



МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»
(НИТУ МИСИС)»**

Ленинский проспект, 4, стр.1, Москва, 119049

Тел. (495)955-00-32; Факс: (499)236-21-05

<http://www.misis.ru>

E-mail: kancela@misis.ru

ОКПО 02066500 ОГРН 1027739439749

ИНН/КПП 7706019535/ 770601001

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и инновациям,
доктор технических наук, профессор



М.Р. Филонов

2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Лазарева Павла Андреевича по теме:

«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

Актуальность выполненной работы

Одной из задач современного материаловедения является разработка перспективных легких и высокопрочных конструкционных материалов. Уникальным сочетанием низкой плотности, высокой удельной прочности, жаростойкости и коррозионной стойкости обладают интерметаллические системы на основе алюминидов титана, которые находят применение в двигателестроении, автомобилестроении, медицине и других высокотехнологичных отраслях промышленности.

Практический интерес к исследованию тройных систем Ti-Al-X (X = Mg, Si, Mn) связан с перспективой создания на их основе новых классов материалов. В частности, легирование магнием позволяет модифицировать структуру, повысить пластичность материала, что является важным для возможности их механической обработки. Добавка кремния повышает

жаропрочность и сопротивление ползучести за счет образования дисперсных силицидных фаз. Марганец используется для управления фазовым составом, повышения термической стабильности и для придания магнитных свойств.

Однако получение однородных сплавов в системах Ti-Al-Mg, Ti-Al-Si и Ti-Al-Mn методами дугового переплава сопряжено со значительными трудностями, которые обусловлены разницей в плотностях, температурах плавления и давлении паров компонентов, что приводит к ликвации, испарению легирующих элементов и нестабильности состава слитка.

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) является альтернативным методом получения многокомпонентных интерметаллических материалов. СВС позволяет получать соединения в режиме сверхбыстрого протекания реакций, что способствует формированию метастабильных фаз и тонкодисперсных структур, недостижимых при равновесной кристаллизации. В тоже время синтез интерметаллидов в системах Ti-Al-Mg, Ti-Al-Si и Ti-Al-Mn изучен недостаточно, и анализ влияния параметров процесса на фазообразование, структуру и свойства синтезированных продуктов требует детального исследования. Изучение кинетики и механизмов структурообразования в условиях СВС представляет научный и практический интерес для создания материалов с заданными свойствами.

Цель и задачи работы

Целью работы являлось получение методом СВС интерметаллидных сплавов на основе систем Ti-Al-X (где X = Mg, Si, Mn), исследование особенностей их фазо- и структурообразования, а также комплексное изучение свойств синтезированных материалов. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Проведение термодинамического расчёта химических реакций интерметаллидных систем Ti-Al-X (X = Mg, Si, Mn) при получении сплавов методом СВС из смеси элементных порошков.

2. Исследование влияния магния, кремния и марганца на параметры и протекание процесса СВС в системах Ti-Al-X (где X = Mg, Si, Mn).
3. Изучение особенностей механизма фазообразования и формирования микроструктуры интерметаллидных сплавов Ti-Al-X (где X = Mg, Si, Mn), полученных в процессе СВС.
4. Определение физических характеристик синтезированных сплавов, исследование магнитных и электрофизических свойств сплавов на основе системы Ti-Al-Mn и их температурной зависимости в широком диапазоне температур (80÷1200 К).

Содержание работы

Диссертация Лазарева П.А. объёмом 171 страниц состоит из введения, пяти глав, выводов, списка используемой литературы и приложения.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели и задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы защищаемые положения.

Глава 1 посвящена литературному обзору, в котором дана краткая характеристика интерметаллидных сплавов, история их открытия, свойства и применения. Приведен сравнительный анализ методов получения основных интерметаллидов. Рассмотрены современные СВС-процессы и их классификация. Отдельное внимание уделено интерметаллидам системы Ti-Al, а также тройным системам Ti-Al-Mn, Ti-Al-Si и Ti-Al-Mg. Приведены свойства перспективных материалов для аэрокосмической промышленности, автомобилестроении, медицине и других высокотехнологичных отраслях в виде электроники. Отмечено, что в литературе отсутствуют работы по получению методом СВС сплавов на основе тройных систем Ti-Al-X (X = Mg, Si, Mn), а также систематические исследования их структурообразования.

Глава 2 представляет собой методическую часть работы, в которой описаны экспериментальные методики и установки, характеристики исходных

компонентов для синтеза материалов, методы анализа свойств синтезированных продуктов.

В главе 3 приведены результаты исследований процесса СВС в системе Ti-Al-Mn. Описаны особенности горения смесей, а также структурные исследования продуктов синтеза. Исследована эволюция фазового состава с помощью метода времяразрешающей рентгеновской дифрактометрии процесса СВС. Показана возможность получения практически однофазного продукта на основе фазы Лавеса методом СВС. Проведен анализ электрических и магнитных свойств продуктов синтеза на основе фазы Лавеса в сравнении с известными аналогами.

В главе 4 показано, что режим горения смесей в системе Ti-Al-Si в значительной степени зависит от условий эксперимента (размера частиц исходной смеси, исходной температуры и условий, теплопередачи и т.д.). Показана возможность получения методом СВС-прессования компактного материала с пористостью менее 3% и коэффициентом трещиностойкости $K_{Ic} = 5,1 \div 5,7 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Также продемонстрирован способ получения 3D структур методом СЛП при использовании СВС-порошка состава $\text{Ti}_5\text{Al}_{0.75}\text{Si}_{2.25}$. Исследованы особенности структуро- и фазообразования в системе Ti-3Al-SiO₂. Показана возможность синтеза материала на основе твердого раствора $\text{Ti}(\text{Al},\text{Si})_3$.

Глава 5 посвящена получению методом СВС интерметаллического сплава в системе Ti-Al-Mg. Методом СВС в режиме теплового взрыва синтезирован сплав на основе твёрдого раствора замещения $\text{Ti}_2\text{Al}_{18}\text{Mg}_3$, представляющий собой композиционный материал на основе TiAl_3 в матрице фазы $\text{Ti}_2\text{Al}_{18}\text{Mg}_3$. Температура инициирования реакции составила 835 °С, а максимальная температура горения - 985 °С. Показано, что при синтезе в вакууме в результате интенсивной термоэмиссии ионов Mg создаются условия для объемной ионизации газа между образцом и электрическими витками нагревательной печи, что приводит к образованию низкотемпературной плазмы. Методом оптической эмиссионной спектроскопии зарегистрирована

доминирующая длина волны 528 нм, соответствующая Mg, коррелированная цветовая температура равна 7756 К.

В заключении приведены основные выводы по диссертационной работе.

В приложении представлен Патент на способ получения сплава на основе Ti-Al-Si (патент РФ на изобретение № 2822644 от 11.07.2024 г. «Способ получения сплава в системе Ti-Al-Si») и акт об использовании результатов кандидатской диссертационной работы.

Список литературы содержит 173 источника.

Новизна полученных результатов и выводов диссертации

Методом СВС из элементов в системах Ti-Al-Si Ti-Al-Mg Ti-Al-Mn получены сплавы $Ti_5Al_{0.75}Si_{2.25}$, $Ti_2Al_{18}Mg_3$, $TiMn_{0.75}Al_{1.25}$. Исследованы их физические свойства: плотность, пористость, микротвердость, электрофизические и магнитные характеристики.

Изучены особенности структуры переходных зон, формирующихся в процессе СВС-прессования при взаимодействии сплавов Ti-Al-X (где X=Mg, Si, Mg) с Ti-подложкой.

Предпринята попытка получения наплавов из СВС-порошка осколочной формы состава $Ti_5Al_{0.75}Si_{2.25}$ на Ti-подложку методом селективного лазерного плавления.

При синтезе композиционного материала в системе Ti-3Al-SiO₂ обнаружено формирование стержнеобразных гексагональных кристаллитов Ti_5Si_3 на основе твердого раствора $Ti(Al,Si)_3$ выступающие в качестве упрочняющей связки.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов, приводимых в диссертации Лазарева П.А., подтверждается большим объёмом полученных экспериментальных данных, применением современного аналитического оборудования для микроструктурного анализа, использованием аттестованных методик исследований, а также сопоставлением результатов с существующими литературными данными.

Научная и практическая значимость работы

Продemonстрирована возможность синтеза интерметаллидных сплавов на основе системы Ti-Al-X ($X = \text{Mg, Si, Mn}$) и определены оптимальные параметры СВС для получения сплавов системы Ti-Al-X ($X = \text{Mg, Si, Mn}$).

Разработан способ получения сплава на основе Ti-Al-Si (патент РФ на изобретение № 2822644 от 11.07.2024 г. «Способ получения сплава в системе Ti-Al-Si»).

Показана возможность получения интерметаллидного сплава $\text{Ti}_{20}\text{Al}_3\text{Si}_9$ методом СВС-прессования с пористостью менее 3%. Изучены магнитные и электрофизические характеристики сплавов системы Ti-Al-Mn, которые используются в современной электронной промышленности при создании компонентов для высокотехнологичных устройств, таких как прецизионные резисторы, резисторы для шунтов, тензодатчики и различные нагревательные элементы.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности, по которой она рекомендуется к защите

Диссертационная работа Лазарева П.А. «Самораспространяющийся высокотемпературный синтез интерметаллидных соединений на основе систем Ti-Al-X ($X = \text{Mg, Si, Mn}$)» соответствует:

- паспорту научной специальности: 1.3.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества»;
- формуле паспорта диссертации, т.к. в диссертации рассматриваются вопросы применения материалообразующего метода, основанного на использовании энергии/тепла экзотермической реакции в режиме распространения волны либо в режиме теплового взрыва с образованием продуктов горения в виде соединений, представляющих практическую ценность и обладающих ценными характеристиками.
- областям исследования паспорта специальности, в частности:

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

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

пункту 7 «Закономерности и механизмы распространения, структура, параметры и устойчивость волн горения, связь химической и физической природы веществ и систем с их термохимическими параметрами, характеристиками термического разложения и горения».

По диссертационной работе Лазарева П.А. имеются следующие замечания:

1. Для осуществления синтеза в системе Ti-Al-Mn использовался стадийный нагрев шихтовых образцов до 450 °С с последующим увеличением температуры. Однако не сказано почему стадийный нагрев не использовался при синтезах в системах Ti-Al-Mg и Ti-Al-Si.
2. В тексте диссертации используются различные единицы измерения температуры. На некоторых графиках температура указана в Кельвинах, на других – в градусах Цельсия.
3. Не обсуждается влияние примесных фаз на свойства синтезированного продукта в системе Ti-Al-Mg.
4. Не приведена точность микротермопарных измерений температуры горения, и не указаны причины расхождения экспериментальных данных с расчётными значениями.
5. Метод динамической дифрактографии процесса горения смесей в системе Ti-Al-Mg, примененный для регистрации фазообразования в режиме реального времени, не зафиксировал образование фазы $Ti_2Al_{18}Mg_3$. Чем может объясняться данный результат?
6. Для реализации аддитивных технологий (СЛС, СЛП, СЭЛС, ПЛВ) и получения изделий сложной формы, в соответствии с ГОСТ Р 57558-2017,

исходные порошки должны обладать узким фракционным составом, сферичностью, отсутствием внутренней газовой пористости и сателлитов на поверхности частиц, что обеспечивает их высокую текучесть. Ранее были разработаны технологии получения узкофракционных сферических порошков на основе алюминидов титана, полученных плазменной сфероидизацией классифицированных измельченных продуктов элементного синтеза и центробежного литья. В этой связи возникает вопрос о возможности применения в аддитивных технологиях порошков осколочной формы с низкой или нулевой текучестью.

Заключение

Однако отмеченные недостатки не снижают теоретическую и практическую значимость проведенных исследований, выполненных на высоком научном уровне, а полученные в диссертации результаты соответствуют поставленным целям. Работа Лазарева П.А. является законченным исследованием, выполнена на высоком научном уровне, основные выводы обоснованы и аргументированы, автореферат отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Лазарева П.А. является научно-квалификационной работой и содержит новые научные знания. По объёму полученных результатов и научной значимости диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Российской Федерации (Постановление Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её 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.

Отзыв составлен на основании анализа диссертации, автореферата и публикаций Лазарева П.А. на заседании кафедры порошковой металлургии и

функциональных покрытий (ПМиФП) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (протокол № 6 от 18 декабря 2025 г.).

Заведующий кафедрой ПМиФП,

член-корреспондент РАН,

доктор технических наук

(01.04.17 – Химическая физика,

в т.ч. физика горения и взрыва),

профессор



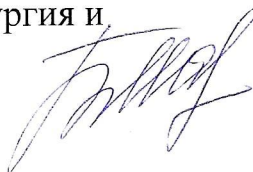
Евгений Александрович Левашов

Доцент, ученый секретарь кафедры

ПМиФП, кандидат технических наук

(05.16.06 – Порошковая металлургия и

композиционные материалы)



Марина Яковлевна Бычкова

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

119049, г. Москва, Ленинский проспект, 4, стр. 1

Тел. +7 (495) 955-00-32. Факс: 7 (499) 236-21-05. E-mail: kancela@misis.ru



Подпись: Левашова Е.А.; Бычкова М.Я.
Веряю _____
Зам. начальника _____ Кузнецова А.Е.
Отдела кадров _____
« 18 » 12 2025 г.