

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Лазарева Павла Андреевича

«Самораспространяющийся высокотемпературный синтез интерметаллидных соединений на основе систем Ti-Al-X (X = Mg, Si, Mn)», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Диссертационная работа Лазарева П.А. посвящена созданию методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) интерметаллидных сплавов на основе систем Ti-Al-X (где X = Mg, Si, Mn), исследованию особенностей их фазо- и структурообразования, а также комплексному изучению свойств синтезированных материалов.

Актуальность диссертационной работы.

Снижение веса конструкции является критическим фактором для аэрокосмической и автомобильной промышленности. Традиционные материалы, такие как стали и алюминиевые сплавы, не всегда обладают одновременно высокой прочностью, низкой плотностью, жаростойкостью и коррозионной стойкостью и не могут работать в экстремальных условиях. Перспективным направлением в материаловедении является разработка интерметаллидных соединений на основе титана Ti-Al, которые сочетают высокую удельную прочность и жаростойкость. Основные недостатки Ti-Al – хрупкость и низкая пластичность при комнатной температуре, что ограничивает их применение в условиях циклических и ударных нагрузок. Основное направление улучшения свойств этих материалов легирование элементами: Mg, Si, Mn.

Для решения поставленной проблемы автором использован эффективный метод получения интерметаллических соединений СВС который обладает рядом преимуществ перед традиционными методами. Его высокая производительность обусловлена экзотермической природой реакции, которая после инициации протекает самоподдерживающимся режиме, не требуя постоянного подвода энергии. Для оптимизации технологии и получения материалов с заданными свойствами необходимо исследование процессов, идущих при синтезе, на микроуровне, включая кинетику реакций, морфологию границ раздела и влияние параметров СВС на микроструктуру. Результаты этих исследований имеют большое фундаментальное научное и практическое значение.

Актуальность работы не вызывает сомнения и подтверждается выполнением ее в соответствии с тематическими планами НИР: Госзадание ИСМАН 122032900080-3 и Госзадание ВлГУ 124013000712-9.

Анализ содержания диссертации.

Диссертационная работа содержит введение, 5 глав, выводы, список использованных источников и приложение. Общий объем работы составляет 171 страницы, включая 97 рисунков, 11 таблиц и библиографию из 173 наименований.

Во введении обосновывается актуальность и степень разработанности темы диссертации, формулируются цели и задачи, приводится научная новизна и практическая значимость, формулируются положения, выносимые на защиту, описывается теоретическая и практическая ценность работы и степень ее апробации, приводится перечень публикаций по теме диссертации, отражается личный вклад автора.

В первой главе приведен литературный обзор научных публикаций, посвященных изучению интерметаллидных соединений на основе бинарных и тройных систем Ti-Al-X ($X = \text{Mg, Si, Mn}$). В главе рассматриваются свойства сплавов на основе системы Ti-Al, а также анализируется влияние легирования магнием, кремнием и марганцем на их структурные, механические и термические характеристики. Рассмотрены различные методы получения интерметаллидных сплавов и показана перспективность метода СВС для разработки и получения новых тройных интерметаллидных сплавов, включая как легированные сплавы, так и наплавки с однородной структурой.

Вторая глава посвящена методике проведения исследований, описанию экспериментальных методик и оборудования, а также приведены характеристики исходных материалов, используемых в синтезе. Подробно описаны методы анализа, с помощью которых изучались свойства полученных продуктов, и методы синтеза сплавов с использованием промышленно выпускаемых порошков Ti, Al, Mg, Si, Mn, SiO₂ и сплав АМг6. В главе описан комплекс современных приборов и методик, использованных для исследования свойств полученных материалов. Для термодинамического анализа применено программное обеспечение «THERMO и «ATC».

В третьей главе представлены основные результаты экспериментов по получению интерметаллидного сплава на основе системы Ti-Al-Mn методом СВС. Данный раздел диссертационной работы посвящен комплексному исследованию тройной интерметаллидной системы Ti-Al-Mn, различного реакционного состава, с целью получения сплава на основе фазы Лавеса, являющегося перспективным функциональным интерметаллидным материалом, демонстрирующим хорошие физико-механические и магнитные свойства. Методом СВС-прессования исследовано диффузионное взаимодействие сплава на основе Ti-Al-Mn с Ti-подложкой. Исследовано влияние дополнительного отжига и механической обработки синтезированных продуктов и установлено, что при этом увеличивается значение

намагниченности насыщения. Приводятся результаты измерения механических свойств и микротвёрдости.

В четвёртой главе представлены результаты синтеза и исследования СВС сплавов в системе Ti-Al-Si. В режиме фронтального горения был синтезирован и исследован сплав на основе τ -фазы $Ti_5Al_{0.75}Si_{2.25}$ (PDF-01-079-2701) с гексагональной плотноупакованной решёткой с параметрами элементарной ячейки, $a=7,493 \text{ \AA}$, $c=5,175 \text{ \AA}$. Этот же сплав был синтезирован методом СВС-прессования. Проведено исследование диффузионного взаимодействия сплава на основе Ti-Al-Si с Ti-подложкой при СВС-прессовании. Показано, что тепла, выделяющегося при реакции СВС, достаточно для обеспечения диффузионного взаимодействия на границе раздела слоев (Ti-Al-Si)/Ti-подложка и (Ti-Al-Si)/ Ti_5Si_3 с образованием прочного соединения толщиной $1\div2$ мкм. Исследованы физико-механические свойства сплава синтезированного компактированного образца. Проведено селективное лазерное плавление порошка сплава $Ti_{20}Al_3Si_9$ синтезированного методом СВС, получены 3D образцы сплава на основе однофазного СВС-порошка $Ti_5Al_{0.75}Si_{2.25}$ осколочной формы и проведено исследование их структуры и фазового состава.

Пятая глава посвящена описанию результатов экспериментов по СВ-синтезу τ -фазы $Ti_2Al_{18}Mg_3$ в системе Ti-Al-Mg. Представлены результаты синтеза сплава, представляющего собой композиционный материал на основе интерметаллида $TiAl_3$ в матрице фазы $Ti_2Al_{18}Mg_3$. Синтез проведен методом СВС в режиме теплового взрыва в системе Ti-Al-Mg. В работе исследовано диффузионное взаимодействие на границе раздела слоев сплава на основе Ti-Al-Mg с Ti-подложкой при образовании прочного соединения толщиной $10\div15$ мкм. Методом оптической эмиссионной спектроскопии при синтезе в вакууме зарегистрировано образование низкотемпературной плазмы (температура 7756 К). Определены механические характеристики сплава: микротвёрдость, предел прочности на сжатие и текучести.

В заключении диссертационной работы изложены основные результаты и выводы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что впервые на основе систем Ti-Al-Si Ti-Al-Mg Ti-Al-Mn методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза получены интерметаллидные сплавы $Ti_5Al_{0.75}Si_{2.25}$, $Ti_2Al_{18}Mg_3$ сплав на основе фазы Лавеса $TiMn_{0.75}Al_{1.25}$. Исследованы физические характеристики материалов (плотность, пористость, микротвёрдость). Измерены электрофизические и магнитные характеристики. Впервые с помощью метода селективного лазерного плавления продемонстрирована возможность получения наплавов из интерметаллидного СВС-порошка осколочной формы состава $Ti_5Al_{0.75}Si_{2.25}$ на Ti-подложку и изучены особенности структуры переходных зон.

Публикации по теме диссертации: опубликовано 14 печатных работ в реферируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК и базы данных Web of Science и Scopus, 8 тезисов в сборниках трудов перечисленных выше конференций, получен 1 патент РФ.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность экспериментальных результатов, научных положений выводов и рекомендаций обеспечивается использованием комплекса современного оборудования и аттестованных методик для проведения исследования микроструктуры, фазового состава, электрофизических свойств синтезированных сплавов, а также механических характеристик. Для теоретических расчётов использован термодинамический расчёт химических реакций интерметаллидных систем. Также достоверность полученных результатов подтверждена публикациями их в высокорейтинговых отечественных и зарубежных научных журналах, докладами и обсуждениями результатов на конференциях и симпозиумах, патентом РФ на изобретение.

Практическая ценность.

В диссертационной работе содержится большой объем нового экспериментального материала, имеющего важнейшее значение для создания промышленных технологий синтеза методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза новых интерметаллидных сплавов на основе системы Ti-Al-X ($X = \text{Mg}, \text{Si}, \text{Mn}$) для использования в современной электронной промышленности при создании компонентов для высокотехнологичных устройств.

Замечания.

1. На стр.75 и в выводе 3 по главе 3, в выводе 2 по главе 5 указано, что обеспечено диффузионное взаимодействие на границе раздела слоев (Ti-Al-Mn)/Ti-подложка с образованием прочного соединения толщиной 10 мкм, на границе раздела слоев (Ti-Al-Mg)/Ti-подложка с образованием прочного соединения толщиной 10÷15 мкм.. Неясно, что автор подразумевает под прочным соединением, какова его величина и каким образом определили?
2. В работе описаны различные методы синтеза интерметаллидных сплавов на основе системы Ti-Al-X ($X = \text{Mg}, \text{Si}, \text{Mn}$) и их свойства. Однако автор не провёл сравнительный анализ свойств и структуры, полученных традиционными методами и методом СВС.
3. В выводах к главе 5 утверждается, что сплавы на основе систем Ti-Al-Mg могут быть перспективными для получения конструкционных материалов в промышленных условиях, что сомнительно при прочности сплава на сжатие – 12.1 МПа и пределе текучести 9.87 МПа.

Соответствие содержания работы указанной специальности

По своему содержанию представленная к защите диссертационная работа исследует экзотермические реакции в режиме распространения волны либо в режиме теплового взрыва с образованием продуктов горения в виде соединений соответствует пунктам 1,2 паспорта научной специальности 1.3.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества»:

п.1 «...механизмы химического превращения и экспериментальные методы исследования химической структуры и динамики химических превращений»;

п.2 «...поведение веществ и структурно-фазовые переходы в экстремальных условиях».

Соответствие автореферата содержанию диссертации

Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертационной работы и опубликованным работам.

Заключение. Диссертационная работа Лазарева Павла Андреевича «Самораспространяющийся высокотемпературный синтез интерметаллидных соединений на основе систем Ti-Al-X (X = Mg, Si, Mn)», является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, связанную с исследованием синтеза интерметаллидных соединений методом СВС и их структуры, фазового состава и электрофизических и механических свойств. По объему выполненного исследования, новизне полученных результатов и выводов, их научному и практическому значению диссертация полностью соответствует всем требованиям пункта II Положения о присуждении ученых степеней от 24 сентября 2013 года № 842 (в ред. от 20.03.2021 г.). Приведенные выше замечания не умаляют достоинств работы и ее автор, Лазарев Павел Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Я, Первухин Л. Б. даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой Лазарева Павла Андреевича, и их дальнейшую обработку.

Первухин Леонид Борисович



08.01.2026

доктор технических наук (специальность 01.04.17 «Химическая физика, в том числе физика горения и взрыва»), профессор, научный руководитель ООО "Битруб Интернэшнл", 141292, г. Красноармейск, Московской обл., пр. Испытателей 21, пом.18.

Тел. + 7-916-564-8784, E-mail: bitrub@mail.ru

Подпись Первухина Леонида Борисовича удостоверяю

Генеральный директор



Т. А. Шишкин

