствует повышению прочности при сжатии на 7% с некоторым падением уровня пластичности композиционного материала (таблица 5, рисунок 9).

Таблица 5. Механические свойства сплава AM4,5Кд и композиционного материала AM4,5Кд-10%TiC

Характеристики	AM4,5Кд	AM4,5Кд, закалка 545°C 1 ч. + старение 170°C 6 ч.	AM4,5Кд-10%TiC	AM4,5Кд-10%TiC, закалка 545°C 1 ч. + старение 170°C 4 ч.
Твердость, НВ	61,3	136	76,1	142
Микротвердость, НV, МПа	600	1320	1010	1390
Напряжение течения, МПа	324	532	355	568
Относительная деформация, %	65	50	62	32



Рисунок 9 – Экспериментальная диаграмма одноосного сжатия

Результаты исследования технологических свойств в пробах по высоте залитого столба показали сохранение жидкотекучести (390 мм) композиционного материала AM4,5Кд-10%TiC на уровне матричного сплава (400 мм), с некоторым падением линейной усадки с 1,31 до 0,99 % и повышением стойкости к образованию трещин при кристаллизации, что связано с наличием TiC.

В заключении было произведено исследование эксплуатационных характеристик. Армирование матричного сплава AM4,5Кд высокодисперсными частицами TiC в комплексе с термической обработкой приводит к значительному снижению скорости износа – до 3 раз, падению коэффициента трения – до 3 раз, увеличению задиростойкости – до 2 раз (таблица 6) с сохранением уровня кратковременной жаропрочности (рисунок 10).

Таблица 6. Трибологические свойства сплава AM4,5Кд и композиционного материала AM4,5Кд-10%TiC

Характеристики	AM4,5Кд	AM4,5Кд, закалка 545°C 1 ч. + старение 170°C 6 ч.	AM4,5Кд-10%TiC	AM4,5Кд-10%TiC, закалка 545°C 1 ч. + старение 170°C 4 ч.
Скорость изнашивания, мкм/час	11,5	3	5,35	1,25
Коэффициент трения	0,12	0,08	0,08	0,03
Максимальная нагрузка без схватывания, Н	400	700	400	1300

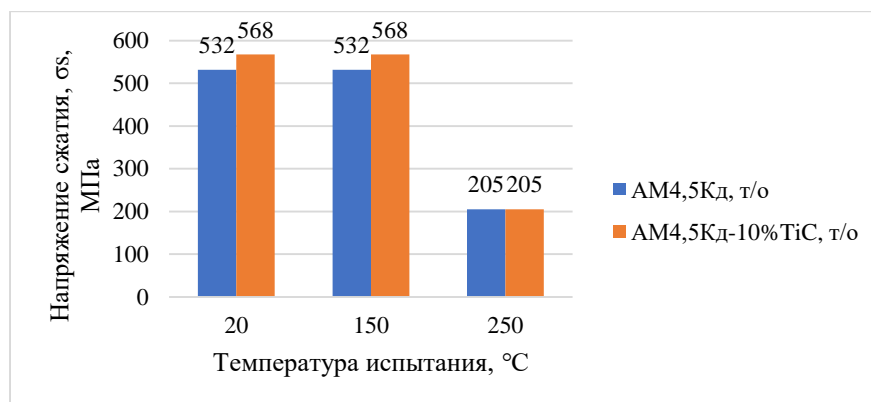


Рисунок 10 – Пределы прочности при сжатии для разных температур у литого сплава AM4,5Кд и композиционного материала AM4,5Кд-10%TiC после проведения оптимального режима термической обработки

В шестой главе показаны результаты синтеза, термической обработки и свойств композита AMK10M2H-10%TiC.

Структурно-фазовый анализ после синтеза подтверждает наличие керамической фазы TiC в составе сплава АК10М2Н (рисунок 11, а) размером от 180 нм, а количественная обработка дифрактограммы показывает ее присутствие в количестве 9 масс.% (рисунок 11, б).

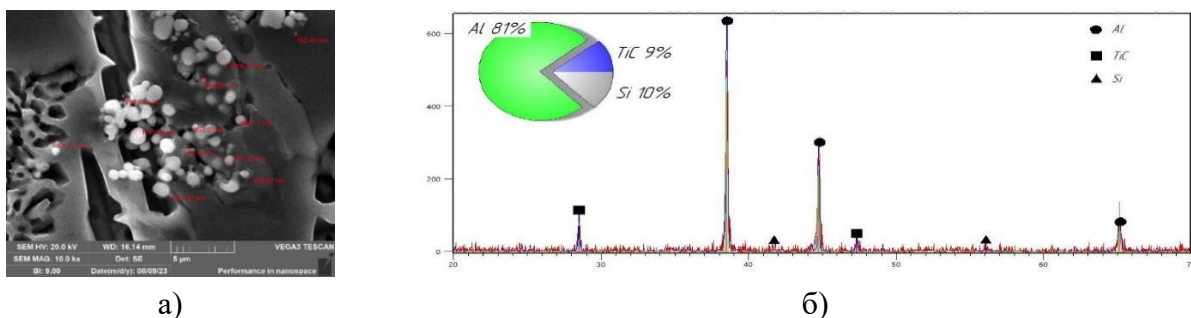


Рисунок 11 – Структурно-фазовый анализ композиционного материала АК10М2Н-10%TiC: а) микроструктура; б) РФА

Результаты эксперимента по влиянию термической обработки на структуру и свойства показали, что оптимальным режимом для композиционного материала АК10М2Н-10%TiC является нагрев под закалку при $T=515^{\circ}\text{C}$ с выдержкой в течение 1 часа и последующим охлаждением в холодную воду в комплексе с искусственным старением при $T=190^{\circ}\text{C}$ с выдержкой в течение 2 часов. Для достижения максимальной твердости матричного сплава требуется более длительная выдержка при температуре под закалку – 2 часа. После проведения термообработки размер частиц карбидной фазы и ее распределение остаются на прежнем уровне (рисунок 12, а), однако, следует отметить повышение уровня твердости со 152 до 172 НВ, что связано с выделением интерметаллических фаз состава Al_3Ni и Al_2Cu в количестве 1 и 2 масс.%, соответственно, и подтверждается результатами рентгенофазового анализа (рисунок 12, б).

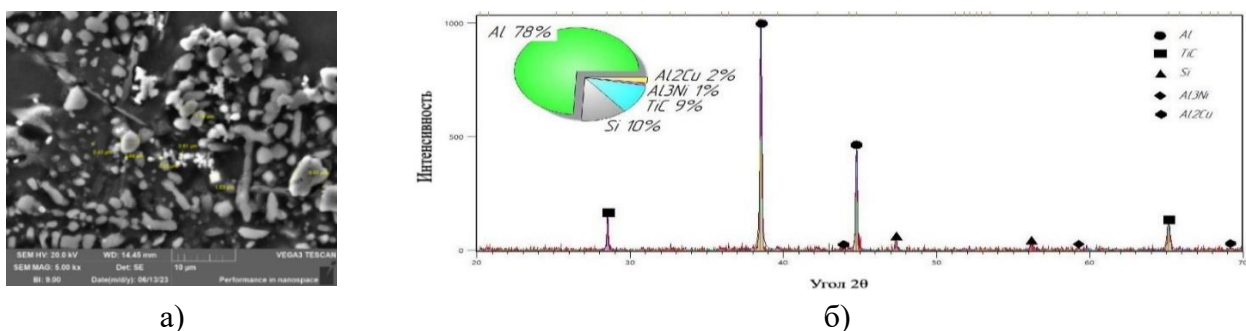


Рисунок 12 – Структурно-фазовый анализ композиционного материала АК10М2Н-10%TiC после закалки в холодную воду с $T=545^{\circ}\text{C}$ 1 ч. и последующего старения при $T=170^{\circ}\text{C}$ 4 ч.: а) микроструктура; б) РФА

По результатам экспериментальных исследований физических свойств выявлено, что плотность композиционного материала после термической обработки несколько выше плотности матричного сплава и составляет $2,84 \text{ г/см}^3$, уровень пористости составляет 0%, а ТКЛР остается на уровне матричного сплава и составляет $26,1 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

По результатам испытаний на определение твердости и микротвердости (таблица 7) выявлено, что проведение термической обработки способствует повышению данных характеристик на 13 и 31%, соответственно, что, очевидно, связано с наличием карбида титана и интерметаллических фаз состава Al_3Ni и Al_2Cu . Также показано, что проведение термообработки также способствует повышению прочности при сжатии на 5% с некоторым падением уровня пластичности композиционного материала (таблица 7, рисунок 13).

Таблица 7. Механические свойства сплава АК10М2Н и композиционного материала АК10М2Н-10%TiC

Характеристики	АК10М2Н	АК10М2Н, закалка 515°C 2 ч. + старение 190°C 2 ч.	АК10М2Н- 10%TiC	АК10М2Н- 10%TiC, закалка 515°C 1 ч. + старение 190°C 2 ч.
Твердость, НВ	110	152	122	171
Микротвердость, HV, МПа	1140	1360	1500	1780
Напряжение течения, МПа	464	558	447	587
Относительная деформация, %	24	23	22	20



Рисунок 13 – Экспериментальная диаграмма одноосного сжатия

Оценка технологических свойств показала сохранение жидкотекучести (400 мм) композиционного материала АК10М2Н-10%TiC на уровне матричного сплава, с некоторым падением линейной усадки с 0,6 до 0,59% и повышением стойкости к образованию трещин при кристаллизации.

В заключении было произведено исследование эксплуатационных характеристик. Армирование матричного сплава АК10М2Н высокодисперсными частицами TiC в комплексе с термической обработкой приводит к значительному снижению скорости износа – до 17 раз,

падению коэффициента трения – до 4 раз, более стабильной работе в условиях повышенных истирающих нагрузок (таблица 8) с сохранением уровня кратковременной жаропрочности (рисунок 14).

Таблица 8. Трибологические свойства сплава АК10М2Н и композиционного материала АК10М2Н-10%TiC

Характеристики	АК10М2Н	АК10М2Н, закалка 515°С 2 ч. + старение 190°С 2 ч.	АК10М2Н-10%TiC	АК10М2Н-10%TiC, закалка 515°С 1 ч. + старение 190°С 2 ч.
Скорость изнашивания, мкм/час	22,25	4,25	0,5	0,25
Коэффициент трения	0,57	0,12	0,09	0,03
Максимальная нагрузка без схватывания, Н	400	1000	400	1200

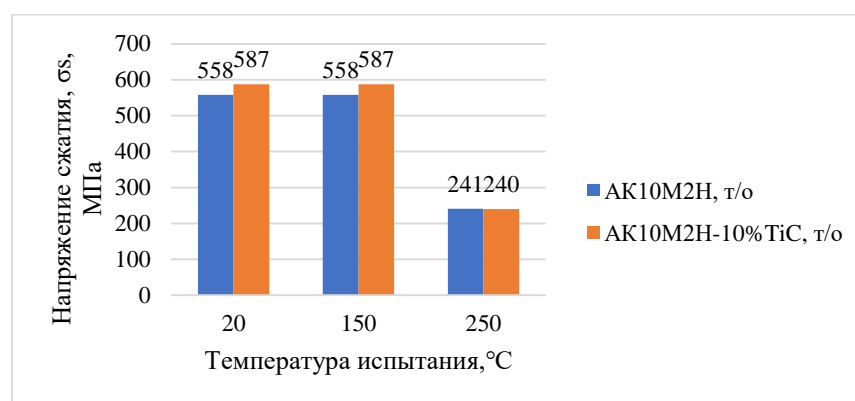


Рисунок 14 – Пределы прочности при сжатии для разных температур у литого сплава АК10М2Н и композиционного материала АК10М2Н-10%TiC после проведения оптимального режима термической обработки

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1) Установлены термодинамические параметры (адиабатическая температура, количество и фазовый состав образующихся продуктов горения в зависимости от начальной температуры расплава) протекания реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) 10 масс.% армирующей фазы карбида титана TiC из элементных порошков титана и углерода, взятых в стехиометрическом соотношении с добавлением 5% флюса Na₂TiF₆, в расплавах промышленных сплавов АМг2, АМг6, АМ4,5Кд, АК10М2Н. Более высокая адиабатическая температура процесса СВС по сравнению с расплавами чистого алюминия и модельных алюминиевых сплавов обусловлена более сложным составом промышленных сплавов и вкладом попутных химических превращений легирующих элементов, а также увеличенным содержанием флюса Na₂TiF₆ (5% вместо 2%). По результатам термодинамических исследований для всех

рассмотренных промышленных сплавов рекомендована начальная температура расплава 900°C, при которой за счет тепловыделения химических реакций достигается адиабатическая температура около 1200°C, необходимая для обеспечения смачиваемости и усвоения керамической фазы расплавом, происходит полное формирование целевой фазы карбида титана и не образуются охрупчивающие фазы карбида алюминия и алюминиды титана.

2) Экспериментально подтверждена целесообразность проведения процесса СВС в расплаве исследуемых промышленных алюминиевых сплавов с начальной температурой расплава 900°C с формированием армирующих частиц карбида титана высокой дисперсности размером от 130 нм до 2 мкм в количестве 9-10% в составе матричных сплавов, что подтверждено в диссертационной работе двумя методами (количественный РФА; обработка микроструктур при помощи программы Micro-S Polar), с образованием равноосной мелкозернистой структуры синтезируемых композитов АМг2-10%ТiС, АМг6-10%ТiС, АМ4,5Кд-10%ТiС и АК10М2Н-10%ТiС, приводящей к увеличению твердости на 17 и 10% нетермоупрочняемых сплавов АМг2 и АМг6 соответственно, и на 24 и 11% термоупрочняемых сплавов АМ4,5Кд и АК10М2Н соответственно, только за счет армирования без термической обработки.

3) Подобраны оптимальные режимы последующей термической обработки полученных композиционных материалов АМг2-10%ТiС, АМг6-10%ТiС, АМ4,5Кд-10%ТiС и АК10М2Н-10%ТiС, приводящие к дальнейшему повышению твердости и трибологических свойств, и установлены причины такого повышения свойств. Показано, что проведение термической обработки в виде нагрева до температуры 150°C и 230°C с выдержкой в печи в течение 3 часов и охлаждением на воздухе композиционных материалов АМг2-10%ТiС и АМг6-10%ТiС, синтезированных на основе матриц нетермоупрочняемых магналиев АМг2 и АМг6, способствует выделению дополнительного количества интерметаллической β-фазы Al_3Mg_2 3 и 6% соответственно. Проведение термической обработки в виде операций закалки и искусственного старения по режиму Т6 композиционных материалов АМ4,5Кд-10%ТiС и АК10М2Н-10%ТiС на основе матриц термоупрочняемых сплавов АМ4,5Кд и АК10М2Н приводит к выделению фаз: 2-3% Al_2Cu и 2% Al_2Cu , 1% Al_3Ni соответственно. Во всех композиционных материалах присутствие 9-10% высокодисперсной фазы ТiС способствует сокращению длительности требуемой термической обработки по сравнению с матричными сплавами в связи с ускорением фазовых превращений, что связано с повышением уровня внутренних напряжений и плотности дислокаций в композитах.

4) Проведение армирования высокодисперсной фазой карбида титана, синтезированной в расплаве, в комплексе с последующей термической обработкой исследованных промышленных сплавов позволило получить новые композиционные материалы, характеристики прочности и пластичности при растяжении которых уменьшились по сравнению с аналогичными характеристиками матричных промышленных сплавов из-за наличия большого количества

керамической армирующей фазы (9-10% TiC), однако характеристики твердости, а вместе с ней и трибологические свойства существенно улучшились:

- AMg2-10%TiC: прочность на сжатие, деформируемость, свариваемость и коррозионная стойкость сохранились на уровне матричного сплава в нагартованном состоянии, но при этом повысилась твердость на 14 %, снизился коэффициент трения не менее, чем в 4 раза, скорость износа – не менее, чем в 9 раз;

- AMg6-10%TiC: деформируемость и уровень коррозионной стойкости сохранились на уровне матричного сплава в нагартованном состоянии, с некоторым падением прочности при сжатии и свариваемости, но при этом повысилась твердость на 20 %, снизился коэффициент трения не менее, чем в 2 раза, скорость износа – не менее, чем в 4 раза;

- AM4,5Kд-10%TiC: характеристики жидкотекучести, кратковременной жаропрочности, коэффициента термического расширения и коррозионной стойкости сохранились на уровне матричного сплава в термообработанном состоянии, но при этом повысилась прочность на сжатие на 7 %, твердость на 4 %, снизился коэффициент трения не менее, чем в 3 раза, скорость износа – не менее, чем в 3 раза;

- АК10М2Н-10%TiC: характеристики жидкотекучести, кратковременной жаропрочности, коэффициента термического расширения сохранились на уровне матричного сплава в термообработанном состоянии, с незначительным падением коррозионной стойкости, но при этом повысилась прочность на сжатие на 5 %, твердость на 14 %, снизился коэффициент трения не менее, чем в 4 раза, а скорость износа – не менее, чем в 17 раз.

5) Разработанные новые композиционные материалы AMg2-10%TiC, AMg6-10%TiC, AM4,5Kд-10%TiC, АК10М2Н-10%TiC на основе соответствующих промышленных сплавов после проведения термической обработки представляют собой новые легкие композиционные материалы с повышенными трибологическими характеристиками, перспективные для триботехнических применений, в том числе и при повышенной температуре до 250°C.

Основное содержание диссертации представлено в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1) Шерина, Ю.В. Разработка композиционного материала на основе сплава АК20М2Н и исследование его триботехнических свойств / Ю.В. Шерина, А.Р. Луц, И.Д. Ибатуллин // Наукоемкие технологии. 2022. - № 2 (128). – С. 11-16. **(ВАК, К2).**

2) Шерина, Ю.В. Исследование свариваемости методом TIG алюмоматричного композиционного материала AMg2-10%TiC / Ю.В. Шерина, А.Р. Луц // Вестник Югорского государственного университета. 2022. - № 3 (66). – С. 75-83. **(ВАК, К2).**

3) Шерина, Ю.В. Жидкофазное получение методом СВС и термическая обработка композитов на основе алюминиево-магниевого сплава, упрочненных высокодисперсной фазой карбида титана / Ю.В. Шерина, А.Р. Луц, А.П. Амосов, А.Д. Качура // Известия вузов. Цветная металлургия. 2023. – Т. 29. - № 4. – С. 70-86. **(ВАК, К1).**

4) Шерина, Ю.В. Влияние армирования высокодисперсной фазой карбида титана и последующей термической обработки на структуру и свойства сплава АМг6 / Ю.В. Шерина, А.Р. Луц, П.Е. Кичаев, М.В. Богатов, А.П. Амосов // Научные технологии. 2023. - № 5 (143). – С. 15-21. **(ВАК, К2)**.

5) Шерина, Ю.В. Исследование вида флюса на синтез композиционного материала АМг2 / Ю.В. Шерина, А.Р. Луц, А.Д. Качура, С.В. Шигин // Транспортное машиностроение. 2023. - № 7 (19). – С. 40-48. **(ВАК, К2)**.

6) Шерина, Ю.В. Оценка модифицирующего эффекта высокодисперсной фазой карбида титана, полученной методом СВС в составе алюминиевых сплавов / Ю.В. Шерина, А.Р. Луц, И.Ю. Тимошкин // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. - № 4 (46). – С. 30-38. **(ВАК, К2)**.

7) Шерина, Ю.В. Влияние армирования TiC и TiB₂ на структуру алюминиевого сплава АМг2 / Ю.В. Шерина, А.Р. Луц, А.Д. Качура // Перспективные материалы. 2024. - № 3. – С. 23-32. **(ВАК, К2)**.

8) Шерина, Ю.В. Исследование влияния добавки высокодисперсной фазы карбида титана, синтезированной в расплаве и термообработки на структуру и свойства сплава АМ4,5Кд / Ю.В. Шерина // Транспортное машиностроение. 2024. - № 3 (27). – С. 59-69. **(ВАК, К2)**.

9) Шерина, Ю.В. Выбор термической обработки и исследование ее влияния на структуру и свойства композиционного материала АК10М2Н-10%TiC, полученного методом СВС в расплаве / Ю.В. Шерина, А.Р. Луц, А.П. Амосов, Е.А. Минаков, И.Д. Ибатуллин / Известия вузов. Цветная металлургия. 2024. – Т.30. - № 2. – С. 30-43. **(ВАК, К1)**.

10) Шерина, Ю.В. Возможность применения метода АРДС для получения неразъемных соединений композиционных материалов, армированных высокодисперсной фазой карбида титана, полученных на основе алюминиево-магниевого сплава / Ю.В. Шерина, А.Р. Луц, Е.Н. Голубовский, М.В. Богатов / Вестник Югорского государственного университета. 2024. – Т.20. - № 1. – С. 51-61. **(ВАК, К2)**.

11) Шерина, Ю.В. Влияние термической обработки на свойства композиционных материалов АМг2-10%TiC и АМг6-10%TiC, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Ю.В. Шерина, А.Р. Луц / Frontier Materials & Technologies. 2024. – № 1. – С. 105-112. **(ВАК, К1, Scopus)**.

Публикации в других изданиях:

12) Шерина, Ю.В. Исследование влияния термической обработки на свойства алюминиево-магниевого сплава, армированного высокодисперсной фазой карбида титана, полученной методом СВС в расплаве / Ю.В. Шерина, А.Р. Луц // Физическое материаловедение: сборник материалов XI международной школы. – Тольятти, Тольят. гос. ун-т, 2023. – С. 199-200.

13) Шерина, Ю.В. Влияние армирования высокодисперсной фазой карбида титана, синтезированной в расплаве, и термообработки на триботехнические свойства сплава АК10М2Н / Ю.В. Шерина, А.Р. Луц // Высокие технологии в машиностроении: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции / Отв. ред. Р.Г. Гришин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2024. – С. 307-311.

Научное издание

Шерина Юлия Владимировна

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук на тему:

**ВЛИЯНИЕ АРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ КАРБИДА ТИТАНА,
СИНТЕЗИРОВАННОЙ В РАСПЛАВЕ, И ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И
СВОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

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 «01» июля 2024 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.