

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по инновационной
деятельности ФГБОУ ВО «УУНиТ»
к.т.н., доцент

Г.К. Агеев
2024 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Бажиной Арины Дмитриевны на тему
«Разработка металлокерамических слоистых композиционных материалов на
основе моноборида титана и МАХ-фаз системы Ti-Al-C в условиях свободного
СВС-сжатия», представленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук по научной специальности

1.3.17 Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний
вещества

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Бажиной А.Д. посвящена получению металлокерамических слоистых композиционных материалов на основе моноборида титана и МАХ-фаз Ti_3AlC_2 и Ti_2AlC в условиях свободного СВС-сжатия. Полученные научные результаты в ходе выполнения данной диссертационной работы способствуют развитию физических представлений о процессах фазо- и структурообразования в условиях горения в режиме СВС и сдвигового высокотемпературного деформирования, о влиянии технологических параметров свободного СВС-сжатия на структуру и свойства металлокерамических композиционных материалов. Практическое значение результатов исследований состоит в возможности их использования для создания новых композиционных материалов, перспективных при изготовлении бронестойких материалов, мишеней для магнетронного напыления, в качестве конструкционных и функциональных материалов различного назначения.

В настоящее время, композиционные материалы на основе моноборида титана и МАХ-фаз вызывают к себе значительное внимание благодаря своим уникальным характеристикам. Композиты на основе моноборида титана и МАХ-

фаз системы Ti-Al-C широко применяются в различных отраслях промышленности, таких как аэрокосмической, автомобильной, оборонной, биомедицинской.

Изготовление металлокерамических композиционных материалов методом свободного СВС-сжатия является перспективным и актуальным направлением. Метод свободного СВС-сжатия относится к прямым методам получения, поскольку позволяет получить компактные композиционные материалы на основе тугоплавких неорганических соединений и изделия из данных материалов в одну технологическую стадию за десятки секунд на одном оборудовании, не разделяя данные процессы в пространстве и времени. Данным методом возможно получить материалы с улучшенными физико-механическими свойствами, что способствует увеличению ресурса и надежности деталей и механизмов.

Проведенные исследования, направленные на получение композиционных материалов на основе моноборида титана и МАХ-фаз на титановой подложке при применении высокотемпературных сдвиговых деформаций продуктов горения в условиях свободного СВС-сжатия, убедительно показали повышенные физико-механические свойства полученных композитов по сравнению с монокристаллическими материалами.

В связи с вышеизложенным, актуальность диссертационной работы Бажиной Арины Дмитриевны, посвященной разработке металлокерамических слоистых композиционных материалов на основе моноборида титана и МАХ-фаз системы Ti-Al-C в условиях свободного СВС-сжатия, не подлежит сомнению.

Актуальность работы подтверждается выполнением следующих проектов: РНФ № 18-79-10254, РФФИ № 17-48-500553_p_a, МК-3213.2017.8, УМНИК – 2018 (б) договор №14038ГУ/2019, СП-1307.2021.1.

Структура и содержание диссертации

Диссертация содержит 164 страницы машинописного текста, в том числе 123 рисунка, 18 таблиц и список литературы из 198 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ литературы, соответствующей тематике диссертационной работы. Литературный обзор включает в себя описание свойств, видов и компонентов современных слоистых композиционных материалов. Рассмотрены основные методы получения слоистых композиционных материалов на основе боридов и интерметаллидов титана и МАХ-фаз системы Ti-Al-C.

Во **второй главе** представлены объекты исследований, используемое научно-аналитическое оборудование и современные методики проведения исследований. При помощи стандартных взаимодополняющих аттестованных физико-химических методов и методик проводилось изучение характеристик горения, микроструктуры, фазового состава, физико-механических и трибологических характеристик полученных материалов.

В **третьей главе** изучена взаимосвязь между структурой и свойствами слоистых композиционных материалов на основе TiB/Ti. Изучено влияние исходных составов TiB-20, 30 и 40, относительной плотности каждого слоя и времени задержки перед прессованием на температурные профили, возникающие при горении и последующем деформировании, а также на температуру на границе металлокерамический слой/титановая подложка. Получены результаты исследований структуры, фазового состава, механических и трибологических характеристик металлокерамического композита на основе TiB/Ti, синтезированного на титане в зависимости от технологических режимов свободного СВС-сжатия.

В **четвертой главе** изучены особенности структуры и свойств СКМ на основе TiB – (20–40) масс. % Ti с промежуточным интерметаллидным слоем Ti_xAl (где $x=1, 1.5, 3$) на титановой подложке (BT1-0). Были исследованы температурные профили, возникающие при горении и последующем деформировании. Методом свободного СВС-сжатия были получены слоистые

композиты, состоящие из трех основных макрослоев, соответствующих различным фазовым и структурным составляющим. Изучены особенности структуры и фазового состава каждого слоя. Представлены результаты измерений механических характеристик полученных СКМ TiB/Ti_xAl/Ti в каждом слое.

В пятой главе были разработаны и получены СКМ на основе МАХ-фаз системы Ti-Al-C на титановой основе. Были исследованы температурные профили составов 3Ti-1Al-2C и 2Ti-1,5Al-1C, возникающие в условиях свободного СВС-сжатия. Представлены результаты исследования структуры, фазового состава и физико-механических характеристик полученных СКМ на основе МАХ-фаз Ti₃AlC₂ и Ti₂AlC, синтезированных на титановых подложках (BT1-0, BT6).

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Теоретическая значимость

Цель работы сформулирована следующим образом: установление закономерностей фазо- и структурообразования при формировании металлокерамических слоистых композиционных материалов на основе моноборида титана и МАХ-фаз Ti₃AlC₂ и Ti₂AlC в условиях свободного СВС-сжатия, изучение влияния состава исходных шихтовых заготовок и технологических параметров процесса на структуру и свойства разрабатываемых композитов.

Поставленная цель была достигнута путем успешного решения следующих задач:

1. Изучить температурные профили, возникающие при горении и последующем деформировании материалов на основе TiB – (20–40) масс. % Ti, МАХ-фаз составов 3Ti-1Al-2C и 2Ti-1,5Al-1C, а также материалов на основе моноборида титана с промежуточным интерметаллидным слоем Ti_xAl (где x=1, 1.5, 3), расположенных на титановых подложках (BT1-0, BT6), в условиях свободного СВС-сжатия.

2. Установить закономерности формирования структуры и фазового состава СКМ на основе TiB – (20–40) масс. % Ti на титановых подложках (BT1-0, BT6) и изучить их физико-механические и трибологические характеристики в зависимости от исходного состава шихтовых заготовок и технологических параметров свободного СВС-сжатия, а также от наличия промежуточных интерметаллидных слоев на основе Ti_xAl (где $x=1, 1.5, 3$).

3. Разработать и получить слоистые композиционные материалы на основе МАХ-фаз Ti_3AlC_2 и Ti_2AlC на титановых подложках (BT1-0, BT6), изучить влияние технологических параметров свободного СВС-сжатия на их структуру и свойства.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Выявлен характер температурных профилей, возникающих при горении и последующем деформировании в условиях свободного СВС-сжатия, на основе термопарных измерений для составов TiB – (20-40) масс. % Ti, в том числе с промежуточным интерметаллидным слоем Ti_xAl (где $x=1, 1.5, 3$), МАХ-фаз составов $3Ti-1Al-2C$ и $2Ti-1,5Al-1C$, расположенных на титановых подложках (BT1-0, BT6).

2. Впервые изучены закономерности влияния состава металлокерамических слоев и технологических параметров свободного СВС-сжатия на фазовый состав, структуру, физико-механические и трибологические свойства слоистых металлокерамических композиционных материалов на основе моноборида титана составов TiB – (20–40) масс. % Ti, в том числе с промежуточным интерметаллидным слоем Ti_xAl (где $x=1, 1.5, 3$), МАХ-фаз Ti_3AlC_2 и Ti_2AlC при использовании компактных титановых подложек (BT1-0, BT6), а также при использовании исходного слоя титана в виде порошка.

3. Установлена возможность использования свободного СВС-сжатия в качестве нового способа получения слоистых композиционных материалов на основе МАХ-фаз Ti_3AlC_2 и Ti_2AlC на титановой подложке (BT1-0, BT6). Выявлено, что при горении и высокотемпературном сдвиговом деформировании, путем изменения состава шихты и условий синтеза, возможно

получать СКМ с МАХ-фазами с заданными стехиометрией Ti_2AlC и Ti_3AlC_2 и размером зерна, дополнительно *in situ* упрочненные карбидными и интерметаллидными частицами.

4. Впервые показано, что переходная зона между металлокерамическими слоями на основе TiB/Ti и МАХ-фаз (Ti_2AlC и Ti_3AlC_2) и титановой подложкой формируется за счет диффузии и конвективного перемешивания продуктов синтеза. Граница раздела между металлокерамическим материалом и титаном имеет размытую волнообразную структуру и регулируется технологическими параметрами свободного СВС-сжатия.

Практическая значимость

1. Разработаны новые способы получения слоистых металлокерамических композиционных материалов (патент РФ на изобретение № 2754419 от 02.09.2021 г.) и градиентных материалов на основе МАХ-фаз системы $Ti-Al-C$ (патент РФ на изобретение № 2786628 от 22.12.2022 г.).

2. Разработаны технологические процессы для получения металлокерамических слоистых композиционных материалов методом свободного СВС-сжатия, получены опытные партии СКМ заданного размера и структуры на основе $TiB - (20-40)$ масс.% Ti , в том числе с промежуточным интерметаллидным слоем $TixAl$ (где $x=1, 1.5, 3$), МАХ-фаз Ti_3AlC_2 и Ti_2AlC на титановых подложках (ВТ1-0, ВТ6) габаритами от $10 \times 10 \times 2$ до $65 \times 110 \times (6-10)$ мм.

3. Установлена взаимосвязь между исходным составом каждого слоя и технологическими режимами свободного СВС-сжатия со структурно-фазовым состоянием и свойствами разработанных СКМ на основе моноборида титана составов $TiB - (20-40)$ масс. % Ti , в том числе с промежуточным интерметаллидным слоем $TixAl$ (где $x=1, 1.5, 3$), МАХ-фаз Ti_3AlC_2 и Ti_2AlC .

4. Изучена закономерность влияния пропорции толщины слоев на предел прочности при трехточечном изгибе полученных СКМ на основе TiB/Ti . Установлено, что, начиная с отношения высоты титанового слоя к общей высоте СКМ равной 0,17, предел прочности полученных СКМ превышает прочность монолитного материала TiB/Ti . Максимальное повышение прочности

полученных СКМ по сравнению с монокристаллическими составило до 1,5 раза для соотношения высот равного 0,51.

Апробация работы

Логически завершенные разделы работы опубликованы в статьях, а также обсуждены на научно-технических конференциях. По теме диссертации опубликовано 35 печатных работ, в том числе 11 статей в реферируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК и базы данных Web of Science и Scopus (в т.ч. Q1), 24 тезиса в сборниках трудов конференций, получено 2 патента РФ.

Достоверность экспериментальных результатов и выводов подтверждается использованием современных аттестованных методов и методик при исследовании фазового состава, структуры, физико-механических и трибологических свойств полученных металлокерамических слоистых композиционных материалов, а также подтверждается физически обоснованными экспериментальными результатами.

Детальное рассмотрение диссертационной работы позволяет выявить следующие **основные достоинства**:

1. Установлены закономерности формирования структуры и фазового состава и их взаимосвязь с физико-механическими и трибологическими характеристиками слоистых композиционных материалов составов TiB – (20-40 масс. %) Ti, в том числе с промежуточным интерметаллидным слоем Ti_xAl (где x=1, 1,5, 3), при использовании компактных титановых подложек (BT1-0, BT6).

2. Изучены закономерности влияния и регулирования состава и относительной плотности каждого слоя и времени задержки на температуру и скорость горения и температуру, возникающую на границе металлокерамический или интерметаллидный слой – титановая подложка (BT1-0, BT6) для составов TiB – (20-40) масс. % Ti, в том числе с промежуточным интерметаллидным слоем Ti_xAl (где x=1, 1,5, 3), 3Ti-1Al-2C и 2Ti-1,5Al-1C.

3. Установлено влияние пропорции толщины слоев на предел прочности при трехточечном изгибе полученных СКМ на основе TiB/Ti. При отношении высоты титанового слоя к общей высоте СКМ равной 0,17, предел прочности полученных СКМ превышает прочность 20 монолитного материала TiB/Ti.

4. Выявлена возможность использования метода свободного СВС-сжатия в качестве нового способа для получения слоистых композиционных материалов на основе МАХ-фаз системы Ti-Al-C на титановых подложках (BT1-0 и BT6).

5. Установлено, что переходная зона между металлокерамическим материалом TiB/Ti и МАХ-фаз (Ti_2AlC и Ti_3AlC_2) и титаном формируется за счет диффузии и конвективного перемешивания продуктов синтеза. Граница раздела между металлокерамическим материалом и титаном имеет волнообразную структуру и регулируется технологическими параметрами свободного СВС-сжатия и составом каждого слоя в пределах от 10 до 300 мкм.

6. Разработаны слоистые металлокерамические материалы методом свободного СВС-сжатия, изготовлены опытные партии СКМ заданного размера и структуры на основе TiB – (20-40) масс. % Ti, в том числе с промежуточным интерметаллидным слоем Ti_xAl (где $x=1, 1.5, 3$), МАХ-фаз составов $3Ti-1Al-2C$ и $2Ti-1,5Al-1C$ на титановых подложках (BT1-0, BT6) габаритами от $10 \times 10 \times 2$ до $65 \times 110 \times (6-10)$ мм.

По диссертационной работе Бажиной А.Д. имеются следующие замечания:

1. Во 2 главе приведена методика и параметры трибологических испытаний (таблица 6). Стоило привести пояснения, с чем был связан выбор этих параметров.

2. В 3 главе на рис. 26 и на рис. 28 приведены термограммы при горении изучаемых составов без приложения давления и с приложением давления через 0,6 с. Однако не приведено пояснение, с чем связан выбор этого времени. Также стоило пояснить почему максимальная температура на границе

образец/подложка ниже, чем температура в центре образца при прохождении волны горения.

3. В 3.2.1 приведены на высоком уровне результаты трибологических испытаний, в том числе 3D-изображения бороздок износа. Для наглядности полученных результатов было бы уместно привести результаты СЭМ бороздок износа и результаты энергодисперсионного анализа поверхностей контртел после трения, поскольку было зафиксировано налипание продуктов износа на них.

4. В 4 главе установлено, что при нагрузке 100 Н трещины образовались только в верхнем керамическом слое TiB/Ti, в котором были определены значения коэффициентов интенсивности напряжений. С целью установления значений коэффициентов интенсивности напряжений в интерметаллидном слое, стоило бы величину прикладываемой нагрузки увеличить.

5. В 5 главе проведено изучение влияния теплоизоляции на параметры процесса горения в режиме СВС для составов 3Ti-1Al-2C и 2Ti-1,5Al-1C. Были ли приведены аналогичные работы для составов, изучаемых в главах 3 и 4?

6. В 5 главе представлены результаты измерения плотности полученных слоистых композитов на основе МАХ-фаз двух составов 3Ti-1Al-2C и 2Ti-1,5Al-1C. Аналогичные измерения было бы уместно провести и для слоистых композитов на основе TiB/Ti и TiB/Ti_xAl/Ti.

Важно отметить, что вышеупомянутые замечания не снижают высокую научную и практическую ценность полученных результатов, а носят рекомендательный или уточняющий характер.

Соответствие диссертации научной специальности

Содержание диссертации соответствует требованиям паспорта научной специальности 1.3.17 Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества (технические науки). Область исследований соответствует следующим пунктам паспорта специальности:

пункт 1 «Поведение веществ и структурно-фазовые переходы в экстремальных условиях – в электрических и магнитных полях, в условиях статического и динамического сжатия, в полях лазерного излучения, в плазме и в гравитационных полях, при сверхнизких температурах и в других условиях»;

пункт 4 «Закономерности и механизмы распространения, структура, параметры и устойчивость волн горения, детонации, взрывных и ударных волн; связь химической и физической природы веществ и систем с их термохимическими параметрами, характеристиками термического разложения, горения, взрывчатого превращения; термодинамика, термохимия и макрокинетика процессов горения и взрывчатого превращения»;

пункт 5 «Процессы аналоги горения, детонации и взрыва; взаимодействие волн горения и взрывчатого превращения со средой, объектами и веществами; явления, порождаемые горением и взрывчатым превращением; процессы горения и взрывчатого превращения в устройствах и аппаратах для производства энергии, работы, получения веществ и продуктов; управление процессами горения и взрывчатого превращения».

Отрасль науки – технические науки.

Полученные результаты расширяют представления о закономерностях фазо- и структурообразования, а также синтезе металлокерамических слоистых композиционных материалов на основе моноборида титана и МАХ-фаз Ti_3AlC_2 и Ti_2AlC в условиях, сочетающих процессы горения и высокотемпературное сдвиговое деформирование.

Общее заключение

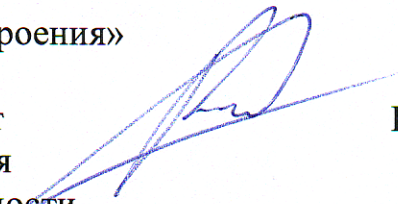
Представленная к защите диссертационная работа Бажиной А.Д. «Разработка металлокерамических слоистых композиционных материалов на основе моноборида титана и МАХ-фаз системы Ti-Al-C в условиях свободного СВС-сжатия» имеет высокую научную и практическую значимость.

Автореферат и публикации в научных журналах детально освещают содержание диссертации. Выводы, сделанные в диссертации, являются последовательными и аргументированными.

Диссертация Бажиной Арины Дмитриевны представляет научно-квалификационную работу, которая удовлетворяет Положению о присуждении ученых степеней (п. 9, 10, 11, 13, 14), утвержденному постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (с изменениями, внесенными Постановлением Правительства РФ от 21 апреля 2016г. №335), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Бажина Арина Дмитриевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества (технические науки).

Отзыв рассмотрен на заседании кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (протокол №22 от 11.04.24г.). Итоги голосования: «За» – 24 чел., «Против» – 0 чел., «Воздержался» – 0 чел.

Заведующий кафедрой
«Технология машиностроения»
ФГБОУ ВО «УУНиТ»,
докт. техн. наук, доцент
Докторская диссертация
защищена по специальности
05.16.01 – Металловедение и термическая
обработка металлов и сплавов


Рамазанов Камиль Нуруллаевич

450076, Приволжский федеральный округ, Республика Башкортостан, г. Уфа,
ул. Заки Валиди, дом 32
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»
Электронный адрес: <https://uust.ru/>
Телефон: + 7 (347) 229-96-16

