

Бажина Арина Дмитриевна

РАЗРАБОТКА МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ
МОНОБОРИДА ТИТАНА И МАХ-ФАЗ СИСТЕМЫ TI-AL-S
В УСЛОВИЯХ СВОБОДНОГО СВС-СЖАТИЯ

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время, композиционные материалы на основе бориды титана и МАХ-фаз вызывают к себе значительное внимание. Бориды титана обладают высокой прочностью и модулем упругости в сравнении со стальными и никелевыми сплавами при значительно меньшей плотности. Материалы на основе МАХ-фазы обладают свойствами и металлов, и керамики, такие как малая плотность, легко обрабатываются механическими методами, способны выдерживать циклические нагрузки при температурах до 1000 °С, что превосходит показатели многих жаропрочных материалов, включая никелевые сплавы и интерметаллиды. Однако, с каждым годом повышаются требования к физико-механическим и эксплуатационным свойствам композиционных материалов, вследствие их работы в более тяжелых и нагруженных условиях. Одним из перспективных направлений в улучшении свойств композитов является создание уникального дизайна слоистого композиционного материала (СКМ), который состоит из чередующихся слоев металла и керамики. Для СКМ существенное влияние оказывают границы раздела между слоями, которые способствуют разветвлению трещин и их перезарождению в каждом новом слое. Это приводит к увеличению трещиностойкости и усталостных свойств по сравнению с монолитными материалами. Более того, создание нового дизайна СКМ может обеспечить уникальное сочетание механических и эксплуатационных характеристик, которое также не характерно для монолитных материалов. Использование новых технологий и подходов в создании СКМ позволит повысить их физико-механические свойства, расширить их функциональные возможности и области применения. Разработка и изучение слоистых композиционных материалов является актуальной областью исследований, в которой участвуют известные институты и организации: ВИАМ, НИТУ «МИСиС», ИСМАН, ИПСМ РАН, НГТУ, ИФПМ СО РАН, ИМЕТ РАН и др.

Наиболее перспективные и эффективные методы получения СКМ – это те, которые сочетают в себе получение макрослоев и их консолидацию при высокой температуре в едином цикле. К ним относятся горячее прессование, электроискровое плазменное спекание (внешний источник тепла) и методы, разработанные в лаборатории пластического деформирования материалов (ИСМАН): СВС-экструзия, СВС-штамповка и свободное СВС-сжатие (внутренний источник тепла). В 1992 году, Бучацкий Л.М и Столин А.М. назвали реосинтезом (от греческого «*theo*» – течь) процесс СВС со сдвиговым деформированием. Уникальность реосинтеза в том, что формование изделий происходит с использованием твердофазных процессов. Даже когда температура горения ниже температуры плавления исходных компонентов или продуктов химической реакции, материал сохраняет способность к формованию. Разработанные технологические процессы производства изделий являются разновидностью процессов *in situ* и относятся к прямым методам получения, поскольку они позволяют получить компактные композиционные материалы на основе тугоплавких неорганических соединений и изделия из данных материалов в одну стадию на одном оборудовании, не разделяя данные процессы в пространстве и времени. Прикладной интерес к этим методам обусловлен прежде всего тем, что с их помощью можно получить за десятки секунд компактные композиционные материалы на основе тугоплавких неорганических соединений и изделия из этих материалов. Результаты исследования не только указанного процесса, но и его продуктов, показывают многообещающие перспективы для дальнейшего развития упомянутых выше направлений в области самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Таким образом, давление со сдвигом может рассматриваться как основа для создания методики экспериментального

исследования упомянутых процессов СВС, которые до настоящего времени оставались малоизученными, способствуя тем самым развитию данной научной области.

Для расширения возможностей метода свободного СВС-сжатия и увеличения класса получаемых материалов и изделий необходимо проведение систематических исследований процессов фазо- и структурообразования в условиях данного метода. Создание новой технологии получения СКМ в одну технологическую стадию с улучшенными физико-механическими свойствами является перспективным направлением для получения новых материалов, увеличения ресурса и надежности деталей и механизмов, а также снижения себестоимости их изготовления. Исходя из вышесказанного, можно заключить, что проведение исследований, направленных на изучение высокотемпературных сдвиговых деформаций продуктов горения в условиях свободного СВС-сжатия, является актуальным направлением научных исследований.

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

Целью настоящей работы является установление закономерностей фазо- и структурообразования при формировании металлокерамических слоистых композиционных материалов на основе моноборида титана и МАХ-фаз Ti_3AlC_2 и Ti_2AlC в условиях свободного СВС-сжатия, изучение влияния состава исходных шихтовых заготовок и технологических параметров процесса на структуру и свойства разрабатываемых композитов.

Для достижения цели работы были поставлены следующие **задачи**:

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 работы

Выявлен характер температурных профилей, возникающих при горении и последующем деформировании в условиях свободного СВС-сжатия, на основе термодинамических 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).

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.

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.

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 волнообразную структуру и регулируется технологическими параметрами свободного СВС-сжатия.

Практическая значимость работы

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 Ti_xAl (где $x=1, 1.5, 3$), МАХ-фаз Ti_3AlC_2 и Ti_2AlC на титановых подложках (BT1-0, BT6) габаритами от 10x10x2 до 65x110x(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 Ti_xAl (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 монолитными составило до 1,5 раза для соотношения высот равного 0,51.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментальных измерений в условиях свободного СВС-сжатия температурных профилей, возникающих при горении и последующем деформировании, в каждом изучаемом слое слоистого композиционного материала, а также на границе с титановой подложкой в зависимости от относительной плотности каждого слоя и времени задержки перед приложением давления, для составов TiB – (20–40) масс. % Ti, МАХ-фаз составов $3Ti-1Al-2C$ и $2Ti-1,5Al-1C$, материалов на основе моноборида титана с промежуточным интерметаллидным слоем Ti_xAl (где $x=1, 1.5, 3$).

2. Результаты исследований в условиях свободного СВС-сжатия процессов фазо- и структурообразования слоистых композиционных материалов на основе TiB – (20–40) масс.% Ti, в том числе с промежуточным интерметаллидным слоем Ti_xAl (где $x=1, 1.5, 3$), и МАХ-фаз Ti_3AlC_2

и Ti_2AlC , расположенных на титановых подложках (BT1-0, BT6), а также при использовании исходного слоя титана в виде порошка.

3. Экспериментальные результаты исследования влияния исходного состава и технологических параметров свободного СВС-сжатия на структуру и свойства слоистых композиционных материалов на основе 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 , расположенных на титановых подложках (BT1-0, BT6).

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности, по которой она рекомендуется 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» соответствует паспорту научной специальности: 1.3.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» – формуле паспорта диссертации, т.к. в диссертационной работе рассматривается сочетание процессов горения в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и высокотемпературного сдвигового деформирования материалов, их влияние на процессы фазо- и структурообразования слоистых композиционных материалов, характер взаимодействия металлокерамических и интерметаллидных слоев между собой и в зоне контакта с титановыми подложками (BT1-0, BT6) – областям исследования паспорта специальности, в частности:

пункт 1 «Поведение веществ и структурно-фазовые переходы в экстремальных условиях ... в условиях статического и динамического сжатия...»;

пункт 4 «Закономерности и механизмы распространения, структура, параметры и устойчивость волн горения...», «связь химической и физической природы веществ и систем с их термохимическими параметрами, характеристиками горения...», «...макрокинетика процессов горения...»;

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

Апробация работы

Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: IX и XI междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии», 2018 – 2020 гг., г. Москва; XVI – Всероссийская с международным участием Школа-семинар по структурной макрокинетике для молодого ученого имени академика А.Г. Мержанова, 2018 – 2019 гг., г. Черноголовка; XV и XVIII Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов», 2018 – 2021 гг., г. Москва; XXIX Симпозиум по реологии и II школа молодых ученых «Реология и переработка полимеров», 23–29 сентября 2018 г., г. Тверь; X и XIII Международная научно-инновационная молодежная конференция «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент», 2018 – 2021 гг., г. Тамбов; Молодежные научно-инновационные проекты Московской области: тезисы Тринадцатой научно-практической конференции, 27–28 ноября 2018 г., г. Москва – г.о. Черноголовка; Международный молодежный научный форум «Ломоносов», 2020 – 2023 гг., г. Москва; III Международная научно-практическая конференция «Физика

конденсированного состояния и ее приложения», 9 – 12 сентября 2020 г., г. Стерлитамак; XI Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии, 06–09 апреля 2021 г., г. Москва; XVIII Международная конференция Огнеупорщиков и металлургов, 20–21 мая 2021 г., г. Москва; Международная научная конференция "Современная химическая физика на стыке физики, химии и биологии", 29 ноября – 3 декабря 2021 г., г. Черноголовка; Четвертая Международная научная конференция «Наука будущего» и шестой Всероссийский молодежный научный форум «Наука будущего-наука молодых», 17 – 20 ноября 2021 г., г. Москва; XVI Минский международный форум по тепло- и массообмену, 16–19 мая 2022 г., г. Минск; IV International Conference and School "Advanced High Entropy Materials", 26–30 September 2022, Chernogolovka; XIII Всероссийская школа молодых ученых «Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия», 27–28 октября 2022 г., г. Черноголовка; XX Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов "Физико-химия и технология неорганических материалов", 17 – 20 октября 2023 года, г. Москва; XIV Всероссийская школа молодых ученых «Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия», 27 – 28 ноября 2023 г., г. Черноголовка; XV Международная научно-инновационная молодежная конференция «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент», 30 ноября – 01 декабря 2023 г., г. Тамбов.

Публикации

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 перечисленных выше конференций, получено 2 патента РФ.

Личный вклад автора

Автор лично изучил литературные данные по проблеме исследования, провел их анализ, принял участие в постановке цели и задачи диссертационного исследования. Автором были проведены обширные экспериментальные исследования, количественный и качественный анализ полученных данных, на основе которых обобщены и сделаны соответствующие выводы. В подготовке публикаций и патентов принимал основное участие сам автор, им лично были представлены полученные результаты на научно-практических конференциях.

Обоснование и достоверность

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. Полученные научные результаты проведенных экспериментов хорошо воспроизводимы, согласуются с теоретическими данными, сопоставимы с научными результатами других исследователей.

Структура и объем работы

Диссертационная работа содержит введение, 5 глав, выводы, список использованных источников и приложение. Общий объем работы составляет 164 страницы, включая 123 рисунка, 18 таблиц и библиографию из 198 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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. Рассмотрен процесс свободного СВС-сжатия, который включает 3 стадии: 1 – горение и формирование высокотемпературной слоистой композиции, 2 – теплообмен продуктов горения с титановой основой, 3 – сдвиговое деформирование и формирование слоистого композиционного материала. Для получения СКМ в условиях свободного СВС-сжатия на основе TiB/Ti и МАХ-фаз Ti_3AlC_2 и Ti_2AlC , в том числе с промежуточным интерметаллидным слоем Ti_xAl (где $x=1, 1.5, 3$), использовались порошковые смеси из исходных реагентов титана, бора, алюминия и углерода, массовое содержание которых представлено в таблице 1. В качестве компактных подложек были использованы титановые сплавы: α -сплав ВТ1-0 и $(\alpha+\beta)$ -сплав ВТ6. В качестве исходного порошкового слоя был использован титан марки ПТС-1 (99,1 %, 100 мкм, ТУ-14-22-57-92).

Таблица 1 – Содержание исходных компонентов в смеси

Обозначение состава	Содержание исходных элементов, масс. %			
	Ti	B	Al	C
TiB-20	85,3	14,7	-	-
TiB-30	87,1	12,9	-	-
TiB-40	89,0	11,0	-	-
64Ti-36Al	64	-	36	-
72Ti-28Al	72	-	28	-
84Ti-16Al	84	-	16	-
3Ti-1Al-2C	73,8	-	13,8	12,4
2Ti-1,5Al-1C	64,2	-	27,1	8,7

В третьей главе изучена взаимосвязь между структурой и свойствами слоистых композиционных материалов на основе TiB/Ti. Изучено влияние состава, относительной плотности каждого слоя и времени задержки перед прессованием на температурные профили, возникающие при горении и последующем сдвиговом деформировании, а также на температуру на границе металлокерамический слой/титановая подложка. К примеру, время задержки перед прессованием для состава TiB-30 (для исходной заготовки цилиндрической формы диаметром 30 мм, высотой 25 мм и массой 35 г), равное 3 с, является предельным (рисунок 1). При увеличении

этого времени температура на границе образец–подложка снижается ниже температуры плавления титановой подложки.

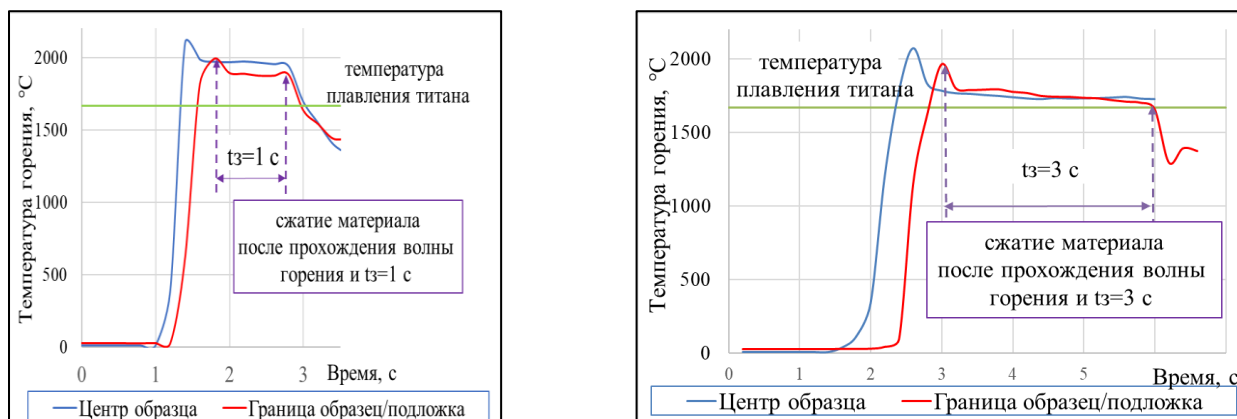


Рисунок 1 – Термограммы при проведении свободного СВС-сжатия, состав TiB-30

Методом свободного СВС-сжатия были получены СКМ габаритами от 10x10x2 до 55x90x(6–10) мм (рисунок 2), состоящие из металлокерамического слоя на основе TiB/Ti и титанового слоя (рисунок 3).

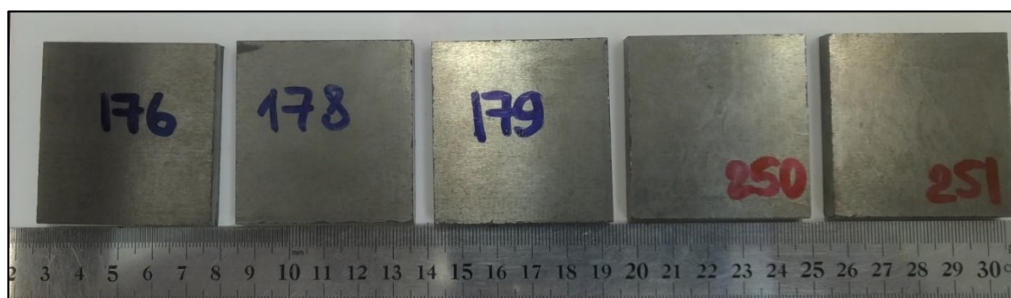


Рисунок 2 – Фото полученных образцов

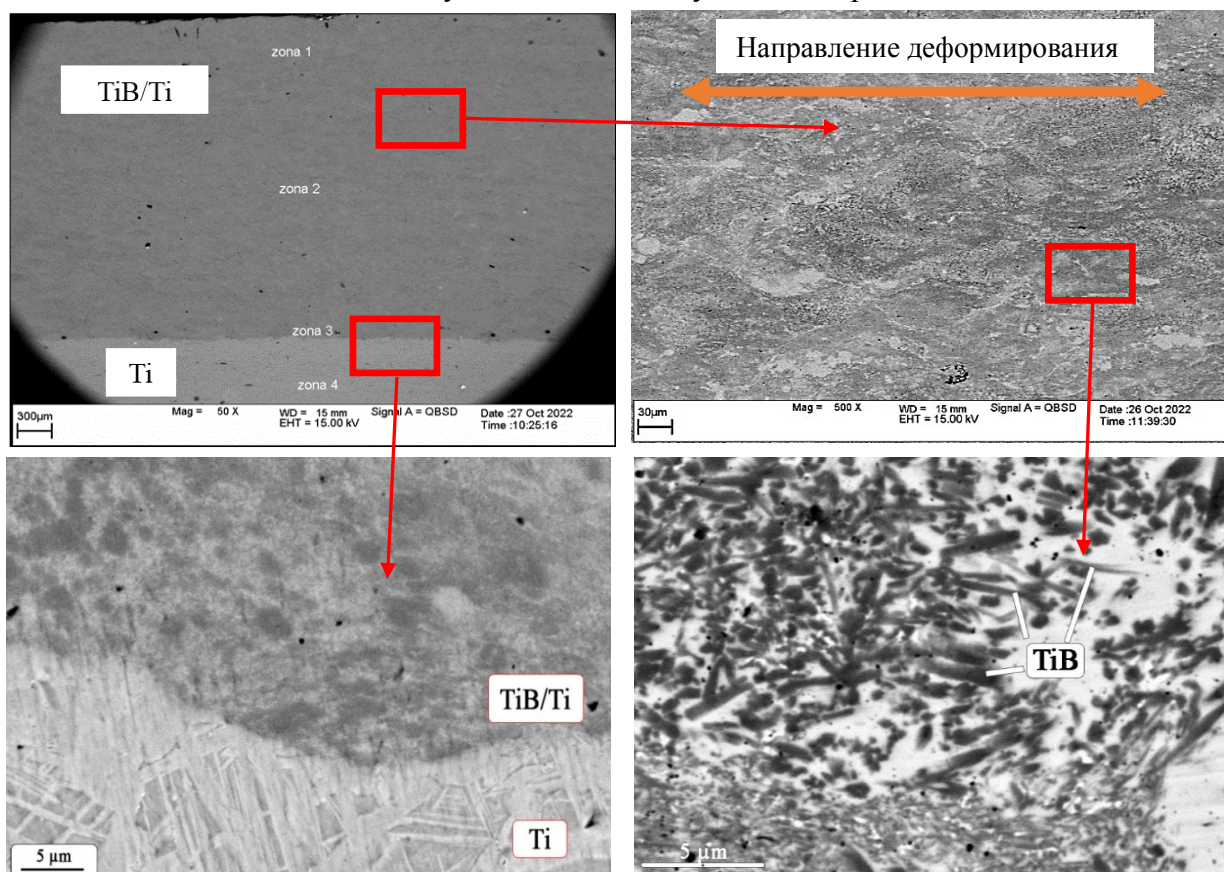


Рисунок 3 – Характерный вид СКМ TiB/Ti, состав TiB-40

Результаты рентгенофазового анализа показывают, что металлокерамический слой состоит из упрочняющей фазы TiB и титановой матрицы. Установлено, что размер вискеро TiB возможно регулировать от менее 1 мкм и до 10 мкм в зависимости от технологических режимов свободного СВС-сжатия. Преимущественная ориентация вискеро TiB находится вдоль направления деформирования синтезированного материала и перпендикулярна прикладываемой нагрузке. Граница раздела между металлокерамическим материалом и титаном имеет волнообразную структуру и «размытый» характер, что говорит о их хорошей адгезионной прочности между собой.

Было установлено, что время задержки перед приложением давления оказывает существенное влияние на размер вискеро TiB, что отражается на распределении микротвердости по высоте полученных СКМ. Было обнаружено, что при малых временах задержки плунжер прессы раньше контактирует с синтезированным материалом после прохождения волны горения, что приводит к образованию на поверхности композита упрочняющей фазы TiB с меньшим размером вискеро, что приводит к увеличению твердости полученного материала с 1600 до 1900 HV (рисунок 4). В результате получены СКМ с микротвердостью поверхности выше до 4,2 раза, чем микротвердость титановой основы.

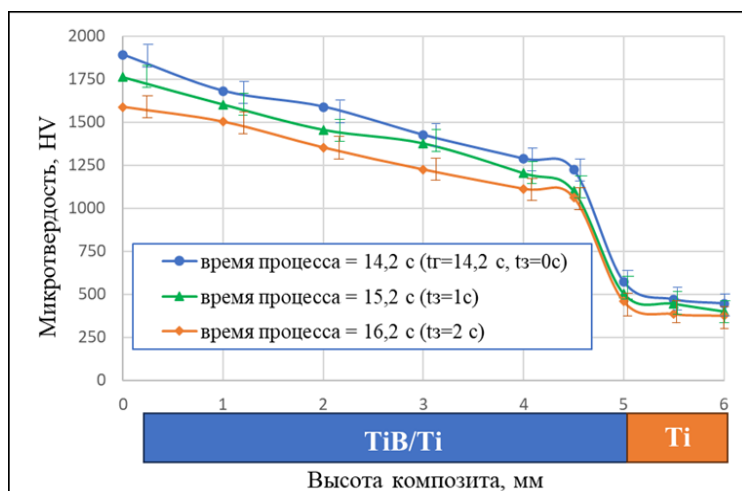


Рисунок 4 – Распределение микротвердости по высоте СКМ в зависимости от времени задержки, состав TiB-40

Были проведены трибологические исследования поверхности и поперечного сечения полученных СКМ трех составов (TiB-20, TiB-30, TiB-40) в зависимости от ориентации вискеро моноборида титана в объеме образца: тип 1 – параллельно нагрузке и перпендикулярно сдвиговому деформированию, тип 2 – перпендикулярно нагрузке и параллельно сдвиговому деформированию. Увеличение доли упрочняющей фазы TiB с 60 до 80 масс. % в СКМ приводит к повышению износостойкости в 4 раза для типа 1 образцов, и в 2,5 раза для типа 2, что говорит о влиянии ориентации вискеро в СКМ на трибологические характеристики. Также установлено, что для СКМ одного состава, образцы тип 1 имеют износостойкость и коэффициент трения выше, чем образцы тип 2.

В работе экспериментально было установлено влияние пропорции толщины слоев на предел прочности при трехточечном изгибе полученных СКМ на примере состава TiB-40. Для этих целей из полученных пластин при оптимальных режимах свободного СВС-сжатия методом электроэрозионной резки были получены образцы прямоугольного сечения размерами

7.1x3.95x(50–60) мм. Отношение высоты нижнего слоя (титановая подложка) к общей высоте экспериментальных образцов составило 0,12 – 0,51. При изучении структуры образца после испытания на трехточечный изгиб установлено, что трещина наблюдается только в металлокерамическом слое, а титановый слой не разрушился и имеет явный вид пластического деформирования (рисунок 5, а). Установленный характер разрушения образца, также подтверждается диаграммой нагружения при трехточечном изгибе (рисунок 5, б). На диаграмме видно (в качестве примера приведена диаграмма для образца № S3), что на 507 секунде резко снизилась нагрузка до 1 кН, что говорит о разрушении верхнего слоя образца. Далее нагрузка несколько повысилась и установилась на плато при 1,05 кН, что говорит о наступлении предела текучести титановой подложки.

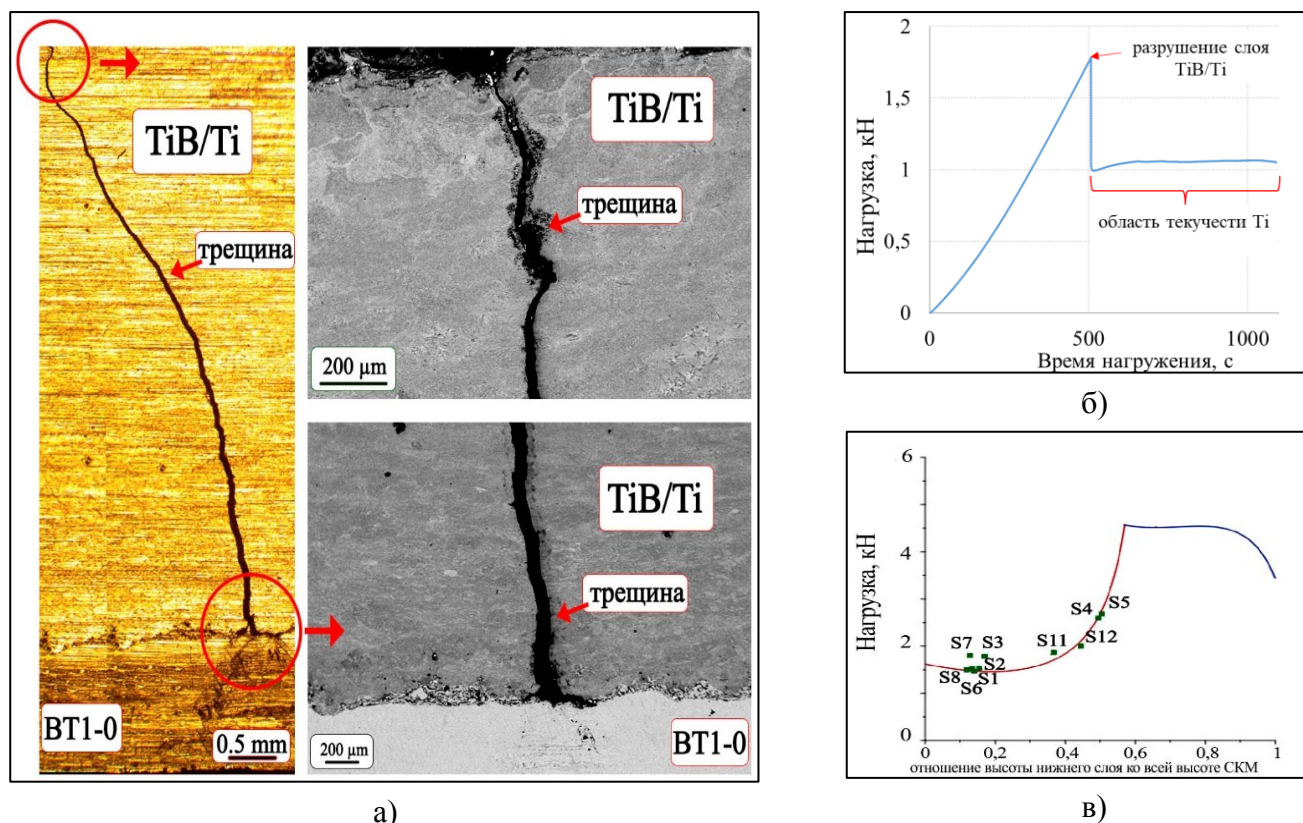


Рисунок 5 – (а) Трещина в СКМ после испытания на изгиб; (б) Диаграмма нагружения образца № S3; (в) Теоретическая зависимость максимальной нагрузки от отношения высоты нижнего слоя ко всей высоте СКМ и экспериментальные результаты для образцов № S1–S12

Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими расчетами (непрерывная кривая, рисунок 5 в [1]), на основе которых установлено, что для увеличения максимальной нагрузки при разрушении двухслойных образцов необходимо изготавливать образцы с отношением высот ближе к 0,6. Дальнейшее увеличение соотношения высоты слоев не приводит к существенному изменению предельной нагрузки.

Установлено, что с увеличением отношения высоты титанового слоя к общей высоте СКМ предел прочности повышается. Начиная с отношения высот равного 0,17, предел прочности полученных СКМ превышает прочность монолитного материала TiB/Ti (рисунок 6). Для соотношения высот равного 0,51 предел прочности полученного СКМ выше в 1,5 раза монолитного материала TiB/Ti. Установлено, что для состава TiB-40 с уменьшением времени задержки с 8,4 до 0 с предел прочности повышается до 1,3 раза. Это можно объяснить снижением

размера вискеров в полученном СКМ, что приводит к повышению его твердости и как следствие предела прочности.

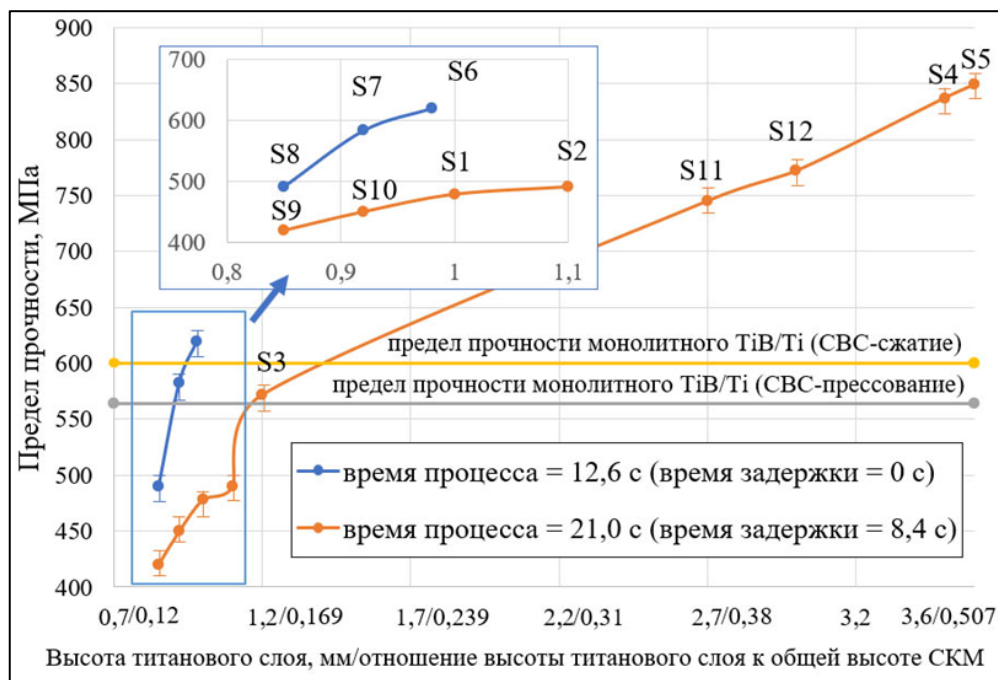


Рисунок 6 – Экспериментальные зависимости предела прочности при изгибе от времени задержки и соотношения высот слоев в СКМ

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). Промежуточный слой на основе алюминидов титана выбран из соображения наиболее близкого химического сродства с верхним слоем Ti-B и титановой основой, а также для улучшения адгезии слоев между собой. Были исследованы температурные профили, возникающие при горении и последующем деформировании, материалов на основе Ti-B/Ti-Al/Ti в условиях свободного СВС-сжатия. Исходные заготовки были цилиндрической формы диаметром 25 мм, общей высотой 13–25 мм (пропорция высот металлокерамического и интерметаллидного слоев составила 75/25) и массой 20–25 г. Установлено, что в условиях свободного СВС-сжатия температура и скорость горения верхнего слоя Ti-B снижается с увеличением доли свободного титана и со снижением относительной плотности (таблица 2). Так, например, для состава TiB-40 температура горения снижается с 1900 до 1350 °C со снижением относительной плотности с 0,6 до 0,35, а скорость горения снижается с 12,5 до 5,3 мм/с. Температура горения в интерметаллидном слое Ti-Al по мере снижения температуры горения в верхнем слое Ti-B также снижается, разница составляет до 250 °C (таблица 2). Верхний слой Ti-B выступает в роли химической печи, с увеличением энергии которой повышается температура горения слоя Ti-Al. С увеличением массовой доли титана и со снижением массовой доли алюминия в слое Ti-Al температура горения снижается за счет снижения экзотермичности самого состава (рисунок 7, а). При проведении свободного СВС-сжатия в момент приложения давления наблюдается резкое снижение температуры в исследуемых слоях, связанное с теплоотводом за счет контакта синтезированного материала с плунжером пресса (рисунок 7, б).

Таблица 2 – Температура горения слоев Ti-B и Ti-Al в зависимости от состава и относительной плотности

Состав слоя Ti-B	Относительная плотность	Температура горения слоя Ti-B, °C	Скорость горения, мм/с	Состав слоя Ti-Al		
				64Ti-36Al	72Ti-28Al	84Ti-16Al
				Температура горения слоя Ti-Al, °C		
TiB-20	0,42-0,6	1650-2300	21-25	1300-1550	1250-1450	1100-1350
TiB-30	0,4-0,6	1400-2100	15,5-22,5	1250-1400	1100-1250	1000-1250
TiB-40	0,35-0,6	1350-1900	5,3-12,5	1150-1350	1000-1150	950-1100

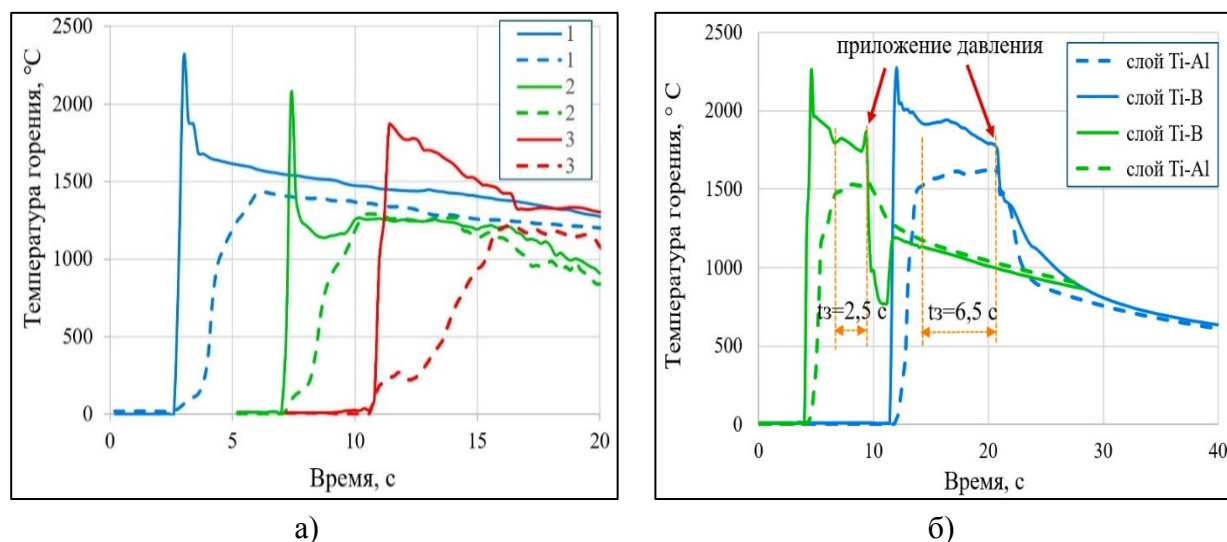


Рисунок 7 – Термограммы СВС процесса: а – без приложения давления, составы: 1– TiB-20/72Ti-28Al, 2 – TiB-30/72Ti-28Al, 3 – TiB-40/72Ti-28Al, б – с приложением давления, состав TiB20/64Ti-36Al

Для получения СКМ на основе TiB/Ti_xAl/Ti (где x=1, 1.5, 3) были подготовлены три типа составов, которые отличались содержанием исходных компонентов титана и алюминия в центральном (интерметаллидном) слое (таблица 3). За счет того, что скорость горения в металлокерамическом слое существенно выше, чем в интерметаллидном, то он при остывании теряет свои пластичные свойства гораздо быстрее. На основе проведенных предварительных работ было установлено, что металлокерамический слой Ti-B должен иметь относительную плотность 0,37, которая обеспечивает минимальную скорость горения этого слоя.

Таблица 3 – Состав шихтовых заготовок и параметры синтеза

Композит	Слой	Расчетный состав, масс. %	Относительная плотность	Температура горения, °C	Время процесса, с	Давление (P), МПа
А	верхний	89Ti-11B	0,37	1400	13,1	25
	центральный	64Ti-36Al	0,52	1250		
	нижний	Ti	-	-		
В	верхний	89Ti-11B	0,37	1400	18,0	25
	центральный	72Ti-28Al	0,46	1100		
	нижний	Ti	-	-		
С	верхний	89Ti-11B	0,37	1400	29,0	25
	центральный	84Ti-16Al	0,46	1000		
	нижний	Ti	-	-		

Методом свободного СВС-сжатия были получены слоистые композиты размерами 65×110×(8,4-9) мм, состоящие из трех основных макрослоев, соответствующих различным фазовым и структурным составляющим (рисунок 8). Поскольку состав верхних слоев в изучаемых композитах был одинаков, то в результате прямого химического взаимодействия избыточного титана с бором, в них образовалась фаза моноборида титана, расположенная в титановой матрице (рисунок 9, а). Особенности структуры этого слоя рассмотрены в главе 3.

Центральный (интерметаллидный) слой композита состава А имеет высоту 2,4-2,7 мм. Расчет велся на образование фазы TiAl, но условия эксперимента привели к образованию в этом слое основной фазы TiAl₃, расположенной в титановой матрице, а также формированию дополнительных фаз TiAl и Ti₃Al. Высота центрального слоя композита состава В составила 2,6-3 мм, который состоит из интерметаллидных фаз TiAl и Ti₃Al и в малом количестве TiAl₃. Высота центрального слоя композита состава С составила 2,4-2,5 мм, который состоит из двух интерметаллидных фаз TiAl и Ti₃Al. В переходной области Ti_xAl/Ti в композитах состава А, В и С, согласно концентрационным кривым химических элементов, наблюдается увеличение доли титана и снижение доли алюминия по мере приближения к титановой подложке. В условиях эксперимента происходит плавление алюминия в центральном слое. При приложении внешнего давления после прохождения волны горения, происходит жидко-твердофазное взаимодействие расплавленного алюминия с поверхностью титановой подложки и верхними слоями керамического слоя TiB. Это приводит к образованию в переходных областях интерметаллидов Ti_xAl с включениями свободного титана. Таким образом, реакционно-диффузионные процессы, протекающие на границе раздела, повышают адгезионную прочность между слоями Ti-B/Ti-Al и Ti-Al/Ti.

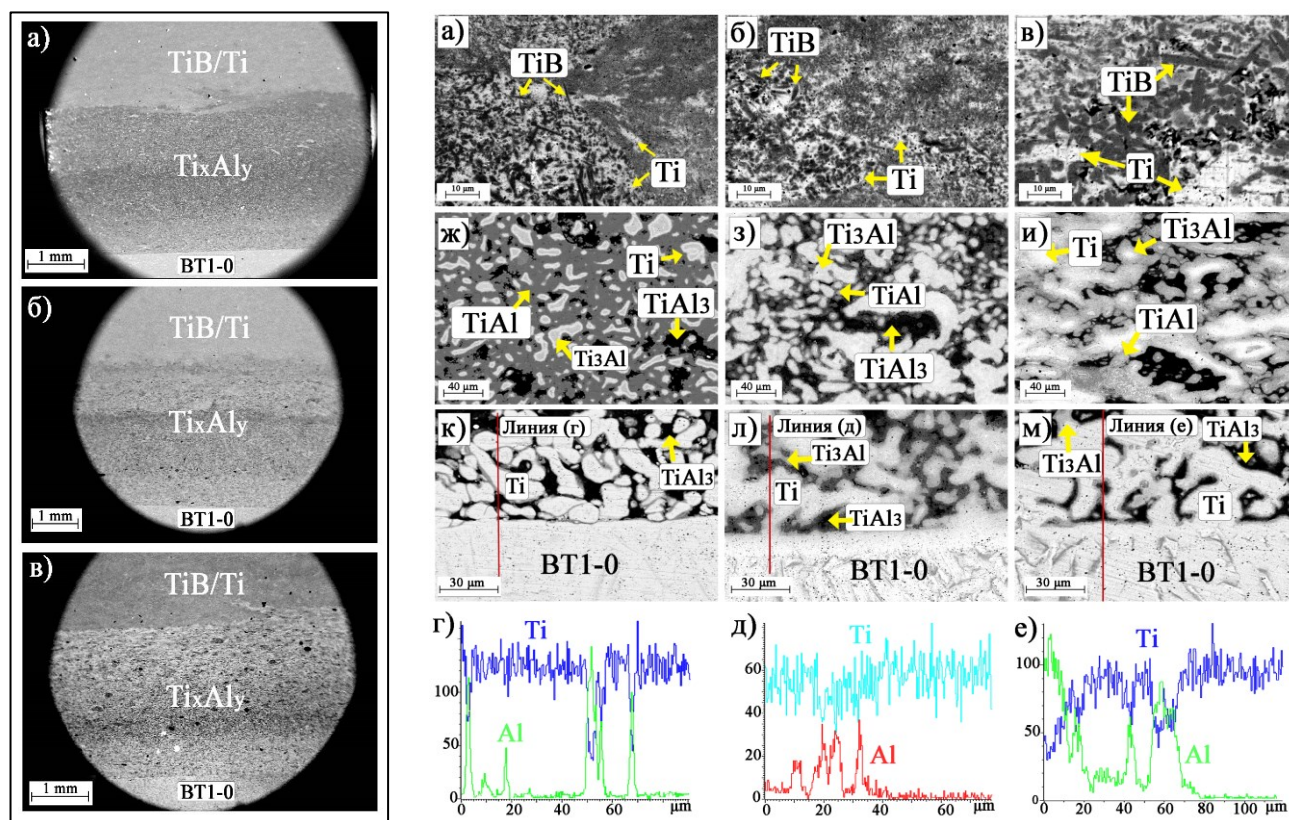


Рисунок 8 – Макро- и микроструктура СКМ с промежуточным интерметаллидным слоем:
а – 64Ti-36Al, б – 72Ti-28Al, в – 84Ti-16Al

На рисунке 9 (б) представлены результаты измерений механических характеристик полученных СКМ трех изучаемых составов TiB/Ti_xAl/Ti в каждом слое. Измерения показали, что у всех трех составов верхний керамический слой TiB/Ti имеет наибольшие значения твердости и далее по мере приближения к титановой подложке твердость снижается. При этом твердость верхних слоев выше для композита А и снижается для композитов В и С. Это подтверждает, что у композита А размер вискероов меньше по сравнению с композитами В и С. При малых временах задержки, вискеры TiB не успевают увеличиваться в размерах и их размеры меньше (до 12,5 раз по ширине), чем при больших временах задержки. При уменьшении размера вискероов TiB в композите, твердость керамического слоя увеличивается на 58 %. За счет образования между керамическим и интерметаллидными слоями переходных зон твердость снижается плавно без резких скачков от слоя к слою. Для композита состава А твердость центрального слоя ниже, чем для других композитов. Это обуславливается наличием в нем основной фазы TiAl₃ (до 72 масс. %). Наибольшая твердость (454 НВ) в центральном слое установлена для состава В, в котором находится наибольшее количество упрочняющей фазы Ti₃Al (до 55 масс. %). Установлено, что увеличение доли титана и снижение доли алюминия в исходной смеси в интерметаллидном слое и увеличение времени задержки приводит к повышению содержания доли фаз TiAl до 2,6 раза, Ti₃Al до 2,8 раз. Это повышает твердость интерметаллидных слоев с 300 до 450 НВ. Слои Ti во всех композитах имеют примерно одинаковые значения твердости. Аналогичные зависимости по измерению механических характеристик получены для каждого композита.

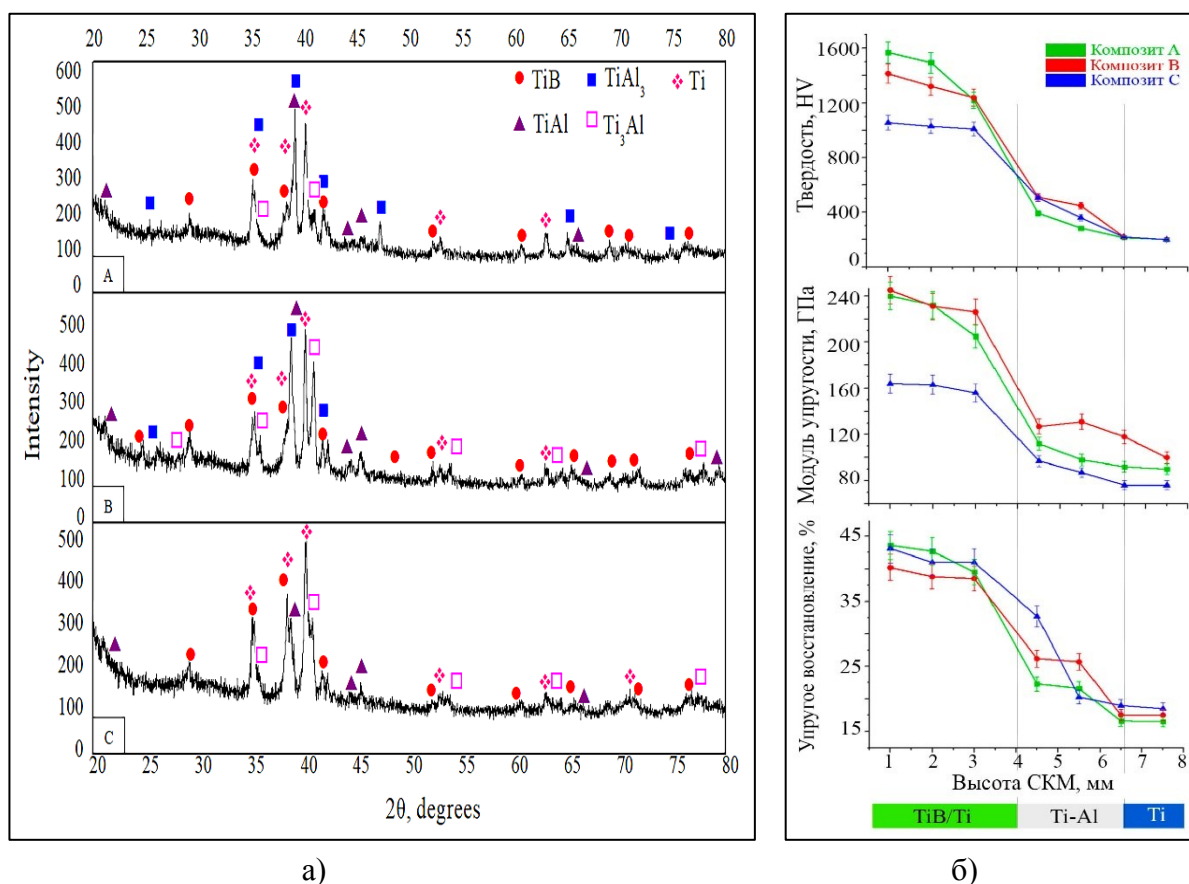
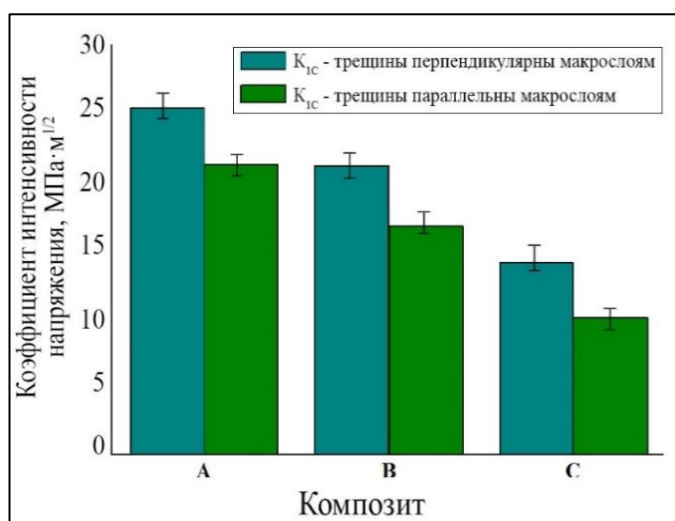


Рисунок 9 – (а) Результаты РФА; (б) Механические характеристики СКМ в зависимости от состава центрального слоя

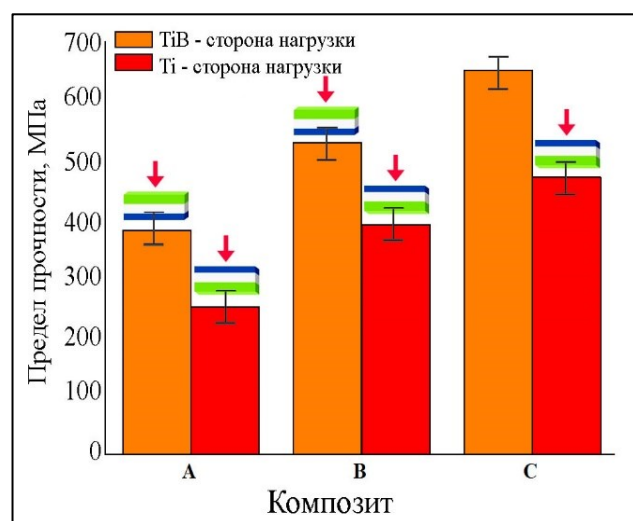
При индентировании каждого слоя было установлено, что при нагрузке 100 Н трещины образовались только в верхнем керамическом слое TiB/Ti. Поэтому коэффициенты интенсивности

напряжений (K_{IC}) были изучены для этих слоев (рисунок 10, а). В данной работе также установлено, что коэффициент интенсивности напряжений зависит от направления расположения макрослоев: трещины при индентировании распространяются перпендикулярно (параллельно прикладываемой нагрузке при СВС-сжатии) и параллельно (перпендикулярно прикладываемой нагрузке при СВС-сжатии) макрослоям. Установлено, что для изучаемых составов коэффициенты интенсивности напряжений выше при распространении трещин перпендикулярно макрослоям. В то время, как коэффициент интенсивности напряжений образцов с трещинами, распространенными параллельно образованному макрослою, ниже примерно на 20 %. С увеличением доли титана в изучаемых композитах, K_{IC} снижается. Максимальное значение K_{IC} составило $25,3 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ для композита А, в котором наблюдается наименьший размер вискеро-в TiB (до 200 нм). По мере увеличения размеров вискеро-в в керамическом слое его коэффициент интенсивности напряжений снижается.

Измерения предела прочности при трехточечном изгибе проводили при двух вариантах нагружения на образец: 1 – нагрузка прикладывалась со стороны керамического слоя TiB/Ti, 2 – нагрузка прикладывалась со стороны титановой подложки (рисунок 10, б). Установлено, что с увеличением доли титана в среднем слое прочность на изгиб у композитов повышается. При этом видно, что при прикладывании нагрузки со стороны керамического слоя TiB/Ti, прочность композита выше. Это можно объяснить возникающим напряжённым состоянием в каждом слое при деформировании и формированием различного фазового состава и структуры в полученных композитах. Как было показано выше, с увеличением содержания титана в среднем слое снижается содержание фазы $TiAl_3$ и повышается содержание фаз $TiAl$ и Ti_3Al . Фазы $TiAl$ и Ti_3Al являются дисперсными упрочнителями в композитах, за счет чего повышается их твердость и прочность. Установлено, что композит В обладает наибольшей твердостью по сравнению с композитом С, при этом его прочность несколько ниже за счет повышения хрупкости. Таким образом для материалов на основе Ti-Al существует оптимальное соотношение фаз $TiAl$, $TiAl_3$ и Ti_3Al в композите и их состав возможно регулировать технологическими режимами процесса.



а)



б)

Рисунок 10 – Экспериментальные зависимости: а – коэффициент интенсивности напряжений, б – предел прочности при трехточечном изгибе

В пятой главе были разработаны и получены СКМ на основе МАХ-фаз системы Ti-Al-C на титановой основе. Установлено, что для состава 3Ti-1Al-2C температура горения составила $T_r - 2291 \pm 5$ °С, скорость горения $U_r - 8 \pm 2$ мм/с; для состава 2Ti-1,5Al-1C температура горения $T_r - 1758 \pm 5$ °С, скорость горения $U_r - 4 \pm 2$ мм/с. Исходя из этого, можно сделать вывод, что с увеличением доли титана растет температура горения и, как следствие, скорость горения систем на основе МАХ-фаз, что говорит о преобладающей роли взаимодействия титана и углерода с точки зрения тепловыделения на начальном этапе реакции фазообразования. При горении составов 3Ti-1Al-2C и 2Ti-1,5Al-1C показано, что поверхностные слои титановой подложки плавятся, что указывает на возможность протекания диффузионных и конвективных процессов на границе металлокерамический материал – титановая подложка и получения качественного слоистого композиционного материала на основе МАХ-фазы состава Ti – Al – C при малых давлениях.

Согласно результатам РФА (рисунок 11) у полученных материалов (состав 2Ti-1,5Al-1C) в результате синтеза и последующего сдвигового деформирования образуются две МАХ-фазы: Ti_3AlC_2 и Ti_2AlC с общим количеством 85 масс. % для времени задержки 5 с. Помимо МАХ-фаз, обнаружены карбидная TiC и интерметаллидная $TiAl_3$ фазы. При сравнении с материалом, полученным при меньшем времени задержки (рисунок 11, а), обнаружено, что общая доля МАХ-фаз снижается до 70 %, при этом доля Ti_2AlC увеличивается до 10 масс. %. С увеличением времени задержки доля карбидной фазы снижается примерно в 2,5 раза – до 8 масс. %. Установлено, что при увеличении времени задержки происходит образование интерметаллида $TiAl_3$ вместо метастабильной фазы Ti_5Al_{11} . Таким образом, время задержки перед прессованием является наиболее важным технологическим параметром, определяющим конечный фазовый состав изучаемых материалов.

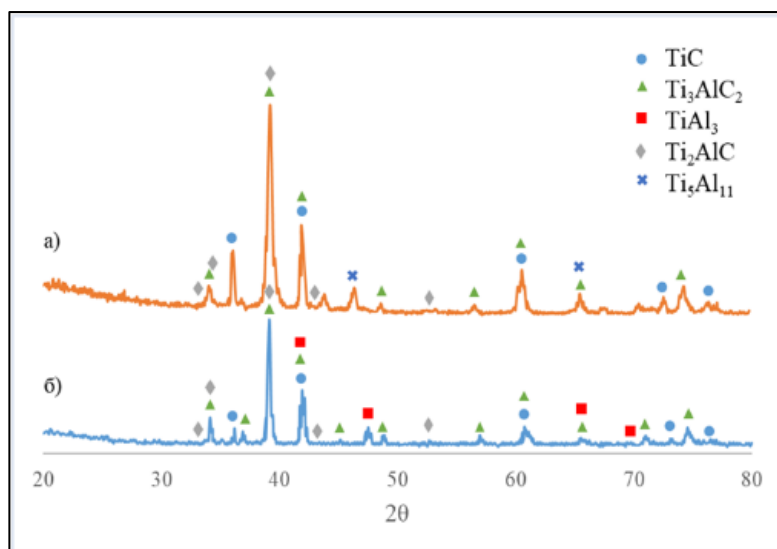


Рисунок 11 – Результаты РФА СКМ состава 2Ti-1,5Al-1C, полученного при времени задержки, с:
а – 1, б – 5

На рисунке 12 а представлена верхняя часть слоя синтезированного СКМ. Структура данной области представляет собой МАХ-фазы двух стехиометрий Ti_3AlC_2 и Ti_2AlC , которые имеют характерную пластинчатую форму со средней длиной 8,6 мкм и диаметром 0,8 мкм. Кроме того, наблюдаются округлые включения TiC размером до 0,74 мкм, которые расположены в

матричной фазе алюминид титана Ti_5Al_{11} (более темные области). Содержание карбидных частиц обусловлено тем, что из-за контакта синтезированного материала с плунжером прессы увеличиваются потери тепла при прессовании и сокращается время пребывания синтезированного материала при температуре формирования МАХ-фаз (1350 – 1500 °С). Для нижних слоев потери тепла снижаются, в результате чего время пребывания синтезированного материала при температуре образования МАХ-фазы увеличивается, что приводит к повышению доли МАХ-фазы в слоистом композиционном материале (рисунок 12, б). К тому же размер зерен МАХ-фаз уменьшается до $3,3 \times 0,4$ мкм. Существенное влияние на размер МАХ-фаз оказывает время задержки перед приложением давления. Так при времени задержки 1 с размер пластинчатых зерен МАХ-фазы составил $8,6 \times 0,8$ мкм, а при увеличении времени задержки до 5 с их размер составил до $10,5 \times 1,6$ мкм. С увеличением времени задержки кондуктивный отвод тепла снижается за счет более позднего контакта с плунжером прессы, что приводит к росту зерен.

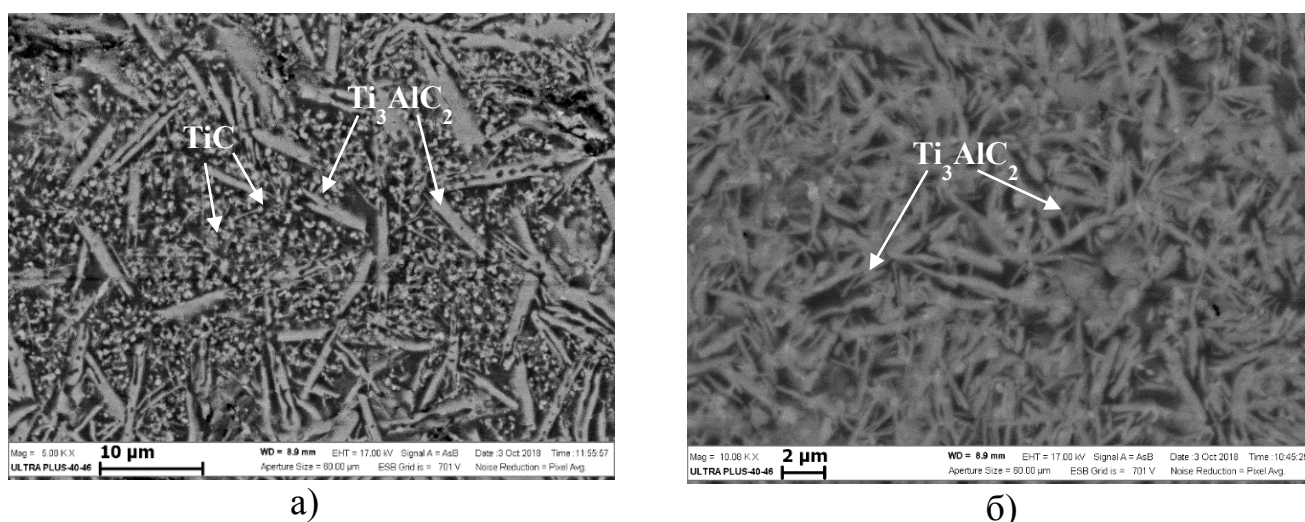


Рисунок 12 – Микроструктура слоистого композиционного материала: а – верхняя область, б – средняя область (состав $2Ti-1,5Al-1C$)

На рисунке 13 приведены переходные зоны в СКМ/подложка в зависимости от времени задержки перед приложением давления. Согласно результатам энергодисперсионного анализа, стехиометрические соотношения полученных интерметаллидов соответствуют фазам $TiAl_2$ – $TiAl_3$. Поскольку температура горения выбранного состава составила 1758 °С, то процесс синтеза протекает через плавление исходных порошков титана и алюминия, которые образуют между собой интерметаллид алюминид титана. Расплавленные продукты синтеза под действием силы гравитации стремятся к подложке, поверхность которой, также находится в расплавленном состоянии и в последствии кристаллизуются. Таким образом, вблизи титановой подложки наблюдается максимальное содержание интерметаллидов. Также наблюдаются в незначительном количестве пластинчатые зерна МАХ-фаз. Размер переходной зоны можно регулировать временем задержки перед приложением давления с 30 до 80 мкм. Характерной особенностью материала, полученного с увеличенным временем задержки (5 с), по сравнению с материалом, полученным при времени задержки 1 с, является в большем количестве расплавление поверхности титановой подложки за счет более длительного времени ее контакта со сгоревшей заготовкой. При приложении давления частично расплавленный титан перемещается в поровое пространство

синтезированного материала, что подтверждается концентрационными кривыми. Учитывая, что в зоне расплава титана в избытке, после кристаллизации он остается в виде округлых включений со средними размерами 8 мкм, по границам которых расположен алюминий.

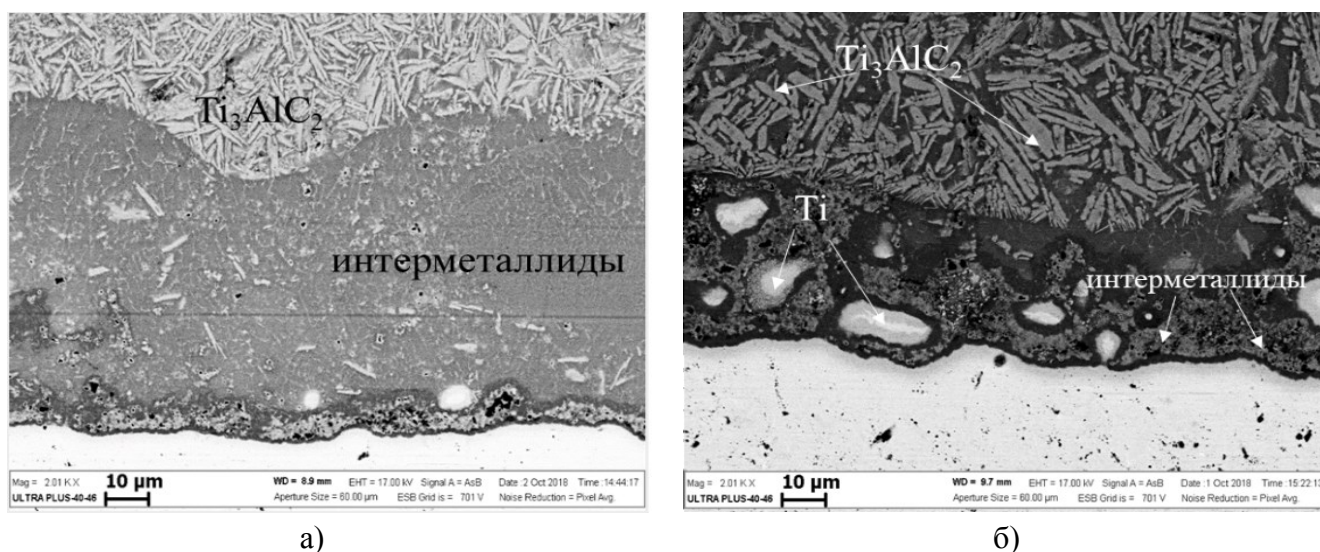


Рисунок 12 – Микроструктура переходной области, где: а – время задержки 1 с, б – время задержки 5 с (состав 2Ti-1,5Al-1C)

Было изучено влияние времени задержки на результаты значений модуля Юнга и микротвердости полученных СКМ. Установлено, что для образцов, полученных при меньшем времени задержки (1 с), усредненные значения механических характеристик составляют: микротвердость 963,7 HV, модуль Юнга 246,5 ГПа. Данные показатели выше по сравнению с образцами, полученными при большем времени задержки (5 с): микротвердость 877,6 HV, модуль Юнга 189,5 ГПа, что подтверждает увеличение содержания упрочняющей карбидной фазы TiC на поверхности композиционного материала. Учитывая, что микротвердость MAX-фазы Ti_3AlC_2 составляет 346 HV, то у полученного слоистого композиционного материала микротвердость повысилась более чем в 2,5 – 2,7 раза.

Общие результаты и выводы по работе

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), а также при использовании исходного слоя титана в виде порошка.

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. Впервые 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

монолитного материала TiB/Ti. Максимальное повышение прочности полученных СКМ по сравнению с монолитными материалами составило до 1,5 раза для соотношения высот равного 0,51.

4. Впервые была 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). Выявлено, что при горении и высокотемпературном сдвиговом деформировании, путем изменения состава шихты и условий синтеза, возможно получать МАХ-фазы с заданной стехиометрией Ti_2AlC и Ti_3AlC_2 и размером зерна, дополнительно *in situ* упрочненные карбидными и интерметаллидными частицами.

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. Впервые 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 10x10x2 до 65x110x(6–10) мм.

Публикации по теме диссертации:

1. Khvostunkov, K. Influence of Layer-Thickness Proportions and Their Strength and Elastic Properties on Stress Redistribution during Three-Point Bending of TiB/Ti-Based Two-Layer Ceramics Composite / K. Khvostunkov, P. Bazhin, Q. Q. Ni, **A. Bazhina**, A. Chizhikov, A. Konstantinov // *Metals*. – 2023. – Т. 13. – С. 1480. DOI: 10.3390/met13081480.

2. **Bazhina, A.** Structure, phase composition and mechanical characteristics of layered composite materials based on TiB/xTi-Al/ α -Ti ($x = 1, 1.5, 3$) obtained by combustion and high-temperature shear deformation / A. Bazhina, A. Chizhikov, A. Konstantinov, N. Khomenko, P. Bazhin, V. Avdeeva, O. Chernogorova, E. Drozdova // *Materials Science and Engineering: A*. – 2022. – Т. 858. – С. 144161. DOI: 10.1016/j.msea.2022.144161.

3. **Bazhina, A. D.** Materials based on the MAX phases of the Ti-Al-C system obtained under combustion and high-temperature shear deformation / A. D. Bazhina, A. S. Konstantinov, A. P. Chizhikov, V. V. Avdeeva, P. M. Bazhin // *Materials Letters*. – 2022. – Т. 318. – С. 132196. DOI: 10.1016/j.matlet.2022.132196.

4. **Bazhina, A.** Structure and mechanical characteristics of a layered composite material based on TiB/TiAl/Ti / A. Bazhina, A. Konstantinov, A. Chizhikov, P. Bazhin, A. Stolin, V. Avdeeva // *Ceramics International*. – 2022. – Т. 48. – № 10. – С. 14295–14300. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.01.318.

5. **Прокопец (Бажина), А. Д.** Строение и механические характеристики слоистого композиционного материала на основе МАХ-фазы Ti_3AlC_2 , полученного методом свободного СВС-сжатия / А. Д. Прокопец (Бажина), П. М. Бажин, А. С. Константинов, А. П. Чижиков, П. А.

Столин // Неорганические материалы. – 2021. – Т. 57. – № 9. – С. 986–990. DOI: 10.31857/S0002337X2109013X.

Prokopets (Bazhina), A. D. Structure and Mechanical Characteristics of a Laminated Ti_3AlC_2 MAX Phase-Based Composite Material Prepared by a Free Self-Propagating High-Temperature Synthesis Compression Method / A. D. Prokopets (Bazhina), P. M. Bazhin, A. S. Konstantinov, A. P. Chizhikov, P. A. Stolin // *Inorganic Materials*. – 2021. – Т. 57. – С. 937–941. DOI: 10.1134/S0020168521090132.

6. **Prokopets (Bazhina), A. D.** Structural features of layered composite material $TiB_2/TiAl/Ti_6Al_4$ obtained by unrestricted SHS-compression / A. D. Prokopets (Bazhina), P. M. Bazhin, A. S. Konstantinov, A. P. Chizhikov, M. S. Antipov, V. V. Avdeeva // *Materials Letters*. – 2021. – Т. 300. – С. 130165. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130165.

7. Bazhin, P. M. Laminated cermet composite materials: The main production methods, structural features and properties (review) / P. M. Bazhin, A. S. Konstantinov, A. P. Chizhikov, A. I. Pazniak, E. V. Kostitsyna, **A. D. Prokopets (Bazhina)**, A. M. Stolin // *Ceramics International*. – 2021. – Т. 47. – № 2. – С. 1513–1525. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.08.292.

8. Bazhin, P. M. $TiB_2/30$ wt.% Ti layered composite material obtained by free SHS compression on a Ti_6Al_4V titanium alloy / P. M. Bazhin, A. P. Chizhikov, A.S. Konstantinov, **A. D. Prokopets (Bazhina)**, E. V. Kostitsyna, A. V. Bolotskaya, A. M. Stolin, N. Yu. Khomenko // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Т. 848. – С. 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/848/1/012009.

9. **Прокопец (Бажина), А. Д.** Закономерности формирования структуры градиентных композиционных материалов на основе MAX-фазы Ti_3AlC_2 на титане / А. Д. Прокопец (Бажина), А. С. Константинов, А. П. Чижиков, П. М. Бажин, А. М. Столин // *Неорганические материалы*. – 2020. – Т. 56. – № 10. – С. 1145–1150. DOI: 10.31857/S0002337X20100127.

Prokopets (Bazhina), A. D. General Trends of Structure Formation in Graded Composite Materials Based on the Ti_3AlC_2 MAX Phase on Titanium / A. D. Prokopets (Bazhina), A. S. Konstantinov, A. P. Chizhikov, P. M. Bazhin, A. M. Stolin // *Inorganic Materials*. – 2020. – Т. 56. – С. 1087–1091. DOI: 10.1134/S002016852010012X.

10. Аверичев, О. А. Структурообразование слоистых керамических материалов $Ti/Ti-Al-C$, полученных методом свободного СВС-сжатия / О. А. Аверичев, **А. Д. Прокопец (Бажина)**, П. А. Столин // *Новые огнеупоры*. – 2019. – №4. – С. 57–60. DOI: 10.17073/1683-4518-2019-4-57-60.

Averichev, O. A. Structure Formation in $Ti/Ti-Al-C$ Layered Ceramic Materials Obtained by the Method of Unconfined SHS Compaction / O. A. Averichev, **A. D. Prokopets (Bazhina)**, P. A. Stolin // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2019. – Т. 60. – С. 219–222. DOI: 10.1007/s11148-019-00339-5.

11. Бажин, П. М. Особенности строения слоистых композиционных материалов на основе боридов титана, полученных методом свободного СВС-сжатия / П. М. Бажин, А. М. Столин, А. С. Константинов, А. П. Чижиков, **А. Д. Прокопец (Бажина)**, М. И. Алымов // *Доклады академии наук*. – 2019. – Т. 488. – № 3. – С. 263–266. DOI: 10.31857/S0869-56524883263-266.

Bazhin, P. M. Structural Features of Titanium Boride-Based Layered Composite Materials Produced by Free SHS Compression / P. M. Bazhin, A. M. Stolin, A. S. Konstantinov, A. P. Chizhikov, **A. D. Prokopets (Bazhina)**, M. I. Alymov // *Doklady Chemistry*. – 2019. – Т. 488. – С. 246–248. DOI: 10.1134/S0012500819090039.

Патенты:

1. **Бажина А.Д.**, Столин П.А., Столин А.М., Бажин П.М. «Способ получения градиентных материалов на основе МАХ-фаз системы Ti-Al-C», патент РФ на изобретение № 2786628 от 22.12.2022 г.

2. Бажин П.М., Константинов А.С., **Прокопец А.Д. (Бажина А.Д.)**, Столин А.М. «Способ получения слоистых металлокерамических композиционных материалов», патент РФ на изобретение № 2754419 от 02.09.2021 г.