

На правах рукописи



Лазуренко Дарья Викторовна

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ С ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ**

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор **Батаев Анатолий Андреевич**

Официальные оппоненты:

Гуревич Леонид Моисеевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», кафедра «Материаловедение и композиционные материалы», заведующий кафедрой;

Прибытков Геннадий Андреевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физики наноструктурированных функциональных материалов, главный научный сотрудник;

Имаев Валерий Мазитович, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук, лаборатория 07 «Металловедение труднодеформируемых сплавов», главный научный сотрудник, заведующий лабораторией.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Защита диссертации состоится «18» декабря 2020 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.13 в Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и на сайте организации www.nstu.ru.

Автореферат разослан « » октября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических
наук, доцент



Андрей Геннадиевич Тюрин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В последние десятилетия непрерывно возрастает интерес к интерметаллидам и сплавам на их основе, что обусловлено огромным потенциалом ряда этих материалов при изготовлении конструкций, эксплуатирующихся в тяжелых условиях внешнего нагружения, в том числе при высокотемпературном воздействии. Особый интерес представляют алюминиды титана, обладающие низкой плотностью и высокой удельной прочностью. Однако, в диапазоне нормальных температур для алюминидов титана, как и для большинства интерметаллидов, характерна повышенная хрупкость, в значительной мере ограничивающая область их применения и технологические возможности изготовления изделий из них.

В настоящее время отечественными и зарубежными специалистами ведется активная работа по улучшению свойств сплавов на основе алюминидов титана. Предложенные технические решения направлены на повышение прочностных свойств материалов, трещиностойкости, стойкости к окислению и ползучести. В основе этих решений лежат различные подходы, в том числе связанные с легированием и термической обработкой сплавов. Их практическая реализация привела к разработке сплавов на основе алюминидов титана второго и третьего поколений, которые были успешно апробированы в условиях промышленного производства.

Однако, проблема низкотемпературной пластичности по-прежнему остается актуальной. В первую очередь, это относится к материалам на основе триалюминидов титана, выгодно отличающихся от других сплавов систем *Al-Ti* минимальной плотностью и максимальной стойкостью к окислению, но при этом практически лишенных запаса пластичности. Эффективным решением, обеспечивающим возможность использования интерметаллидов такого типа, является формирование на их основе композиционных материалов. Комбинирование высокопрочной составляющей с пластичной металлической матрицей позволяет в значительной степени компенсировать недостаток трещиностойкости материалов. Совмещение в одном объекте разнородных по составу и строению материалов позволяет формировать гетерофазные композиты, свойства которых существенно отличаются от свойств их составляющих.

К настоящему времени предложено множество способов комбинирования разнородных сплавов и подходов к проблеме упрочнения композиционных материалов на металлической и интерметаллидной основах. Поведение гетерофазных композиционных материалов в значительной мере определяется характером распределения упрочняющей фазы, ее объемной долей, а также структурно-фазовым состоянием отдельных составляющих. Интерметаллиды могут быть введены в металлическую матрицу в виде равномерно распределенных дисперсных частиц, прослоек, а также нанесены в качестве защитных покрытий на металлические подложки. Преимуществом структур слоистого типа, по сравнению с иными видами гетерофазных комбинированных материалов, является повышенный уровень трещиностойкости и демпфирующих свойств. При этом поиск эф-

фективных решений, связанных с изготовлением слоистых металл-интерметаллидных композитов, а также выбором наиболее рациональных структурных составляющих, обеспечивающих высокий комплекс свойств без повышения объемной доли металлической фазы, далек от завершения.

Анализ литературных данных свидетельствует о широких перспективах использования сплавов системы $Al-Ti$ в различных отраслях промышленного производства. Обоснование эффективных подходов к проблеме разработки материалов на основе алюминидов титана представляет собой актуальную научную задачу, варианты решения которой представлены в диссертационной работе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-33-70016 «*In situ* исследования возможностей производства композиционных материалов системы «титан – триалюминид титана» с модифицированной структурой интерметаллида с использованием метода дифракции рентгеновского синхротронного излучения» (2019-2021 гг.); гранта Президента РФ № 14.Z56.17.3251-МК «Структура и свойства многослойных композиционных материалов типа «металл-интерметаллид», упрочненных частицами B_4C , TiB_2 и TiC » (2017-2018 гг.); гранта РФФИ 15-38-20776 мол_a_вед «Синтез интерметаллидов на поверхности титановых сплавов при обработке порошковых композиций (Al , Ni , Fe , Cu) пучками электронов, выведенными в воздушную атмосферу» (2015-2016 гг.); гранта Президента РФ № 14.Z56.14.5482-МК «Научные и технологические основы формирования слоистых композиционных материалов типа « Al_3Ti-Al » и « Al_3Ti-Ti » с использованием технологии плазменного искрового спекания» (2014-2015 гг.); ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы», проект «Разработка технологии получения композитов типа "титан – алюминид титана – алюминий" сочетанием процессов сварки взрывом и термической обработки» (2011-2012 гг.); гранта Мэрии г. Новосибирска № 20-12 «Разработка слоистых композиционных материалов с повышенными показателями надежности с использованием технологии сварки взрывом сплавов на основе титана и алюминия» (2011 г.); в рамках базового финансирования НГТУ, проект № 11.7662.2017/БЧ «Синтез и исследование свойств многослойных металл-интерметаллидных композиционных материалов с аморфной, квазикристаллической и нанокристаллической структурой» (2017-2019 гг.); а также грантов на проведение зарубежных стажировок в Исследовательском центре им. Гельмгольца (г. Гестахт, Германия), предоставленных Немецкой службой академических обменов (DAAD) в 2016 г. и Фондом Гумбольдта в 2018-2021 гг.

Степень разработанности темы исследования

Активная разработка слоистых композиционных материалов на металлической основе началась в середине XX века. В Советском Союзе исследованиями в области слоистых композитов занимались специалисты Института электро-сварки им. Е.О. Патона, Московского института стали и сплавов, Волгоградского государственного технического университета, Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск) и многих других. Интерес к формированию структур такого типа обусловлен их повышенным, по сравнению с монолитными материалами, уровнем ударной вязкости и трещиностойкости, который

обеспечивается особенностями распространения трещин в слоистых композициях. Эти преимущества определяют тенденции в направлении разработки новых типов многослойных материалов, в том числе с интерметаллидным упрочнением. В последние десятилетия российские и зарубежные исследователи ведут активную работу по созданию металл-интерметаллидных композитов, исследованию их структуры и свойств. Значительный вклад в эту область исследований внесли Ю.П. Трыков, В.Г. Шморгун, Л. М. Гуревич, С.А. Зелепугин, Б.А. Гринберг, *K.S. Vecchio*, *A. Rohatgi*, *D.J. Harach*, *F. Foadian*, *J.G. Luo*, *G.R. Odette*, *K.T. Venkateswara Rao*, *L.M. Peng* и др. Особый интерес вызывают слоистые металл-интерметаллидные композиты системы «титан – алюминий», как материалы, характеризующиеся исключительными удельными свойствами. Несмотря на большое количество работ, посвященных получению композиций типа « $Ti-Al_3Ti$ » и исследованию их поведения в условиях внешнего нагружения, открытыми остаются проблемы выбора эффективной технологии изготовления материалов, оптимизации состава основных компонентов и добавок, улучшающих комплекс механических свойств. Слабо освещены проблемы модифицирования интерметаллидной составляющей, входящей в состав композиционных материалов как в качестве объемно-упрочняющей фазы, так и в виде поверхностных слоев.

Отдельную группу материалов, к которым привлечено внимание научного сообщества, представляют композиты на интерметаллидной основе, ориентированные на эксплуатацию при повышенных температурах. В качестве упрочняющей фазы таких материалов, как правило, используются керамические частицы. Однако вопросы, связанные с объемной долей, распределением таких частиц в интерметаллидной матрице, в литературе отражены слабо. Анализ работ, выполненных отечественными и зарубежными специалистами, свидетельствует о высоком потенциале алюминидов титана и сплавов на их основе и целесообразности проведения исследований, ориентированных на их разработку.

Объект исследований

Объектами исследований являются композиционные материалы с интерметаллидной составляющей, распределенной в виде включений и прослоек в многослойных материалах или в виде слоев на поверхностях металлических заготовок.

Предмет исследований

Предметом исследований являются структурно-фазовые превращения, происходящие при формировании интерметаллидных слоев в композиционных материалах, и оценка влияния интерметаллидной фазы на свойства композитов.

Цель и задачи исследований

Цель работы заключалась в научном обосновании технических решений по изготовлению слоистых композитов, установлении закономерностей образования интерметаллидных фаз систем « $Ti-Al$ » и « $Ti-Al-M$ » при формировании поверхностно легированных сплавов на основе титана и композиционных материалов слоистого типа на основе титана и алюминия и оценке вклада полученных интерметаллидов в комплекс механических и эксплуатационных свойств материалов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выявить особенности структурообразования при формировании многослойных композитов из разнородных материалов (сплавы на основе титана, алюминия, железа, меди, тантала, ниобия) методом сварки взрывом листовых заготовок и оценить вклад последующего нагрева на структурные преобразования в зоне границ раздела.

2. Исследовать особенности формирования интерметаллидов системы $Ti-Al$ в форме включений и прослоек и обосновать рациональные технические решения по формированию многослойных композиционных материалов типа « $Ti-Al_3Ti$ ».

3. С использованием метода дифракции рентгеновского синхротронного излучения в режиме *in situ* выявить наиболее эффективные стабилизаторы кубической модификации соединения Al_3Ti в условиях совместного нагрева чистых элементов. Оценить возможности повышения вязкости разрушения интерметаллидной составляющей композиционных материалов типа « $Ti-Al_3Ti$ » с модифицированной структурой ($L1_2$) триалюминид титана.

4. Оценить эффективность технических решений, основанных на упрочнении интерметаллидных сплавов системы $Ti-Al$ прослойками твердой фазы в виде керамических частиц с позиции улучшения механических и эксплуатационных характеристик материалов.

5. Изучить особенности формирования интерметаллидных сплавов системы « $Ti-Al$ » и « $Ti-Al-Nb$ » методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки на поверхности заготовок из технически чистого титана. Оценить свойства поверхностно легированных сплавов в условиях фрикционного воздействия и повышенных температур.

Научная новизна работы:

1. Основным технологическим параметром, определяющим скорость роста прослоек алюминидов титана в слоистых пакетах $Al-Ti$, в условиях твердофазного спекания является температура. Установлено, что ускорению процесса образования интерметаллидов способствуют микрообъемы со структурой стабильных и метастабильных соединений, а также пересыщенных твердых растворов. В присутствии расплава алюминия, возникающего при искровом плазменном спекании пакетов $Al-Ti$, влияние температуры неоднозначно. Растворение алюминия в титановом слое, прилегающем к границе раздела титана и триалюминид титана, препятствует росту толщины триалюминид титана при повышении температуры нагрева. К снижению толщины слоя Al_3Ti приводит также его взаимодействие с титаном, сопровождающееся формированием промежуточных прослоек из обогащенных титаном фаз.

2. В процессе синтеза композита типа « $Ti-Al_3Ti$ » при 830 °С выявлена возможность стабилизации триалюминид титана кубической ($L1_2$) модификации, обладающего повышенным уровнем вязкости разрушения, путем введения элементов, относящихся к группам переходных и благородных металлов. Показано, что в смесях нестехиометрического состава эффективность модификаторов с позиции формирования твердого раствора $Ti(Al_{1-x}M_x)_3$ кубической модификации

снижается в последовательности: *Zn, Cu, Ag, Au, Pd, Pt, Mn, Ni*. Введение в порошковые смеси *Fe, Co* и *Cr* образованием триалюминид титана кубической модификации при нагреве до 830 °С не сопровождается. Для стабилизации твердого раствора $Ti(Al_{1-x}M_x)_3$ предпочтительны элементы с температурой плавления ниже 1100 °С, не участвующие в образовании обогащенных алюминием тугоплавких двойных соединений.

3. С применением метода дифракции рентгеновского синхротронного излучения в режиме *in situ* впервые изучена последовательность реакций, развивающихся в тройных системах *Ti-Al-M* ($M = Cu, Fe, Co, Cr, Ni, Mn, Zn, Au, Ag, Pd, Pt$) при нагреве от комнатной температуры до 830 °С. Выявлены общие закономерности взаимодействия титана и алюминия с переходными элементами в процессе нагрева от комнатной температуры до 830 °С в зависимости от кристаллической решетки третьего компонента и температуры его плавления. Полученные закономерности легли в основу выбора температурно-временных условий формирования многослойного металл-интерметаллидного композита типа «*Ti-Ti(Al_{1-x}M_x)₃*» и элементов – стабилизаторов $L1_2$ твердого раствора.

4. Методом искрового плазменного спекания синтезирован новый тип многослойных композитов типа «титан – триалюминид титана» с интерметаллидной составляющей $L1_2$ модификации, стабилизированной медью. Стабилизация кубической модификации триалюминид титана, входящего в состав слоистого композита типа металл-интерметаллид, сопровождается более чем двукратным ростом трещиностойкости материала.

5. Установлено, что формирование методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки поверхностных слоев с составом, близким к промышленно используемым трехкомпонентным сплавам ($Ti-(42-48)Al+Nb$), сопровождается рядом неравновесных фазовых превращений, обусловленных высокой скоростью охлаждения наплавленного слоя. Ускоренная кристаллизация расплава приводит к подавлению $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения и фиксации в структуре сплавов преимущественно α_2 -фазы (Ti_3Al). При содержании ниобия от 8 до 14 ат. % в наплавленных слоях стабилизируется промежуточная в процессе $\beta(B2) \rightarrow \omega$ превращения ω' -фаза. В условиях кристаллизации сплавов с повышенным содержанием ниобия (20 ат. %) основной фазой является твердый раствор на основе α -*Ti*.

6. Методом дифракции рентгеновского синхротронного излучения в режиме *in situ* выявлена последовательность фазовых превращений, развивающихся при совместном нагреве порошковых смесей *Ti-Al* (50:50 ат. %) в диапазоне от комнатной температуры до 1250 °С. Данные синхротронных исследований легли в основу выбора температурно-временных параметров процесса получения композиционных материалов с интерметаллидной матрицей (γ -*TiAl*+ α_2 - Ti_3Al), армированной керамическими прослойками (TiB_2 и TiC). Скорость ползучести армированных керамикой композитов более чем на 2 порядка ниже по сравнению с γ -*TiAl*.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты проведенных в работе исследований расширяют представления о структурно-фазовых превращениях, происходящих при формировании

алюминидов титана в двух- и трехкомпонентных композиционных материалах типа «металл – интерметаллид», полученных путем искрового плазменного спекания металлических фольг и порошков. Выявлены эффективные модификаторы, позволяющие стабилизировать триалюминид титана с решеткой кубического типа, обладающий повышенным уровнем трещиностойкости. Полученные в работе данные объясняют характер структурных преобразований, развивающихся при формировании композитов в неравновесных условиях, а именно в процессах быстрого нагрева и охлаждения, реализуемых при поверхностной электронно-лучевой обработке и в условиях высокоскоростной деформации при сварке металлических материалов взрывом.

Предложенные в работе технические решения, основанные на сочетании интерметаллидных титан-алюминиевых слоев с α_2 - и $\alpha_2+\gamma$ -структурой с керамическими слоями TiB_2 , Ti_2AlC , на 2-3 порядка снижают скорость ползучести по сравнению со сплавами на основе $\gamma-TiAl$. Полученный результат соизмерим с данными, соответствующими сложнолегированным сплавам на основе алюминидов титана. На основе анализа различных технологических процессов выявлены эффективные технические решения, позволяющие существенно сократить длительность процессов получения композиционных материалов типа «титан – триалюминид титана». Результаты проведенных в работе исследований легли в основу эффективных технических решений по соединению разнородных материалов с использованием сваренных взрывом промежуточных вставок, на которые получены патенты Российской Федерации на изобретения.

Методология и методы исследования

Для формирования слоистых композиционных материалов и исследования их структуры и свойств было использовано современное технологическое и аналитическое оборудование. Эксперименты по получению композитов методами сварки взрывом и искрового плазменного спекания выполнены в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН; технологические эксперименты по поверхностной обработке металлических заготовок электронным лучом, выведенным в воздушную атмосферу, проведены в Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН. Для электронно-лучевой наплавки порошковых смесей использовали ускоритель электронов ЭЛВ-6. Искровое плазменное спекание металлических фольг реализовано на установке *Labox 1575* производства *SINTER LAND Inc.* с использованием графитовых пресс-форм.

При выполнении аналитических исследований материалов использовали оборудование центра коллективного пользования НГТУ, а также оборудование Исследовательского центра им. Гельмгольца (г. Гестахт, Германия). Структурные исследования проведены на оптических микроскопах *Carl Zeiss AXIO Observer A1m* и *Carl Zeiss AXIO Observer Z1m*, растровых электронных микроскопах *Carl Zeiss EVO 50 XVP* с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа *Oxford Instruments X-Act* и *LEO Gemini 1530*, просвечивающих электронных микроскопах *Philips CM200* и *Tecnai G2 20 TWIN*. Для оценки фазового состава использовали лабораторный рентгеновский дифрактометр *ARL X'TRA*. Ди-

фракционные исследования в режиме *in situ* проведены на немецком электронном синхротроне (*Deutsches Elektronen-Synchrotron – DESY*, г. Гамбург, Германия). Оценка механических свойств полученных материалов выполнена методами микроиндентирования с использованием полуавтоматического прибора *Wolpert Group 402 MVD*, растяжения и сжатия на универсальной сервогидравлической машине типа *Instron 3369*, ударного изгиба на маятниковых копрах *Metrocom* и *Instron Censt 9050*. Ползучесть материалов в условиях повышенных температур определяли на установке *SATEC mentor M3*. Жаростойкость оценивали в процессе окисления материалов в лабораторных печах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Локально распределенные зоны со структурой стабильных и метастабильных соединений, а также пересыщенных твердых растворов, неизбежно возникающие при сварке взрывом заготовок из титановых и алюминиевых сплавов, являются центрами зарождения триалюминид титана и способствуют резкому ускорению процесса формирования сплошных интерметаллидных слоев при отжиге сваренных взрывом пакетов.

2. Искровое плазменное спекание титановых и алюминиевых фольг при температурах, превышающих температуру плавления алюминия, является эффективным технологическим процессом формирования металл-интерметаллидных композитов типа «титан – триалюминид титана». Использование указанного подхода обеспечивает увеличение скорости роста интерметаллидных прослоек Al_3Ti и позволяет сократить процесс производства композита до 10 минут.

3. Эффективными стабилизаторами кубической модификации $L1_2$ триалюминид титана с повышенным уровнем трещиностойкости, входящего в состав композиционного материала типа «титан – интерметаллид», являются металлы с ГПУ и ГЦК решеткой, характеризующиеся температурой плавления ниже 1100 °С и не формирующие с алюминием тугоплавких двойных соединений.

4. Стабилизация кубической модификации триалюминид титана, входящего в состав слоистого композита типа «металл – интерметаллид», путем добавления в его состав меди сопровождается более чем двукратным ростом трещиностойкости материала.

5. Армирование интерметаллидной матрицы на базе сплавов состава Ti_3Al и $Ti_3Al-TiAl$ частицами твердой фазы (TiB_2 и Ti_2AlC) позволяет снизить скорость их ползучести до уровня сложнолегированных промышленных сплавов системы $Ti-Al$.

6. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка интерметаллидных слоев системы $Ti-Al$ и $Ti-Al-Nb$ на заготовки из технически чистого титана является эффективным решением по повышению износостойкости и высокотемпературных свойств их поверхностей. Регулировать отмеченные показатели можно путем изменения соотношения компонентов в наплавочной смеси.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность представленных результатов определяется использованием комплекса современных аналитических методов исследования структуры материалов и оценки их свойств, воспроизводимостью экспериментальных данных,

статистической обработкой результатов измерений, соответствием результатов исследований данным, полученным другими группами специалистов.

Результаты работы были представлены и обсуждены на Всероссийских и международных научных конференциях: «*Intermetallics*» в 2017 и 2019 гг. (г. Бад-Штаффельштайн, Германия); «*Explosive production of new materials: Science, Technology, Business, and Innovations*» (EPNM) в 2018 г. (г. Санкт-Петербург) и в 2016 г. (г. Коимбра, Португалия); IV Всероссийской конференции «Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» в 2018 г. (г. Москва); «Российской национальной конференции с международным участием по нанотехнологиям, наноматериалам и микросистемной технике» (НМСТ) в 2016 г. (г. Новосибирск); «*International conference on functional materials for frontier energy issues*» (ICFMFEI) в 2015 г. (г. Новосибирск); «*International conference on mechanical engineering, automation and control systems*» (MEACS) в 2015 г. (г. Томск); 19 SPS Forum: «*Japan-Russia workshop on advanced materials synthesis processes and nanostructures*» в 2014 г. (г. Сендай, Япония); международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении» в 2014 г. (г. Новосибирск); «*The 8 international forum on strategic technologies*» (IFOST) в 2013 г. (г. Улан-Батор, Монголия), Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» в 2010, 2011 и 2013 гг. (г. Новосибирск), XVI международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» в 2010 г. (г. Томск) и др.

Личный вклад автора

Результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором, либо в соавторстве с другими специалистами при его непосредственном участии. Личный вклад автора заключается в постановке целей, формулировании задач, проведении структурных исследований, оценке комплекса свойств материалов, обсуждении полученных данных, формулировании выводов, подготовке публикаций.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 45 печатных работ, из них 13 статей в журналах из перечня ВАК, 30 статей в зарубежных изданиях, цитируемых в базах *Scopus* и *Web of Science*, получено 2 патента на изобретение РФ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 418 наименований и 9 приложений. Общий объем диссертации составляет 421 страницу, включая 172 рисунка и 35 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, представлены теоретическая и практическая значимость, научная новизна работы, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Интерметаллиды и их роль в формировании новых материалов с особым комплексом физико-механических свойств» представлен литературный обзор по теме диссертационного исследования. Приведены общие сведения о строении интерметаллидов, особенностях их формирования в различных металлических системах. Особое внимание уделено промышленному применению интерметаллидов и сплавов на их основе. Анализ литературных данных показал, что с научной и практической точек зрения интерес вызывают алюминиды титана, обладающие низким удельным весом и повышенным комплексом эксплуатационных свойств.

Сплавы на основе алюминидов титана нашли применение в авиастроении, в частности для изготовления лопаток газотурбинных двигателей низкого давления. Однако недостаток пластичности при комнатной температуре ограничивает область их практического использования. В особенности это касается наименее плотного и наиболее твердого, жаростойкого алюминида титана Al_3Ti . Решением отмеченной проблемы является легирование интерметаллидов либо комбинирование их с вязкой металлической составляющей. В литературе широко обсуждаются вопросы по формированию на основе соединения Al_3Ti композитов со слоистой структурой и их преимуществах перед монолитными материалами с точки зрения ударной вязкости и вязкости разрушения.

Одним из наиболее подробно описанных в литературе методов производства слоистых композиционных материалов с интерметаллидной составляющей является реакционное спекание, которое заключается в совместном нагреве металлических фольг под давлением и длительной выдержке пакета. При этом эффективность данного метода невысока. Анализ научных публикаций, описывающих применение различных технологических процессов, используемых для формирования прослоек интерметаллида на границах раздела металлических слоев и на поверхностях металлических заготовок, показал, что наиболее эффективными являются высокоэнергетические методы обработки. С точки зрения производства многослойных материалов рационально использовать сварку взрывом, которая позволяет соединять различные, в том числе и трудносвариваемые материалы. В литературном обзоре отражены исследования, в которых данный метод используется как для получения металломатричных композитов, так и многослойных структур, содержащих интерметаллидную фазу. Альтернативные способы производства многослойных композитов, а также проблемы выбора оптимальных составов и режимов обработки слоистых заготовок, согласно литературным данным, проработаны недостаточно подробно.

На основе проведенного обзора была поставлена цель исследования и сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе «Формирование интерметаллидов в процессах получения биметаллов и композиционных материалов на металлической основе» приведен анализ особенностей образования интерметаллидов в многослойных материалах, полученных методом сварки взрывом.

На примере композиционных материалов, состоящих как из близких по химическому составу (пара титановых сплавов ВТ23 и ВТ14), так и из разнородных

материалов (композиции типа «титан – сталь», «титан – алюминий»), было показано, что при сварке взрывом в приграничных зонах соединяемых пластин развиваются процессы интенсивной пластической деформации, результатом которой является формирование вблизи границ раздела зеренно-субзеренной, ячеистой и полосовой дислокационной структуры, двойников деформации (рисунок 1) и, в случае сварки высокопрочных сплавов, полос локализации пластического течения (рисунок 2).

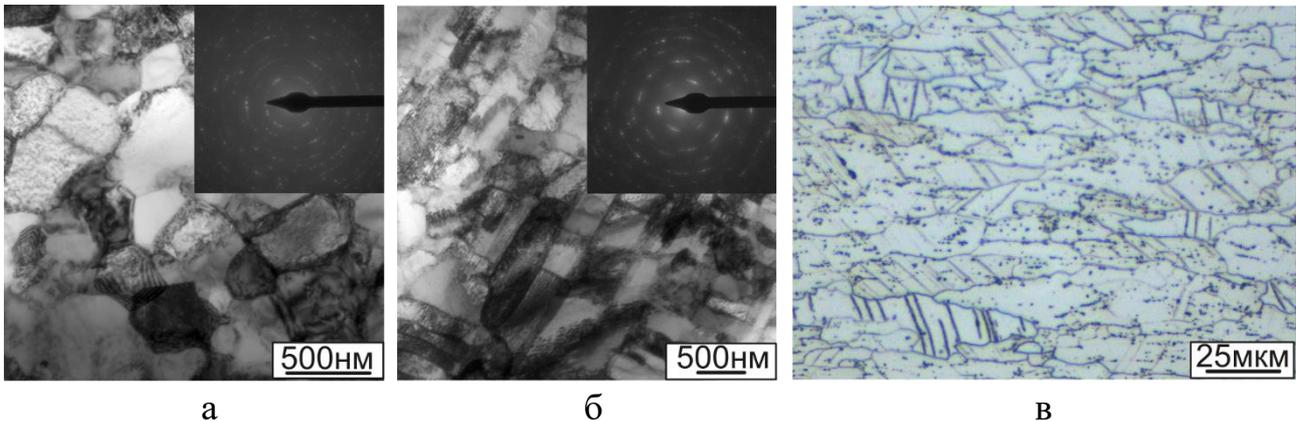


Рисунок 1 – Деформационные процессы в стали 08пс при сварке материалов взрывом, сопровождающиеся образованием ячеистой структуры (а), полосовой структуры (б), двойников деформации (в). а, б – просвечивающая электронная микроскопия, в – световая микроскопия

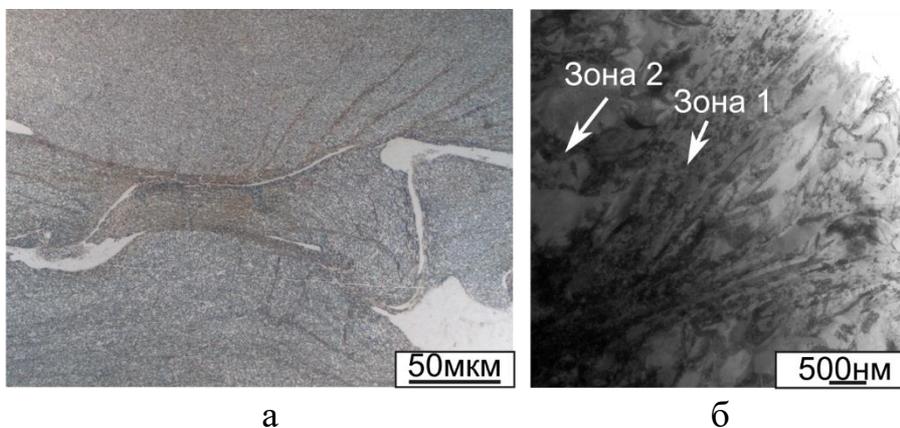


Рисунок 2 – Полосы локализации пластического течения в титановом сплаве ВТ23. а – световая микроскопия, б – просвечивающая электронная микроскопия. Зона 1 соответствует полосе локализации пластической деформации, зона 2 – слабо деформированному материалу

Высокоскоростная деформация сопровождается локальным перемешиванием, нагревом и переплавлением материалов. Зоны интенсивного перемешивания (вихревые построения) располагаются вблизи гребней и впадин волн, образующихся на границах сопряжения заготовок, и характеризуются формированием в них различного рода метастабильных

структур. При сварке однородных материалов в вихрях формируется мартенсит (рисунок 3, а), при соединении разнородных материалов (в частности титана и стали) – стабильные и метастабильные интерметаллиды, а также аморфные и квазикристаллические построения (рисунок 3, б).

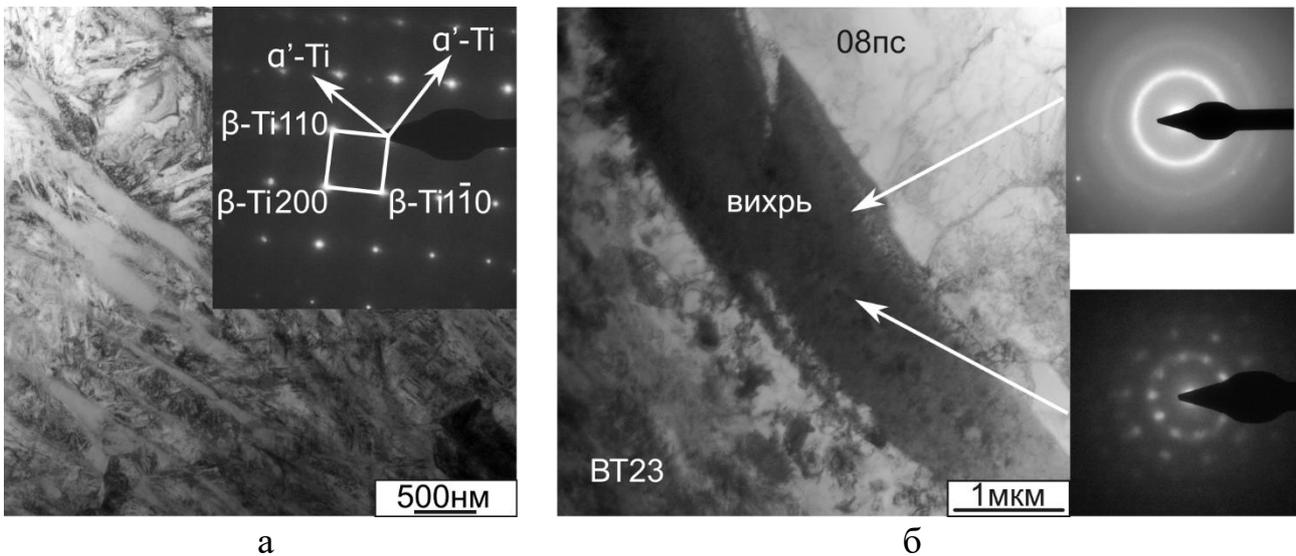


Рисунок 3 – Метастабильная структура вихревых зон. а – мартенсит в титановом сплаве ВТ23, б – аморфные и квазикристаллические построения на границе раздела титанового сплава ВТ23 и стали 08пс

Таким образом, сварка взрывом, хоть и не позволяет полностью избежать формирования охрупчивающих фаз, тем не менее с позиции минимизации их количества является более эффективным технологическим процессом по сравнению с диффузионной сваркой, при которой вдоль всего сварного шва формируется сплошной интерметаллидный слой. Эффективным решением, позволяющим полностью предотвратить образование химических соединений в локальных участках сварных швов между разнородными материалами, является использование промежуточных вставок.

При соединении заготовок из титана и стали в качестве промежуточных вставок были использованы пары «медь – тантал» и «медь – ниобий». Медная вставка приваривается к стальной заготовке, а танталовая или ниобиевая – к титановой. Выбор вставок такого типа обусловлен особенностями взаимодействия элементов в соответствующих системах. Медь с танталом / ниобием, взаимная растворимость которых друг в друге крайне мала, а склонность к формированию химических соединений отсутствует, при сварке взрывом образуют гетерофазные смеси с размерами частиц, соответствующими системам коллоидного типа (рисунок 4, а, б). Тонкие прослойки, содержащие наноразмерные частицы, возникают также при соединении меди со сталью (рисунок 4, в). Пары «титан – тантал» и «титан – ниобий» характеризуются неограниченной взаимной растворимостью элементов друг в друге и при сварке формируют диффузионные зоны.

Особое внимание уделялось формированию перспективных для авиационной многослойных композитов системы «титан – алюминий». Поскольку данная пара элементов проявляет повышенную склонность к формированию интерметаллидов, сварка взрывом является одним из редких способов формирования надежных соединений между титаном и алюминием. Одним зарядом взрывчатого вещества были получены композиции, состоящие из 23 и 41 поочередно расположенных пластин титана и алюминия. Верхние сварные швы, находящиеся вблизи слоя взрывчатого вещества, характеризовались формированием

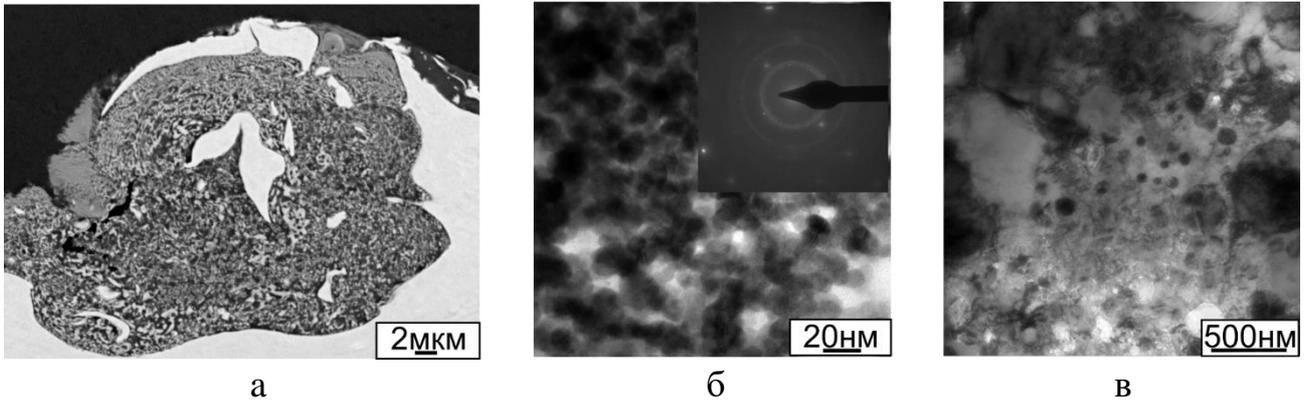


Рисунок 4 – Вихревые зоны, возникшие на границах раздела между танталом и медью (а, б) и танталом и железом (в)

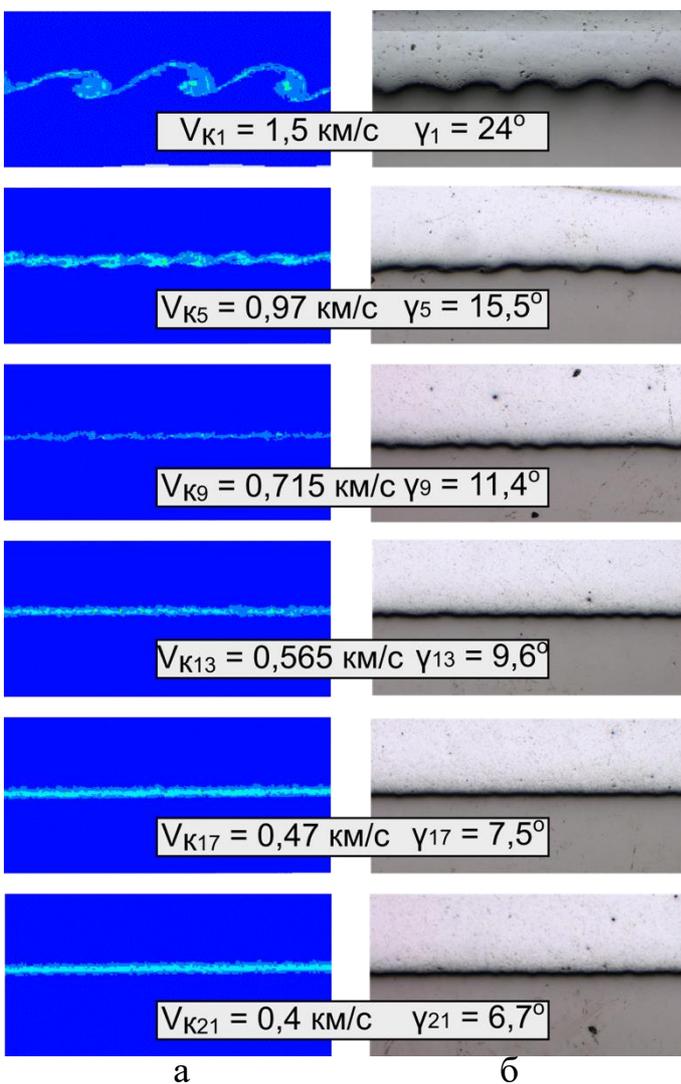


Рисунок 5 – Результаты численного моделирования (а) и металлографического анализа (б) различных сварных швов в композите типа «титан – алюминий»

наиболее развитых волнообразных границ раздела. По мере продвижения от верхних сварных швов к нижним морфология границ приближалась к прямолинейной. Эта особенность строения связана с изменением режимов соударения соседних пластин в направлении сверху вниз: углы соударения и скорости точек контакта заготовок постепенно снижаются, что приводит к уменьшению значений давления, температуры и степени деформации материалов в зоне взаимодействия (рисунок 5).

Наиболее нагруженные сварные швы, подвергшиеся максимальному температурному и деформационному воздействию, содержали большое количество явно выраженных вихрей. Тонкие структурные исследования вихревых зон позволили выявить метастабильную природу формирующихся в них фаз. Вихри содержали наноразмерные включения равновесных (Al_3Ti и $AlTi$) и неравновесных (Al_5Ti_3 , разупорядоченный $AlTi_3$) интерметаллидов, упорядоченные твердые растворы и участки с аморфным строением (рисунок 6). От окружающего материала вихри отличаются повышенным уровнем твердости ($\sim 600 HV$).

материала вихри отличаются повышенным уровнем твердости ($\sim 600 HV$).

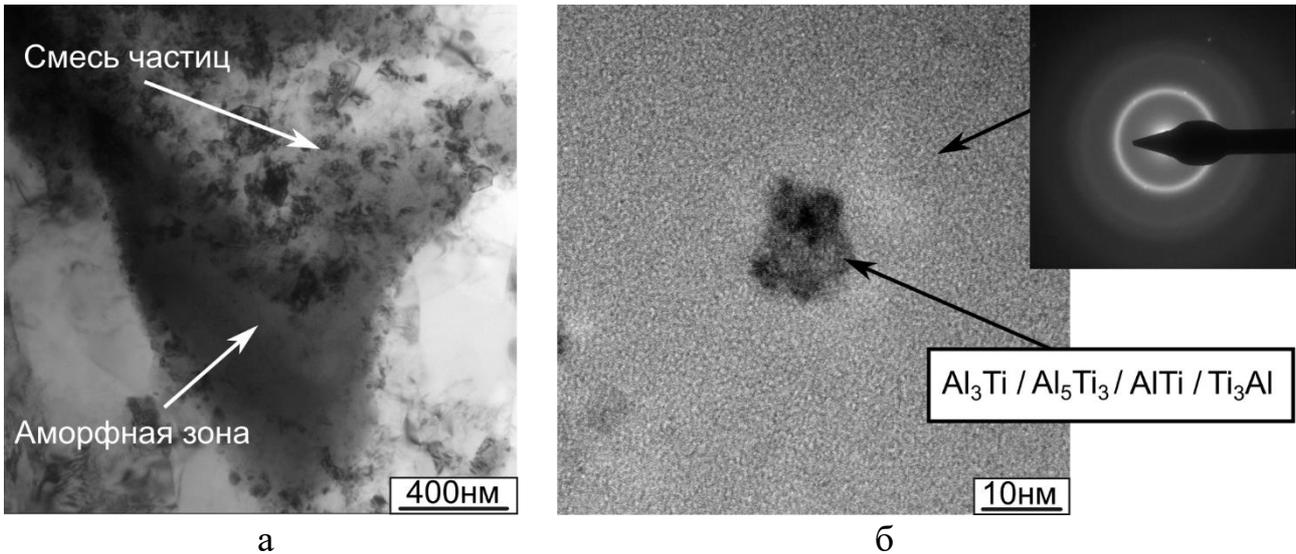


Рисунок 6 – Структура (а) и состав (б) вихревых зон, возникших при сварке взрывом пластин титана и алюминия

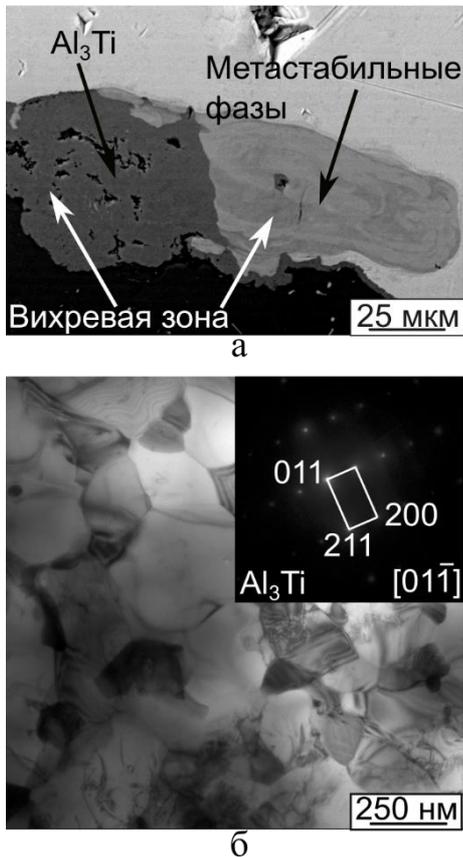


Рисунок 7 –
Формирование
триалюминида титана в
вихревых зонах. а –
строение вихревой зоны;
б – структура фазы Al_3Ti

В третьей главе «Слоистые композиционные материалы на металлической основе, упрочненные интерметаллидной составляющей» приведены результаты оценки влияния интерметаллидов в сваренном взрывом многослойном титан-алюминиевом материале на процессы зарождения и роста триалюминида титана, образующегося при последующей термической обработке сварного пакета. Здесь же представлены результаты поиска эффективного технологического процесса получения слоистого композита типа « $Ti-Al_3Ti$ ».

Было показано, что при нагреве многослойного пакета до температуры ниже температуры плавления алюминия на границах раздела $Ti-Al$ образуются интерметаллиды двух морфологических типов. Первые представляют собой «узлы», возникшие на месте вихревых зон. Соединение Al_3Ti образуется в них в процессе нагрева и является результатом трансформации метастабильных фаз в стабильную (рисунок 7). На безвихревых участках сварных швов фаза Al_3Ti образуется в виде тонких пленок. В процессе нагрева интерметаллидные «узлы» растут гораздо быстрее и поглощают выделения пленочной формы (рисунок 8). Вихревых зон, а также дефектов деформационного происхождения в верхних сварных швах гораздо больше, чем в нижних. По этой причине

скорость роста триалюминида титана в верхних швах выше, а, следовательно,

толщина прослоек интерметаллида больше. Со временем различия в скорости роста интерметаллида в верхних и нижних сварных швах исчезают.

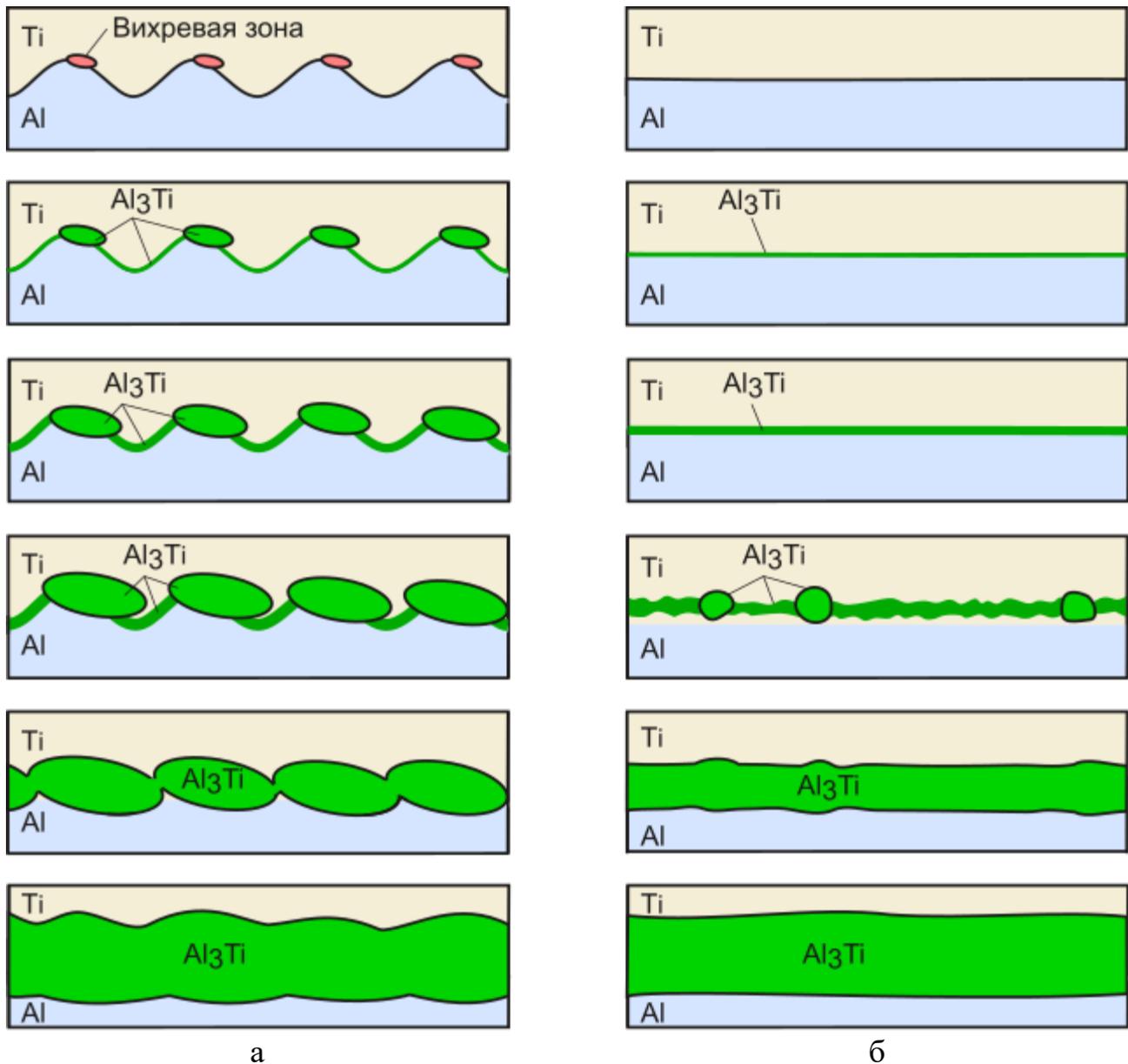


Рисунок 8 – Схема роста интерметаллидных прослоек на границах раздела алюминия и титана в сваренных взрывом композитах при увеличении длительности изотермической выдержки при 630-640 °С. а – верхний сварной шов, б – нижний сварной шов. Длительность выдержки возрастает в направлении сверху вниз

Выдержка сваренной взрывом многослойной заготовки при 640 °С в течение 20 часов приводит к полному расходованию алюминиевой пластины толщиной 250 мкм и формированию слоя триалюминида титана. При реакционном спекании собранных в пакет пластин алюминия и титана (не подвергавшихся предварительной сварке взрывом) в тех же условиях на расходование алюминия затрачивается 100 часов. Таким образом, предварительная сварка взрывом титана и алюминия позволяет ускорить процесс в 5 раз.

На практике процесс твердофазного спекания металлических заготовок, лежащий в основе получения композита типа « $Ti-Al_3Ti$ », длится десятки часов. Существенно его ускорить позволяет спекание при температуре выше точки плавления алюминия ($660\text{ }^\circ\text{C}$). Для предотвращения вытекания алюминия из зоны контакта в процессе спекания заготовок было предложено использовать герметичные титановые контейнеры. Экспериментальные исследования показали, что искровое плазменное спекание алюминиевых и титановых фольг при температурах $830\text{ }^\circ\text{C}$ и $1050\text{ }^\circ\text{C}$ позволило сформировать композит типа « $Ti-Al_3Ti$ » менее чем за 10 минут. При этом влияние температуры на толщину слоя Al_3Ti оказалось неоднозначным. В пакетах, полученных при обеих отмеченных выше температурах, помимо слоев титана и триалюминида титана были зафиксированы промежуточные прослойки, состоящие из пересыщенного твердого раствора алюминия в титане и продуктов реакции титана и триалюминида титана в виде соединений Al_2Ti , $AlTi$ и Ti_3Al (рисунок 9). Толщина прослоек, содержащих побочные продукты реакции, в образцах, спеченных при $1050\text{ }^\circ\text{C}$, оказалась больше за счет уменьшения толщины слоя Al_3Ti (рисунок 10). Таким образом, для спекания предпочтительной оказалась температура $830\text{ }^\circ\text{C}$, которая использовалась во всех последующих экспериментах по формированию композитов типа « $Ti-Al_3Ti$ ».

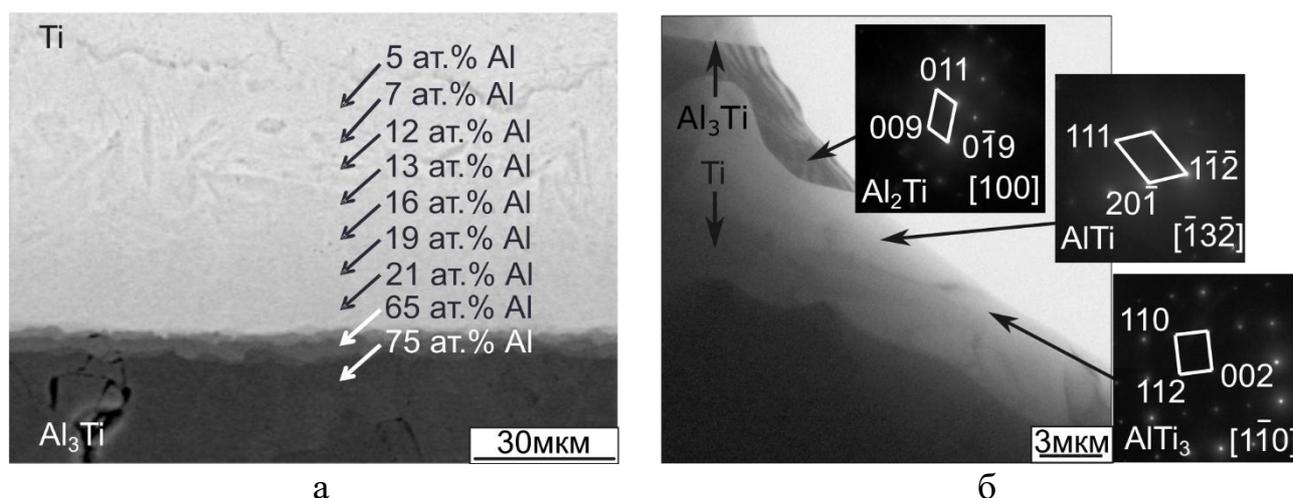


Рисунок 9 – Структура промежуточных прослоек, возникших на границах раздела титана и триалюминида титана. а – растровая электронная микроскопия, б – просвечивающая электронная микроскопия и электронная дифракция

Механические испытания слоистых композитов, полученных методом искрового плазменного спекания, показали, что, несмотря на присутствие вязкой составляющей (титана), относительное удлинение материалов находится на довольно низком уровне ($\sim 3,5\%$). Причиной этого является отсутствие запаса пластичности у триалюминида титана. Подход, основанный на увеличении объемной доли титана, оказывает положительное влияние на пластичность и вязкость

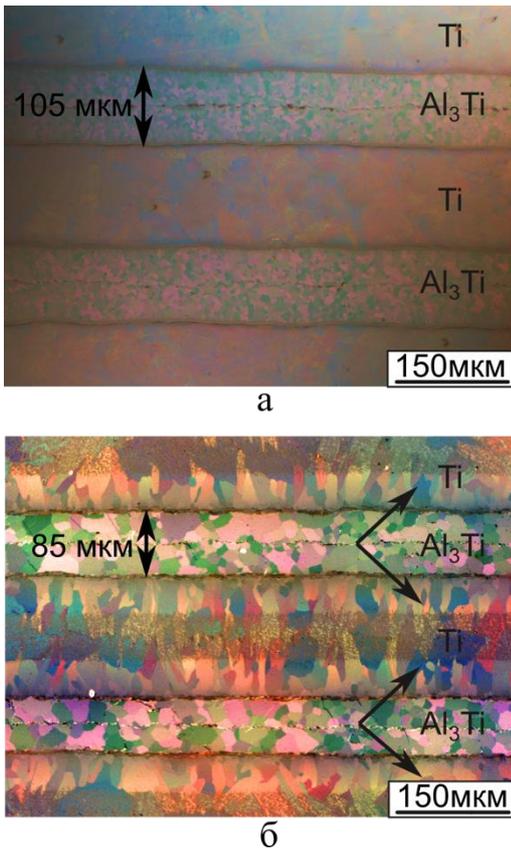


Рисунок 10 –
Интерметаллидные
прослойки, сформированные
в композите типа « $Ti-Al_3Ti$ » в
процессе спекания при 830
°C (а) и 1050 °C (б)

разрушения слоистых композитов, но при этом снижаются их твердость и жесткость. Таким образом, поиск технических решений по увеличению пластичности и трещиностойкости композитов типа « $Ti-Al_3Ti$ » представляет собой актуальную задачу

В четвертой главе «Возможности формирования кубической фазы триалюминида титана в композиционном материале на основе трехкомпонентной системы $Al-Ti-M$ » был предложен подход к повышению вязкости разрушения слоистых композиций, основанный на модифицировании интерметаллидной составляющей металл-интерметаллидных слоистых материалов.

Известно, что причина отсутствия пластичности у соединения Al_3Ti заключается в особенностях его кристаллического строения. Тетрагональная решетка типа DO_{22} имеет ограниченное число независимых систем скольжения, а основным механизмом ее деформации при низких температурах является двойникование по системе $(111) [11\bar{2}]$. Одним из способов улучшения свойств триалюминида титана является легирование, позволяющее трансформировать тетрагональную решетку в близкую ей по строению кубическую $L1_2$ структуру, ха-

рактеризующуюся наличием двенадцати независимых систем скольжения и по своей природе отличающуюся большей склонностью к пластическому течению.

Стабилизировать решетку $L1_2$ можно путем легирования триалюминида титана с тетрагональной структурой переходными металлами в количестве $\sim 8 - 12$ ат. %. Однако в условиях спекания тройной системы при избытке титана, присутствующего в композите типа « $Ti-Al_3Ti$ », процессы могут отличаться от реакций, происходящих в смеси, соответствующей стехиометрическому соотношению элементов. Для оценки возможности стабилизации триалюминида титана с кубической структурой в составе металл-интерметаллидного композита с избытком титана в работе проводились *in situ* исследования методом дифракции рентгеновского синхротронного излучения. Порошковые смеси примерного состава $Ti(45-46)-Al(46-48)-M(5,8-8,8)$ ат. %, где $M = Zn, Cu, Au, Ag, Ni, Pt, Pd, Co, Cr, Mn$ и Fe , в титановом контейнере помещали в печь, установленную на линии P07 циклического ускорителя *Petra III (Deutsches Elektronen-Synchrotron – DESY, г. Гамбург, Германия)*. Регистрацию дифракционных картин Дебая – Шеррера проводили в процессе нагрева, выдержки и охлаждения образцов. Полученные ди-

фракционные картины были азимутально интегрированы и представлены в координатах « 2θ – интенсивность». Для наглядного отображения последовательности реакций, развивающихся при нагреве порошковых смесей до 830 °С, их выдержке при указанной температуре и последующем охлаждении, были построены карты, характеризующие интенсивность дифракционных пиков при изменении температуры. Каждая точка на карте представляет собой интенсивность рентгеновского излучения в конкретный момент времени на определенном угле 2θ . Типичное изображение карты (в данном случае описывающей реакции в тройной системе *Ti-Al-Cu*) показано на рисунке 11. Каждая из 11 построенных в работе карт является результатом обработки не менее 900 «стандартных» дифрактограмм.

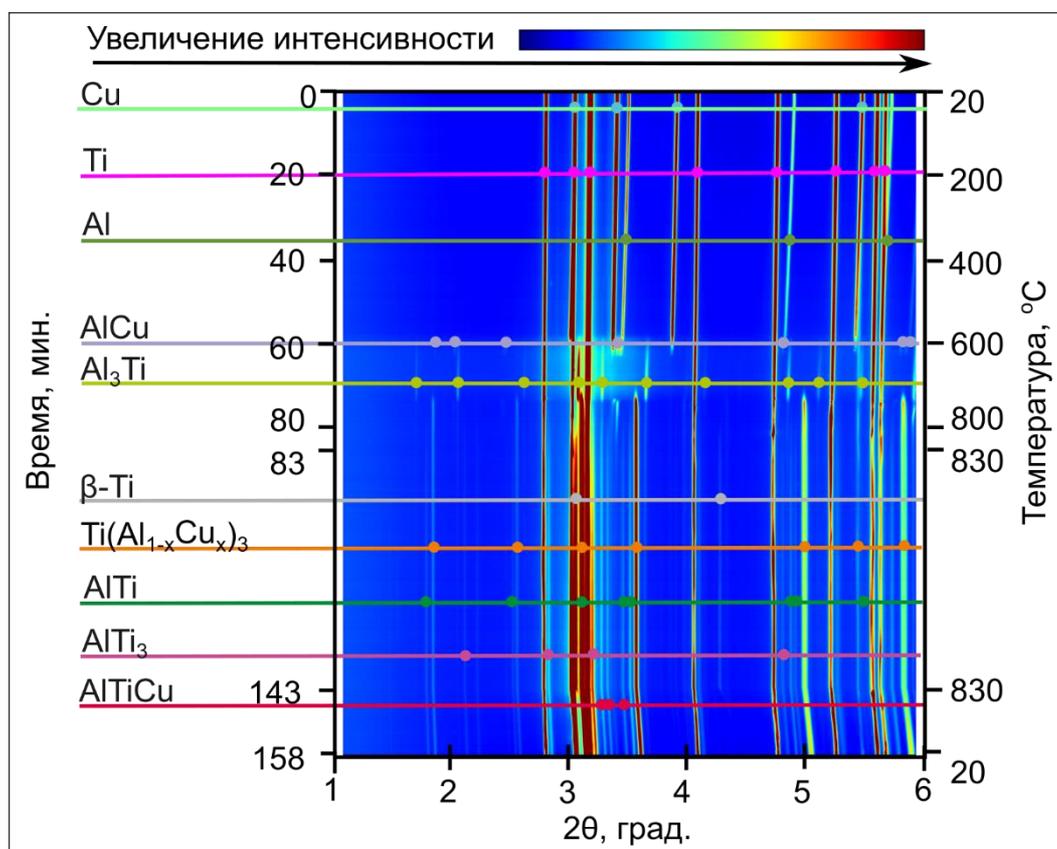


Рисунок 11 – Карта, иллюстрирующая фазовые превращения, происходящие в тройной системе *Ti-Al-Cu* (результат синхротронных исследований)

При анализе полученных данных все легирующие элементы, выступающие в качестве стабилизаторов кубической модификации триалюминида титана, были разделены на следующие группы: 1) металл с ГПУ решеткой – *Zn*; 2) металлы группы меди с ГЦК решеткой – *Cu, Ag, Au*; 3) металлы группы никеля с ГЦК решеткой – *Ni, Pd, Pt*; 4) металлы с ОЦК решеткой – *Mn, Fe, Co*; 5) тугоплавкий металл с ОЦК решеткой – *Cr*. Полагали, что взаимодействие титана и алюминия с элементами одной и той же группы будет подобным.

Взаимодействие алюминия и титана с цинком при нагреве от комнатной температуры до 830 °С развивалось следующим образом. Реакции начинались с эвтектического плавления *Zn-Al*. Результатом повышения температуры являлось

выделение кубического триалюминида титана с $L1_2$ структурой (искомой фазы) из раствора алюминия и цинка, взаимодействующего с кристаллическим титаном. При дальнейшем нагреве компоненты кубического триалюминида титана перераспределяются между фазами тетрагонального Al_3Ti и Ti_4ZnAl_{11} . Вероятно, этот процесс развивается с участием жидкой фазы, поскольку исчезновение пиков $L1_2$ структуры сопровождается повышением интенсивности фона на рентгенограммах, что может свидетельствовать о формировании расплава. На следующих этапах нагрева при взаимодействии тетрагонального триалюминида титана с титаном формируются соединения Al_2Ti , Ti_3Al и $TiAl$. Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что структуру типа $L1_2$ в системе $Ti-Al-Zn$ следует стабилизировать путем спекания композита в диапазоне температур от 425 до 700 °С.

Являясь аналогами, металлы группы меди (Cu , Ag и Au) различным образом ведут себя при добавлении в двойную систему $Ti-Al$. При нагреве тройной системы $Ti-Al-Cu$ в первую очередь формируются двойные соединения ($Al-Cu$ и Al_3Ti). При дальнейшем нагреве соединение $Al-Cu$ растворяется в жидком алюминии, а полученный раствор взаимодействует с фазой Al_3Ti и формирует соединение со структурой типа $L1_2$. Серебро, не формируя каких-либо легкоплавких или тугоплавких соединений с алюминием, полностью растворяется в нем и, уже находясь в жидком растворе, участвует в образовании фазы со структурой типа $L1_2$. Золото же входит в соединение Al_2Au , которое участвует в твердофазной реакции с появлением фазы со структурой $L1_2$. Присутствие в системе дополнительных соединений, в состав которых входит металл-стабилизатор $L1_2$ структуры (в данном случае Al_2Au), приводит к значительному снижению объемной доли искомой фазы $Ti(Al_{1-x}Au_x)_3$ с кубической решеткой. Следует отметить, что единственной системой, в которой тетрагональная решетка Al_3Ti полностью модифицируется в кубическую, является система с медью. В остальных сплавах по завершении процесса спекания остается непрореагировавший триалюминид титана со структурой $D0_{22}$.

Анализ реакций, развивающихся в тройных системах $Al-Ti-M$, где M – металл группы никеля, и продуктов, полученных после охлаждения образцов, нагретых до 830 °С, позволил выявить следующее. На первом этапе в системе с никелем формируется относительно легкоплавкое соединение Al_3Ni , которое далее участвует в формировании $L1_2$ твердого раствора на базе Al_3Ti , соединения с кубической решеткой – $Al_{17}Ni_7Ti_6$ и двойного соединения Ni_2Al_3 . В системе с палладием в первую очередь возникает фаза Pd_2Al_3 , которая претерпевает перекристаллизацию с образованием легкоплавкой промежуточной фазы – Al_3Pd , участвующей далее в формировании тройных соединений (фазы $L1_2$ и $Al_{16}Pd_7Ti_6$). Повторно выделяясь, соединение Pd_2Al_3 остается в конечных продуктах реакции. В системе с платиной также формируется фаза с низкой температурой плавления Al_4Pt , которая при дальнейшем нагреве расходуется на формирование $L1_2$ твердого раствора на базе Al_3Ti , являющегося единственным тройным соединением в материале. Помимо фазы $Ti(Al_{1-x}Pt_x)_3$ платину содержат также двойные соединения $Al_{21}Pt_8$ и Al_2Pt , которые выделяются почти одновременно с $L1_2$ твердым раствором. Несмотря на то, что во всех трех системах твердый раствор типа $L1_2$

удалось стабилизировать, металлы группы никеля нельзя отнести к эффективным модифицирующим добавкам, поскольку в результате реакций в тройных системах формируется большое количество побочных продуктов – двойных и тройных соединений, а доля триалюминидов титана со структурой типа $L1_2$ крайне низка.

Из металлов с ОЦК решеткой $L1_2$ твердый раствор удалось стабилизировать лишь при добавлении марганца, однако его содержание в образце было крайне мало. В системе с железом подавлялось формирование не только триалюминидов титана с $L1_2$ структурой, но также тетрагонального (DO_{22}) триалюминидов титана. Железо и кобальт в тройных системах с алюминием и титаном расходуются на образование двойных соединений с алюминием. При этом двойное соединение Fe_4Al_{13} , сформированное из жидкости, оставалось в системе $Ti-Al-Fe$ вплоть до окончания процесса спекания, в то время как в тройной системе $Ti-Al-Co$ полученное на начальных этапах спекания соединение Co_2Al_9 при температуре выдержки (830 °C) взаимодействовало с титаном, что сопровождалось высвобождением атомов Al и формированием соединения с меньшим его содержанием (Co_2Al_5). Твердого раствора со структурой типа $L1_2$, как и иных тройных соединений, в системе $Ti-Al-Cr$ обнаружено не было. При этом был зафиксирован ряд двойных интерметаллидов: Cr_2Al_{13} , Al_3Ti , Al_2Ti , Ti_3Al , $TiAl$.

На основании проведенного анализа было установлено, что для стабилизации кубической модификации триалюминидов титана в металл-интерметаллидном композите предпочтительными являются элементы с ГЦК или ГПУ решеткой и относительно низкой температурой плавления. При этом элемент-стабилизатор по возможности не должен формировать обогащенных алюминием тугоплавких двойных соединений (температура которых превышает ~ 1000 °C). Среди исследованных в работе переходных металлов этим требованиям в наибольшей степени отвечают Zn , Cu и Ag .

В пятой главе «Композиционные материалы на основе алюминидов титана, упрочненные твердой керамической фазой» представлены результаты исследования слоистой структуры на основе $\gamma-TiAl$. Интерес к сплавам и композиционным материалам подобного типа обусловлен перспективами их промышленного применения в авиастроении для изготовления лопаток газотурбинных двигателей. Одним из критериев надежности сплавов в условиях эксплуатации при повышенных температурах является сопротивление ползучести. В работе оценивалась возможность повышения этого показателя путем формирования в сплавах прослоек твердой фазы. Были изучены композиты, сформированные путем совместного спекания титановых и алюминиевых фольг с порошковыми слоями TiB_2 или TiC .

Режимы спекания материалов были выбраны на основании результатов анализа экспериментальных данных, полученных в процессе *in situ* исследований методом дифракции рентгеновского синхротронного излучения. Порошковую смесь состава $Ti-50Al$ (ат. %) нагревали до 1250 °C (рисунок 12). Нагрев заготовок сопровождался съемкой дифракционных картин. Установлено, что структура типа $(\alpha_2+\gamma)$ образуется в результате реакций, сопровождающихся формированием промежуточных фаз. Первым возникающим в системе соединением

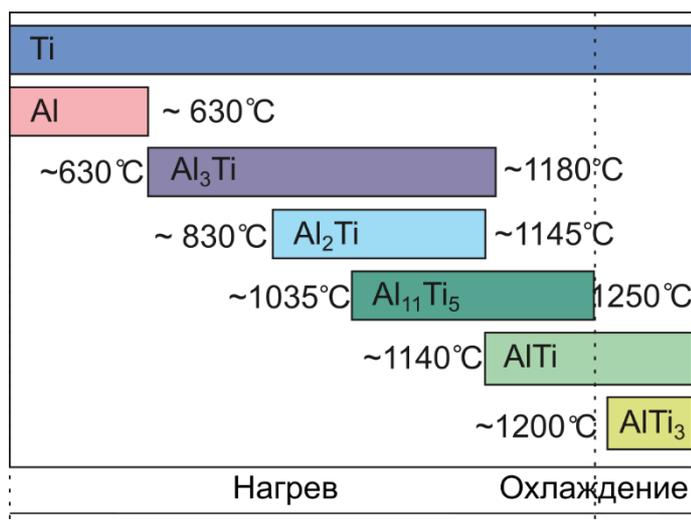
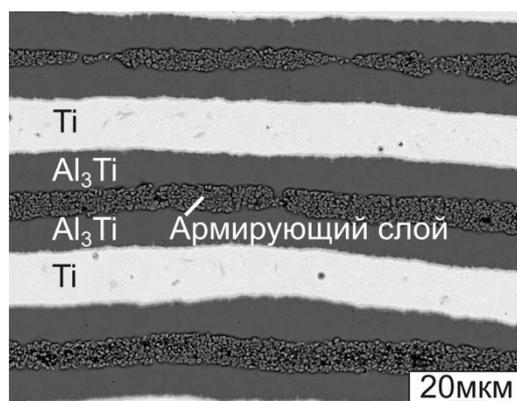
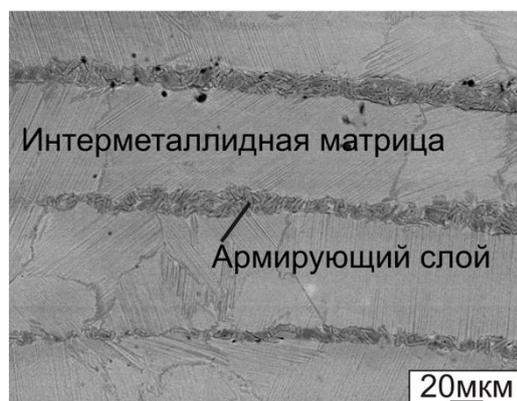


Рисунок 12 – Последовательность реакций в бинарной системе $Ti-Al$, развивающихся при нагреве порошковой смеси $Ti-Al$ до $1250\text{ }^{\circ}C$ и последующем охлаждении



а



б

Рисунок 13 – Структура материала, армированного частицами TiC / Ti_2AlC , после первого (а) и второго (б) этапов спекания

является интерметаллид Al_3Ti , увеличение объемной доли которого при нагреве материала продолжается до полного расходования алюминия. Результатом взаимодействия фазы Al_3Ti с титаном в процессе дальнейшего нагрева системы является соединение Al_2Ti . При повышении температуры нагрева эвтектидная смесь Al_3Ti-Al_2Ti трансформируется в соединение $Al_{11}Ti_5$, взаимодействие которого с титаном сопровождается формированием интерметаллида $TiAl$. Дальнейший нагрев системы приводит к насыщению фазы $TiAl$ титаном. Избыточный титан, выделяющийся при охлаждении сплава, участвует в образовании интерметаллида типа Ti_3Al .

В качестве технологии производства многослойных композитов было выбрано искровое плазменное спекание чистых компонентов с порошками упрочняющей фазы. Слоистые материалы получали в два этапа. На первом этапе заготовки спекали в течение 10 минут при $830\text{ }^{\circ}C$, в результате чего были получены пакеты типа « $Ti-Al_3Ti$ » с прослойками TiB_2 или TiC (рисунок 13, а). На втором этапе полученные заготовки нагревали до $1250\text{ }^{\circ}C$ и выдерживали в течение 5 минут (рисунок 13, б). При этом в зависимости от особенностей взаимодействия металлических элементов и армирующего компонента формировалась интерметаллидная матрица состава Ti_3Al или $TiAl+Ti_3Al$. Армирующие слои состояли из плоских скоплений керамических частиц, распределенных в интерметаллидной матрице. При добавлении в композит частиц TiB_2 взаимодействия матрицы с керамической фазой не происходило. В процессе спекания композита с добавлением карбида титана армирующий компонент вступал в реакцию с матричным материалом, образуя МАХ-фазу состава Ti_2AlC (рисунок 14). При этом матрица обедняется алюминием, что препятствует формированию

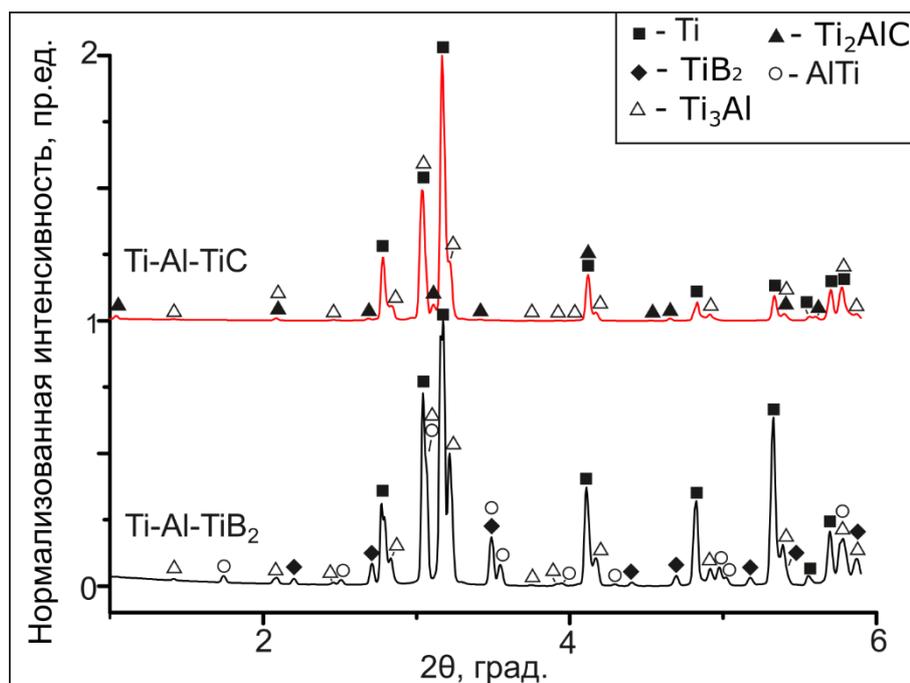


Рисунок 14 – Фазовый состав многослойных композитов, армированных частицами TiB_2 и Ti_2AlC , после искрового плазменного спекания при $1250\text{ }^\circ\text{C}$

соединения $TiAl$. МАХ-фаза характеризуется более низкой твердостью по сравнению с диборидом титана, что отражается на прочностных характеристиках композитов. При испытаниях на сжатие предел прочности композита с частицами TiB_2 на $400 - 700\text{ МПа}$ выше по сравнению с материалом, армированным включениями Ti_2AlC . При этом состав армирующего слоя практически не влияет на сопротивле-

ние материалов ползучести в условиях сжатия при температуре $750\text{ }^\circ\text{C}$ и нагрузке 250 МПа . В обоих случаях скорость ползучести была $\sim 10^{-8}\text{ с}^{-1}$, что сопоставимо со скоростью ползучести сложнолегированных сплавов на основе алюминидов титана.

В шестой главе «Формирование интерметаллидных слоев на поверхности заготовок из титановых сплавов» анализируется возможность повышения жаростойкости и износостойкости титана путем нанесения на его поверхность слоев алюминидов титана с использованием метода вневакуумной электронно-лучевой наплавки. Процесс основан на высокоэнергетическом воздействии пучков релятивистских электронов на порошковую смесь из чистых металлических компонентов и флюса, распределенную на поверхности заготовок из титана.

Важнейшим фактором, определяющим структуру и свойства наплавленных слоев, является содержание алюминия в наплавленном слое. При снижении доли алюминия от $59,3$ до $6,7\text{ ат. \%}$ фазовый состав наплавленных слоев трансформировался в последовательности: $(TiAl+Al_2Ti+Ti_3Al) \rightarrow Ti_3Al \rightarrow (Ti_3Al+\alpha-Ti) \rightarrow \alpha-Ti$. Структура слоев изменялась от крупнозернистой, представленной интерметаллидными зёрнами с антифазными границами, до мелкокристаллической пластинчатой (рисунок 15).

Испытания, проведенные методами микроиндентирования и трения о закрепленные частицы абразива, свидетельствуют о том, что максимальной твердостью и сопротивлением износу обладают однофазные интерметаллидные сплавы (Ti_3Al). При снижении содержания алюминия в наплавочной смеси до $6,7\text{ ат. \%}$ износостойкость поверхностно легированного слоя падает до значений, со-

ответствующих титановой основе. Максимальную стойкостью к окислению показал наплавленный слой, содержащий обогащенные алюминием фазы ($TiAl$ и Al_2Ti). По износостойкости этот материал уступает монофазным сплавам на основе Ti_3Al . Следует, однако, отметить, что при повышении содержания алюминия наплавленные слои проявляют большую склонность к хрупкому разрушению. Трещины в них возникают уже на этапе наплавки порошковых смесей. Решить отмеченную проблему можно путем легирования интерметаллидного сплава ниобием.

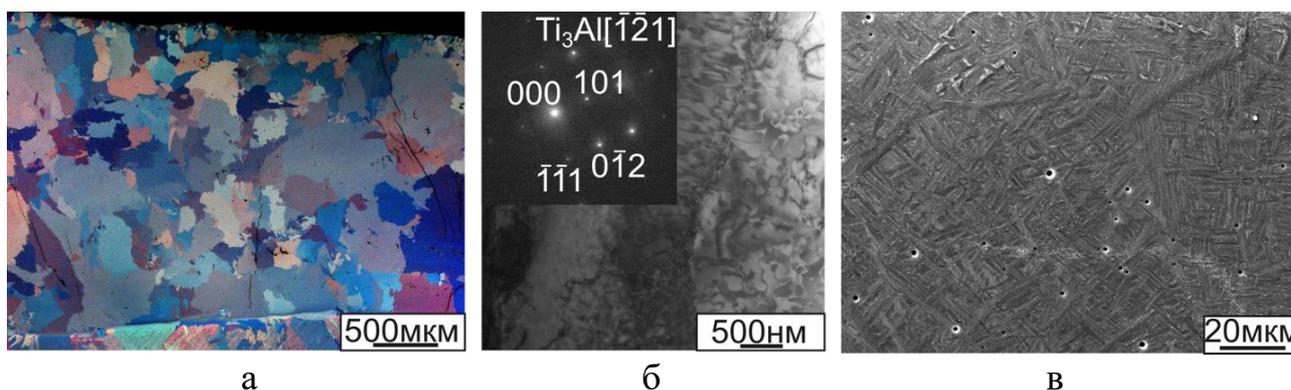


Рисунок 15 – Структура наплавленных слоев состава $Ti-40Al$ ат. % (а, б) и $Ti-23,7Al$ ат. % (в). а – оптическая металлография, б – просвечивающая электронная микроскопия, в – растровая электронная микроскопия

Для вневакуумной электронно-лучевой наплавки использовали порошковые смеси, соотношение алюминия и ниобия в которых варьировалось от $Ti-48Al-2Nb$ до $Ti-40Al-20Nb$ ат. %. Качество полученных материалов оказалось существенно выше, чем слоев с повышенным содержанием алюминия без добавления ниобия. Металлографически трещин в образцах обнаружено не было. Основными дефектами наплавленных слоев, которые удалось выявить методом рентгеновской томографии, оказались поры и остатки нерасплавленных включений с повышенной концентрацией ниобия.

Фазовый состав поверхностно легированных материалов существенно отличался от равновесного (рисунок 16). Основной особенностью неравновесных фазовых превращений, обусловленных высокими скоростями охлаждения наплавленных слоев (10^3 °C/c), являлось полное подавление в них $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения, независимо от состава, вместо которого был реализован $\alpha \rightarrow \alpha_2$ переход. Таким образом, основной преобладающей в наплавленных слоях фазой был интерметаллид Ti_3Al . Кроме нее в поверхностно легированных слоях были зафиксированы микрообъемы с соединениями метастабильного типа: γ_1 -фаза (в сплаве $Ti-40Al-20Nb$) и ω' -фаза (в сплавах $Ti-43Al-14Nb$ и $Ti-46Al-8Nb$). Твердый раствор на основе α -титана выявлен в сплавах с 8 и 20 ат. % Nb .

γ_1 -фаза ($Ti_4Nb_3Al_9$) возникает путем сложения восьми ячеек γ ($TiAl$) и характеризуется большей энергией формирования по сравнению с γ -фазой. Присутствие γ_1 -фазы в структуре наплавленных слоев подтверждает неравновесность условий охлаждения при наплавке порошковой смеси. ω -фаза в сплавах

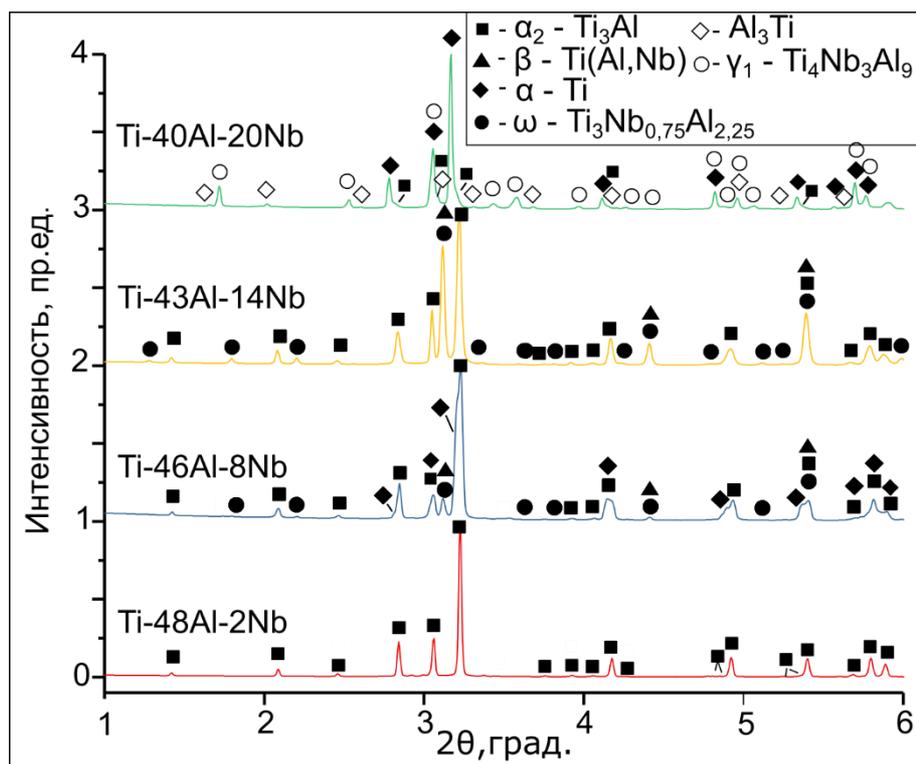
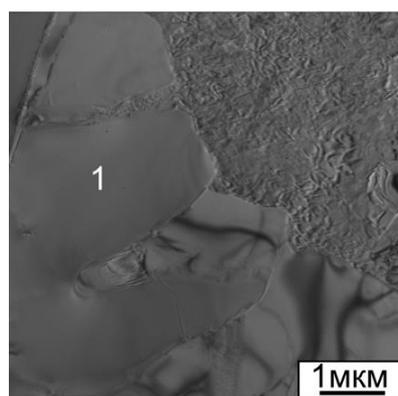


Рисунок 16 – Результаты рентгенофазового анализа наплавленных материалов с различным содержанием легирующих элементов

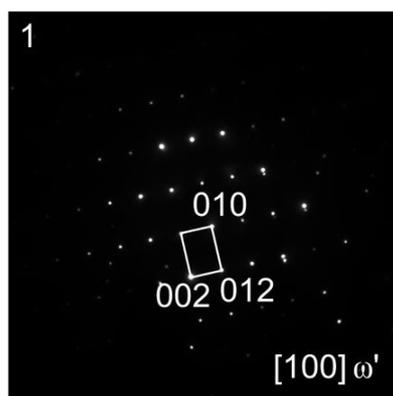
системы *Ti-Al-Nb*, как правило, выделяется в виде микрообъемов при реализации процессов упорядочения в $\beta(B2)$ -матрице. Результаты просвечивающей электронной микроскопии свидетельствуют о том, что при наплавке порошковой смеси ω -фаза формируется в пределах целого зерна.

Превращение $\beta(B2) \rightarrow \omega$ развивалось по бездиффузионному механизму, что привело к фиксации в легированных слоях промежуточной ω' -фазы, обладающей

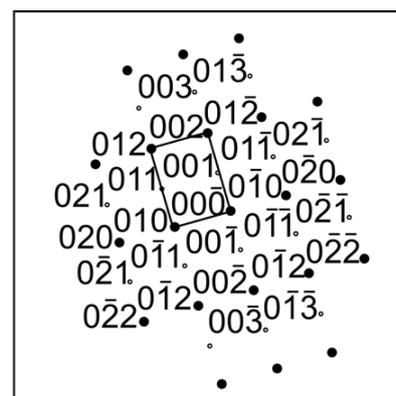
структурой, унаследованной от фазы типа *B2*, но характеризующейся более низкой симметрией (рисунок 17, а, б). Подтверждением этого факта являются результаты моделирования дифракционной картины, полученной от ω' -фазы с лишь двумя занятыми позициями Вайкоффа (*1a*, *1b*) вместо четырех, характерных для стабильной ω -фазы (рисунок 17, в).



а



б



в

Рисунок 17 – Электронномикроскопическое изображение микрообъема ω' -фазы (а), соответствующая ему электронная дифракция (б) и результаты моделирования электронной дифракции (в)

Для анализа влияния элементного и фазового состава наплавленных слоев на прочностные и эксплуатационные свойства были проведены испытания материалов на твердость, износостойкость, жаростойкость и сопротивление ползучести в условиях сжатия. При трении о закрепленные частицы абразива износостойкость наплавленных слоев почти в два раза превышала аналогичный показатель, соответствующий титану. Максимальной твердостью и износостойкостью обладали сплавы, не содержащие в своей структуре ω -фазы ($Ti-48Al-2Nb$ и $Ti-40Al-20Nb$). Минимальная скорость ползучести в условиях сжатия при температуре 800 °С и нагрузке 250 МПа зафиксирована при испытаниях материала $Ti-48Al-2Nb$. Повышение содержания ниобия сопровождалось снижением сопротивления ползучести. Минимальный прирост массы наблюдали при окислении образцов состава $Ti-48Al-2Nb$, $Ti-46Al-8Nb$ и $Ti-43Al-14Nb$. После выдержки при 900 °С в течение 200 часов он не превышал 1 мг/см². В процессе окисления при 900 °С лучшие результаты (0,4 г/см²) зафиксированы на образцах из сплава с 8 ат. % Nb . Полученное значение в 18 раз ниже по сравнению с материалом основы. Введение в наплавочную смесь 20 ат. % Nb с позиции обеспечения жаростойкости оказалось неэффективным, поскольку в этом случае на поверхности образцов в процессе окисления формируется прерывистая оксидная пленка состава $AlNbO_4$.

В седьмой главе отражено практическое использование результатов диссертационной работы и представлена оценка перспектив применения слоистых композиционных материалов типа « $Ti-Al_3Ti$ » в качестве конструкционных материалов. Одним из анализируемых в диссертационной работе подходов к повышению трещиностойкости слоистых металл-интерметаллидных композиций является легирование триалюминида титана переходными металлами с целью стабилизации его более пластичной кубической модификации. Данный подход был успешно реализован при введении в сплав меди. Схема сборки заготовки для искрового плазменного спекания приведена на рисунке 18.

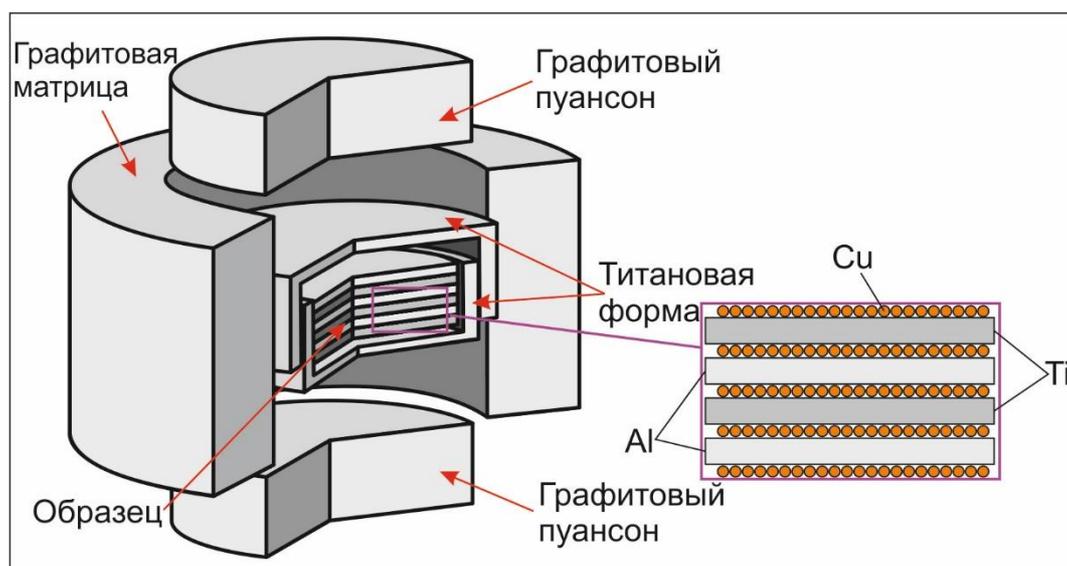


Рисунок 18 – Схема формирования многослойного композита с прослойками триалюминида титана с $L1_2$ структурой

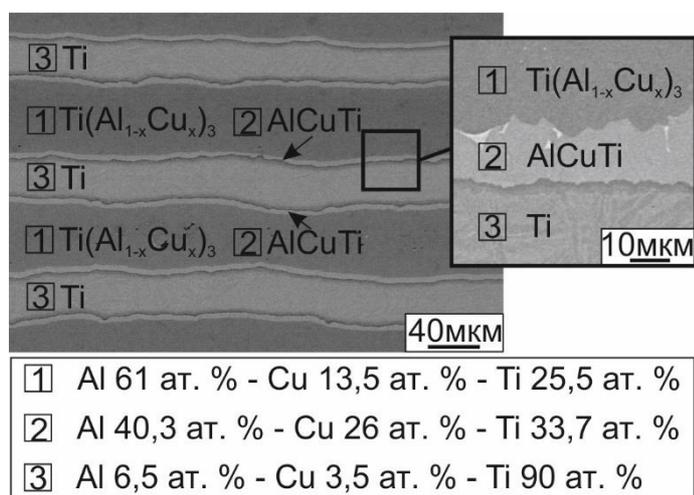


Рисунок 19 – Строение композита, содержащего слои титана, интерметаллида $Ti(Al_{1-x}Cu_x)_3$ кубической модификации (структурный тип $L1_2$) и $AlCuTi$ (структурный тип $C14$)

в двадцать раз. По данным микроиндентирования вязкость разрушения интерметаллидного слоя со структурой $L1_2$ значительно выше по сравнению с трещиностойкостью триалюминида титана тетрагональной модификации (DO_{22}). Нагрузка, требуемая для зарождения трещины в тетрагональной структуре, составляет 0,2 кг, что соответствует трещиностойкости $2,36 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, в то время как для зарождения трещин в $L1_2$ фазе требуется нагрузка величиной более 1 кг (трещиностойкость более $5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).

Результаты выполненных в работе исследований легли в основу технических решений по формированию стыковых соединений из разнородных материалов с использованием промежуточных вставок, полученных методом сварки взрывом. На разработки, выполненные с участием автора диссертационной работы, получено два патента на изобретения Российской Федерации. Технология изготовления промежуточных вставок для соединения разнородных материалов внедрена на федеральном казенном предприятии «Новосибирский опытный завод измерительных приборов».

По заказу АО «Катод» в течение семи лет с участием автора диссертации выполняются прикладные исследования, ориентированные на выявление дефектов, возникающих на различных стадиях производства электронно-оптических приборов третьего поколения и связанные с определением природы их происхождения, оценкой морфологии и размеров интерметаллидных кристаллов повышенной прочности. Выводы, заключения и рекомендации, сформулированные в ходе исследования элементов электронно-оптических приборов, не реже чем раз в месяц передаются заказчику. Результаты исследований используются в АО «Катод» при производстве высокотехнологичной продукции, уровень которой соответствует мировому.

В результате спекания при $830 \text{ }^\circ\text{C}$ был получен многослойный композит, содержащий слои с $L1_2$ структурой, титан и тонкие прослойки промежуточной фазы – $AlCuTi$, содержание которой в композите недостаточно, чтобы оказать значительное влияние на его свойства (рисунок 19).

Экспериментально установлено, что твердость триалюминида титана при замене его тетрагональной структуры на кубическую снижается незначительно (с $\sim 570 \text{ HV}$ до $\sim 520 \text{ HV}$). Эти значения соответствуют пределу прочности $\sim 1,9 \text{ ГПа}$ и $\sim 1,7 \text{ ГПа}$ соответственно, что выше прочностных характеристик титана в четыре раза и алюминия –

Анализ данных, полученных методом дифракции рентгеновского синхротронного излучения в режиме *in situ*, представляет собой трудоемкую задачу, связанную с обработкой больших объемов экспериментальных данных. В рамках выполнения диссертационной работы были разработаны алгоритмы для анализа дифракционных картин и написаны программные коды на языке программирования *Python*, которые в виде методических рекомендаций были переданы в Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина, а также в филиал ПАО «Компания «Сухой» «Новосибирский авиационный завод имени В.П. Чкалова» и приняты предприятиями для оценки качества материалов, используемых при производстве новой техники.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам «Физические методы исследования материалов», «Электронная микроскопия» «Технология производства композиционных и порошковых материалов», «Компьютерные технологии в науке и производстве», «Физика металлов», «Рентгеноструктурный анализ материалов».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Являясь процессом, протекающим преимущественно в твердой фазе, сварка взрывом не позволяет полностью исключить образование интерметаллидных включений в локальных зонах сварных швов между разнородными материалами, склонными к формированию химических соединений, в частности в паре «титан – сталь». Образующиеся при этом соединения, а также аморфные и квазикристаллические структуры существенно охрупчивают сварные швы. Предложенное в работе решение отмеченной проблемы заключается в использовании промежуточных вставок, материалы которых не вступают в химическое взаимодействие друг с другом и с соединяемыми сплавами. При сварке взрывом заготовок из титана и стали в качестве промежуточных прослоек предложено использовать пары «медь – тантал» и «медь – ниобий», формирующие с указанными материалами непрерывные ряды твердых растворов и механические смеси. Возникающие в вихрях смеси находятся в нанодисперсном состоянии и вносят вклад в повышение прочностных характеристик композиций.

2. Комбинирование в едином пакете разнородных материалов является эффективным решением по созданию слоистых композитов с повышенным комплексом свойств. К композитам такого типа относятся материалы типа « $Ti-Al_3Ti$ ». Традиционные технологии получения металл-интерметаллидных композитов, основанные на процессах твердофазной диффузии, малоэффективны в связи с их большой длительностью. Предварительная сварка взрывом титановых и алюминиевых пластин позволяет ускорить процесс формирования многослойных материалов типа « $Ti-Al_3Ti$ » в 5 раз. Структурные преобразования, имеющие место в приграничных зонах пластин при сварке взрывом, а именно увеличение площади сопряжения заготовок при образовании волнообразных межслойных границ, очистка поверхностей свариваемых заготовок обратной струей, возника-

ющей при сварке взрывом, и активизация диффузионных процессов, обусловленная повышенной плотностью дислокаций в приграничных зонах металлических слоев, способствуют интенсификации процессов роста прослоек Al_3Ti при последующем твердофазном спекании многослойных пакетов.

3. С использованием методов структурного анализа выявлен вклад вихревых зон в процессы зарождения и роста триалюминид титана на границах раздела сваренных взрывом титановых и алюминиевых пластин. Стабильные (Al_3Ti и $AlTi$) и метастабильные (Al_5Ti_3 , разупорядоченный $AlTi_3$) фазы, аморфные структуры и упорядоченные твердые растворы в этих зонах при нагреве слоистых пакетов преобразуются в стабильный Al_3Ti . На месте бывших вихревых зон формируются интерметаллидные «узлы», между которыми в безвихревых зонах в условиях нагрева образуются равномерные по толщине интерметаллидные пленки. В процессе термической обработки растущие ускоренно интерметаллидные «узлы» поглощают выделения пленочной формы. С увеличением длительности термического воздействия различия между морфологическими типами интерметаллидов исчезают. В верхних сварных швах, характеризующихся повышенным количеством вихревых зон, процессы роста триалюминид титана развиваются быстрее. С увеличением длительности термической обработки разница в толщине интерметаллидных прослоек по сечению композита нивелируется.

4. Несмотря на эффективность предварительной сварки взрывом титановых и алюминиевых пластин, существенно ускоряющей рост триалюминид титана на их границах раздела при нагреве, процесс формирования композита типа « $Ti-Al_3Ti$ » в твердой фазе занимает десятки часов. Экспериментально установлено, что сократить длительность процесса до 10 минут позволяет искровое плазменное спекание слоистых пакетов при температуре на 200 – 400 °С превышающей температуру плавления алюминия. Для предотвращения вытекания алюминия из зоны взаимодействия при спекании предложено использовать герметичные титановые контейнеры. Повышение температуры спекания до 1250 °С не приводит к росту толщины прослоек Al_3Ti вследствие расходования алюминия на формирование дополнительных промежуточных слоев – Al_2Ti , $AlTi$, $AlTi_3$ и твердого раствора Al в Ti . В качестве эффективного технологического процесса, позволяющего формировать композит типа « $Ti-Al_3Ti$ » с пониженным количеством побочных продуктов реакции, предложено искровое плазменное спекание при 830 °С.

5. Образование триалюминид титана с решеткой типа $D0_{22}$, обладающего низкими показателями пластичности и трещиностойкости, является одной из причин проявления склонности к хрупкому разрушению слоистых композиционных материалов типа « $Ti-Al_3Ti$ ». Эффективным подходом, способствующим повышению вязкости разрушения металл-интерметаллидных композитов, является формирование вместо соединения Al_3Ti со структурой типа $D0_{22}$ более пластичной кубической модификации триалюминид титана. Такой подход реализуется путем добавления в систему третьего компонента – переходного или благородного металла. Исследования методом дифракции рентгеновского синхро-

тронного излучения в режиме *in situ* показали, что в смесях нестехиометрического состава соединение с $L1_2$ структурой формируется при добавлении элементов из группы *Zn, Cu, Au, Ag, Pd, Pt, Ni, Mn*.

6. Методом дифракции рентгеновского синхротронного излучения в режиме *in situ* впервые изучена последовательность реакций, развивающихся в тройных системах *Ti-Al-M* (*M* – переходной или благородный металл) и приводящих к формированию структуры триалюминид титана типа $L1_2$. Установлено, что наиболее эффективными добавками являются элементы с ГЦК и ГПУ решеткой, имеющие низкую температуру плавления и не формирующие с алюминием тугоплавких двойных соединений. Введение с сплавы элементов такого типа сопровождается формированием максимальной объемной доли твердого раствора $Ti(Al_{1-x}M_x)_3$, обеспечивающего повышенный уровень трещиностойкости композита, и минимальное количество нежелательных побочных фаз. Полученные данные рационально использовать при выборе температурно-временных режимов обработки слоистых материалов.

7. Экспериментально установлено, что формирование слоистых композитов на основе алюминидов титана, упрочненных твердыми керамическими прослойками, путем электроискрового спекания титановых и алюминиевых фольг и порошков TiB_2 и TiC является эффективным способом обработки, позволяющим снизить скорость ползучести материала на 2-3 порядка по сравнению с неармированным интерметаллидным сплавом. Методом дифракции рентгеновского синхротронного излучения в режиме *in situ* изучена последовательность фазовых превращений, приводящих к образованию двухфазной ($\alpha_2+\gamma$) структуры в процессе совместного нагрева алюминия и титана. На основании полученных данных определены оптимальные температурно-временные условия формирования композита с интерметаллидной матрицей, упрочненной прослойками твердой фазы. Структурные исследования полученных слоистых композитов показали, что в процессе спекания частицы TiC реагируют с матричным материалом, формируя *MAX*-фазу состава Ti_2AlC , характеризующуюся пониженной твердостью. Частицы TiB_2 , не вступающие в реакцию при спекании, образуют в композите высокопрочные слои из дисперсных включений, распределенных в интерметаллидной матрице.

8. Метод вневакуумной электронно-лучевой наплавки интерметаллидных слоев системы *Ti-Al* на заготовки из титана технической чистоты позволяет значительно улучшить показатели твердости, износостойкости и высокотемпературные свойства материалов. Максимальным уровнем микротвердости и износостойкости характеризуются слои интерметаллида Ti_3Al . Стойкость наплавленных слоев к окислению возрастает с увеличением содержания в них алюминия. Добавление в наплавочные смеси ниобия в количестве 2-8 ат. % позволяет повысить высокотемпературные характеристики наплавленных слоев. Жаростойкость сплава *Ti-46Al-8Nb* при 900 °С в 18 раз выше по сравнению с титановой основой, а максимальной стойкостью к ползучести обладает сплав с 2 % *Nb*.

9. Методом искрового плазменного спекания при 830 °С синтезирован новый тип многослойных композитов типа «*Ti-Al₃Ti*» с модифицированной медью

$L1_2$ структурой триалюминида титана. Экспериментально показано, что трещиностойкость интерметаллидной составляющей с решеткой типа $L1_2$ более чем в 2 раза превышает трещиностойкость триалюминида титана тетрагональной модификации.

10. Результаты, полученные в диссертационной работе, используются в акционерном обществе «Катод», на предприятии «СКБ Сибэлектротерм», федеральном казенном предприятии «Новосибирский опытный завод измерительных приборов», в ПАО «Компания «Сухой» «Новосибирский авиационный завод имени В.П. Чкалова», в Сибирском научно-исследовательском институте авиации имени С.А. Чаплыгина и при реализации учебного процесса в Новосибирском государственном техническом университете.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с поиском возможностей повышения высокотемпературных свойств композиционных материалов на интерметаллидной основе путем формирования армированных многослойных структур, применением подходов, основанных на высокоэнергетической обработке металлических компонентов с целью формирования сплавов на основе алюминидов титана второго и третьего поколений, повышением вязкости разрушения слоистых композитов типа « $Ti-Al_3Ti$ » путем легирования триалюминида титана, входящего в состав слоистых композиционных материалов, различными модифицирующими добавками.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в список ВАК:

1. Влияние упрочняющей термической обработки на структуру и свойства трехслойного композита «BT23 - 08ПС - 45ХНМ», полученного по технологии сварки взрывом / **Д. В. Лазуренко**, И. А. Батаев, В. И. Мали [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2018. – Т. 10 (760). – Р. 36–43.

2. Структура и фазовый состав биомедицинских сплавов системы $Ti - Nb$ в литом состоянии и после термической обработки / А. Теммес, И. В. Иванов, А. А. Руктуев, Д. В. Лазуренко, И. А. Батаев // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2018. – Т. 10 (760). – С. 44–51.

3. Поверхностное упрочнение титана при вневакуумной электронно-лучевой наплавке порошковой смеси, содержащей алюминий / И. А. Батаев, **Д. В. Лазуренко**, М. Г. Голковский, А. А. Батаев [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2018. – Т. 10 (760). – С. 4–10.

4. Применение синхротронного излучения для анализа структурных преобразований, происходящих в процессе трения образцов из углеродистой стали / И. А. Батаев, А. А. Батаев, **Д. В. Лазуренко**, В. Г. Буров [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2018. – Т. 61, № 3. – С. 93–99.

5. Сверхвысокие скорости охлаждения на границе свариваемых взрывом материалов и их влияние на формирование структуры зон перемешивания / И. А.

Батаев, Д. В. Лазуренко, Ю. Н. Малютин [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2018. – Т. 54, ч. 2. – С. 122–130.

6. Структурные преобразования, происходящие в процессе сварки взрывом легированной стали и высокопрочного титана / Д. В. Лазуренко, В. И. Мали, И. А. Батаев, В. А. Батаев [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2018. – Т. 119, № 5. – С. 495–503.

7. Влияние прокатки и термической обработки на структуру и свойства слоёв, сформированных на титановых заготовках методом электронно-лучевой наплавки / В. В. Самойленко, Д. В. Лазуренко, И. А. Поляков, А. А. Руктуев [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – Т. 2, № 67. – С. 55–63.

8. Повышение коррозионной стойкости стальных конструкций с использованием процессов наплавки порошковых смесей и сварки взрывом / Д. В. Лазуренко, И. А. Батаев, А. А. Руктуев, А. М. Теплых [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. Т. 4, № 61. – С. 58–64.

9. Влияние температуры нагрева на структуру и механические свойства материала, полученного искровым плазменным спеканием порошка ПН85Ю15 / Л. И. Шевцова, И. А. Батаев, В. И. Мали, А. Г. Анисимов, Д. В. Лазуренко [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2013. – Т. 4, № 61. – С. 35–2.

10. Влияние температуры нагрева на структуру и свойства титана BT1-0 после ротационной вытяжки / Е. Б. Макарова, А. А. Батаев, Т. В. Журавина, И. А. Батаев, Д. В. Павлюкова [и др.] // СТИН. 2012. – № 4. – С. 38–40.

11. Зарождение и рост алюминидов титана в слоистом композите, сваренном взрывом / И. А. Батаев, А. А. Батаев, В. И. Мали, Д. В. Павлюкова [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2012. – Т. 113, ч. 10. – С. 998.

12. Неоднородность пластической деформации титановых сплавов при высокоскоростном нагружении в процессе сварки взрывом / Д. В. Павлюкова, И. А. Батаев, В. И. Мали [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 2. – Р. 46–47.

13. Геометрические преобразования тонколистовых заготовок в процессе сварки взрывом многослойных пакетов / В. И. Мали, И. А. Батаев, А. А. Батаев, Д. В. Павлюкова [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14, № 6. – С. 117–124.

Патенты:

1. Пат. № 2651101 Российская Федерация, В23К 20/22(2006.01). Вставка для сварки разнородных материалов / Батаев А. А., Батаев И. А., Никулина А. А., Лазуренко Д. В., Огнева А. Ю., Тюрин А. Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО НГТУ. – № 2016126869; заявл. 04.07.2016, опубл. 18.04.2018, Бюл. № 2, 7 с.

2. Пат. № 2470755 Российская Федерация, В23К 20/08 (2006.01), В23К 103/18 (2006.01). Способ получения сварного соединения разнородных металлических материалов / Батаев И. А., Батаев А. А., Мали В. И., Батаев В. А., Буров

В. Г., Приходько Е. А., **Павлюкова Д. В.**, Журавина Т. В., Макарова Е. Б., Ложкин В. С., Головин Е. Д., Дробяз А. А., Гонтаренко А. С., Попелюх А. И.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО НГТУ. – № 2011109489/02; заявл. 14.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science / Scopus:

1. *A novel operando approach to analyze the structural evolution of metallic materials during friction with application of synchrotron radiation* / I.A. Bataev, **D.V. Lazurenko**, A.A. Bataev, V.G. Burov, I.V. Ivanov [et al.] // *Acta Materialia*. – 2020. – Vol. 196. – P. 355–369.

2. *Formation of wear-resistant copper-bearing layers on the surfaces of steel substrates by non-vacuum electron beam cladding using powder mixtures* / **D. V. Lazurenko**, G. I. Alferova, M. G. Golkovsky, K. I. Emurlaev, Y. Y. Emurlaeva [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 395. – Art. 125927.

3. *Rearrangements of dislocations during continuous heating of deformed β -TiNb alloy observed by in-situ synchrotron X-ray diffraction* / I. V. Ivanov, K. I. Emurlaev, **D. V. Lazurenko**, A. Stark, I. A. Bataev // *Materials Characterization*. – 2020. – Vol. 166. – Art. 110403.

4. *Influence of the Ti/Al/Nb ratio on the structure and properties on intermetallic layers obtained on titanium by non-vacuum electron beam cladding* / **D. V. Lazurenko**, I. S. Laptev, M. G. Golkovsky, A. Stark [et al.] // *Materials Characterization*. – 2020. – Vol. 163. – Art. 110246.

5. *Application of Different Diffraction Peak Profile Analysis Methods to Study the Structure Evolution of Cold-Rolled Hexagonal α -Titanium* / I. V. Ivanov, **D. V. Lazurenko**, A. Stark, F. Pyczak [et al.] // *Metals and Materials International*. – 2020. – Vol. 26, iss. 1. – P. 83–93.

6. *Welding window: Comparison of Deribas' and Wittman's approaches and SPH simulation results* / Y. Y. Émurlaeva, I. A. Bataev, Q. Zhou, **D. V. Lazurenko**, I. V. Ivanov [et al.] // *Metals*. – 2019. – Vol. 9, iss. 12. – Art.1323.

7. *Microstructure evolution and enhanced creep property of a high Nb containing TiAl alloy with carbon addition* / L. Song, X. Hu, L. Wang, **D. Lazurenko** [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 807. – Art. 151649.

8. *Towards better understanding of explosive welding by combination of numerical simulation and experimental study* / I. A. Bataev, S. Tanaka, Q. Zhou, **D. V. Lazurenko** [et al.] // *Materials and Design*. – 2019. – Vol. 169. – Art. 107649.

9. *Ceramic-reinforced γ -TiAl-based composites: Synthesis, structure, and properties* / **D. V. Lazurenko**, A. Stark, M. A. Esikov, J. Paul, I. A. Bataev [et al.] // *Materials*. – 2019. – Vol. 12, iss. 4. – Art. 629.

10. *Synthesis of metal-intermetallic laminate (MIL) composites with modified Al_3Ti structure and in situ synchrotron X-ray diffraction analysis of sintering process* / **D. V. Lazurenko**, I. A. Bataev, V. I. Mali, A. M. Jorge [et al.] // *Materials and Design*. – 2018. – Vol. 151. – P. 8–16.

11. *A Novel Device for Quasi In Situ Studies of Materials Microstructure during Friction* / A. A. Bataev, V. G. Burov, A. A. Nikulina, I. A. Bataev, **D. V. Lazurenko** [et al.] // *Materials Performance and Characterization*. – 2018. – Vol. 7, iss. 3. – P. 330–339.

12. *Formation of Ti-Al intermetallics on a surface of titanium by non-vacuum electron beam treatment* / **D. V. Lazurenko**, I. A. Bataev, I. S. Laptev, A. A. Ruktuev [et al.] // *Materials Characterization*. – 2017. – Vol. 134, iss. – P. 202–212.

13. *High cooling rates and metastable phases at the interfaces of explosively welded materials* / I. A. Bataev, **D. V. Lazurenko**, S. Tanaka [et al.] // *Acta Materialia*. – 2017. – Vol. 135. – P. 277–289.

14. *Structure and oxidation behavior of γ -TiAl coating produced by laser cladding on titanium alloy* / I. N. Maliutina, H. Si-Mohand, **D. V. Lazurenko**, I. A. Bataev [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 319. – P. 136–144.

15. *Multilayered Nb-Al composite manufactured by explosive welding* / I. Maliutina, **D. Lazurenko**, M. Esikov / *MATEC Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 129. – Art. 02023.

16. *Formation of intermetallics at the interface of explosively welded Ni-Al multilayered composites during annealing* / T. S. Ogneva, **D. V. Lazurenko**, I. A. Bataev, V. I. Mali [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 124, Iss.1. – Art. 012132.

17. *Influence of electron beam treatment regimes on the structure and properties of intermetallic clads obtained on titanium substrates* / **D. V. Lazurenko**, I. A. Bataev, O. G. Lenivtseva, I. N. Maliutina [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Art. 012128.

18. *Explosively welded multilayer Ti-Al composites: Structure and transformation during heat treatment* / **D. V. Lazurenko**, I. A. Bataev, V. I. Mali, A. A. Bataev [et al.] // *Materials and Design*. – 2016. – Vol. 102. – P. 122–130.

19. *Explosively welded multilayer Ni-Al composites* / I. A. Bataev, T. S. Ogneva, A. A. Bataev, (...), **D. V. Lazurenko** [et al.] // *Materials and Design*. – 2015. – Vol. 88. – P. 1082–1087.

20. *Metal-Intermetallic Laminate Ti-Al₃Ti Composites Produced by Spark Plasma Sintering of Titanium and Aluminum Foils Enclosed in Titanium Shells* / **D. V. Lazurenko**, V. I. Mali, I. A. Bataev [et al.] // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2015. – Vol. 46, iss. 9. – P. 4326–4334.

21. *Relation between the structure and mechanical properties of Ti-Al-based MIL composites and a thickness of initial metallic components used for their producing* / **D. V. Lazurenko**, T. S. Ogneva, V. S. Lozhkin [et al.] // *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2015), Tomsk, Russia, 2015*. – [Tomsk], 2015. – Art. 7414955.

22. *Influence of laser cladding regimes on structural features and mechanical properties of coatings on titanium substrates* / Y. N. Malyutina, **D. V. Lazurenko**, I. A. Bataev, I. A. Movtchan // *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – Vol. 1683, iss. 1. – Art. 020141.

23. *Structure and Properties of Ti-Nb-C Coatings Obtained by Non-vacuum Electron Beam Cladding* / O. G. Lenivtseva, I. A. Polyakov, **D. V. Lazurenko**, V. S. Lozhkin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Art. 012036.

24. *Lenivtseva, O. G. The structure and wear resistance of the surface layers obtained by the atmospheric electron beam cladding of TiC on titanium substrates* / O.

G. Lenivtseva, **D. V. Lazurenko**, V. V. Samoylenko // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 682. – P. 14–20.

25. *Influence of chemical composition of initial powders on structure and properties of Ti-Ta-Zr coatings fabricated on cp-titanium substrates by electron beam cladding* / V. V. Samoylenko, **D. V. Lazurenko**, O. G. Lenivtseva, I. A. Polyakov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2014. – Vol. 66. – Art. 012026.

26. *The structural particularities of multilayered metal-intermetallic composites fabricated by the spark plasma sintering technology* / **D. V. Lazurenko**, V. I. Mali, A. G. Anisimov [et al.] // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 1040. – P. 800–804.

27. **Lazurenko D. V.** *Structure and properties of Al – Ti multilayered composites with intermetallic layers* / D. V. Lazurenko, V. I. Mali, K.E. Shevtsova // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 682. – P. 132–137.

28. *Influence of the explosively welded composites structure on the diffusion processes occurring during annealing* / **D. V. Pavliukova**, V. I. Mali, A. A. Bataev [et al.] // *8 International forum on strategic technology (IFOST 2013) : MUST, Mongolia, Ulaanbaatar, 2013. – [Ulaanbaatar], 2013. – P. 183–186.*

29. *Structural and mechanical properties of metallic–intermetallic laminate composites produced by explosive welding and annealing* / I. A. Bataev, A. A. Bataev, V. I. Mali, **D. V. Pavliukova** // *Materials and Design*. – 2012. – Vol. 35. – P. 225–234.

30. *Formation of the intermetallic layers in Ti-Al multilayer composites* / V. I. Mali, **D. V. Pavliukova**, I. A. Bataev [et al.] // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vol. 311–313. – P. 236–239.

Публикации в прочих изданиях:

1. *Stabilizing the cubic modification of titanium trialuminide in the structure of Ti-Al₃Ti composites* / **D. Lazurenko**, I. Bataev, A. Stark, F. Pyczak, V. Mali // *Intermetallics 2019 : progr. and abstr. of intern. conf., Germany, Bad Staffelstein, 30 Sept. – 4 Oct. 2019. – Grossmaischeid : Kern GmbH. – 2019. – P. 142–143.*

2. *On the Structure and Mechanical Properties of Multilayered Composite, Obtained by Explosive Welding of High-Strength Titanium Alloys* / **D. V. Lazurenko**, I. Bataev, I. Maliutina, R. Kuz'min [et al.] // *Journal of Composites Science*. – 2018. – Vol. 2, iss. 3. – Art. 39.

Автор сменила фамилию Павлюкова на Лазуренко.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел./факс: (383)346-08-57
формат 60x84 1/16, объем 2,25 п.л., тираж 120 экз.
заказ № 838 подписано в печать 10.09.2020 г