

На правах рукописи



Малютина Юлия Николаевна

**СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ СПЛАВОВ, СВАРЕННЫХ  
ВЗРЫВОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАРЬЕРНЫХ СЛОЕВ**

Специальность: 05.16.09 – материаловедение (в машиностроении)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2015

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

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент  
Мали Вячеслав Иосифович

Официальные оппоненты: Гуревич Леонид Моисеевич,  
доктор технических наук, старший научный сотрудник, доцент  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», заведующий кафедрой материаловедения и композиционных материалов

Бердыченко Александр Анатольевич,  
кандидат технических наук, доцент  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, доцент кафедры современных специальных материалов

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук», г. Черноголовка

Защита состоится «24» декабря 2015 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.13 в Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Новосибирского государственного технического университета,  
[http://www.nstu.ru/science/dissertation\\_sov/dissertations/view?id=15281](http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=15281).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Тюрин Андрей Геннадиевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Разработка новых материалов, предназначенных для изготовления конструкций ответственного назначения, является одной из наиболее актуальных задач в области материаловедения. Литературные данные свидетельствуют о том, что во многих случаях эффективные решения этой задачи могут быть основаны на использовании композитов слоистого типа. Рациональным технологическим процессом, позволяющим получать высококачественные соединения из разнородных материалов, которые отличаются по своим физическим, химическим и механическим свойствам, является сварка взрывом. Этот процесс позволяет получать надежные и прочные соединения между материалами, которые в большинстве случаев не могут быть сварены традиционными методами сварки, в том числе сваркой плавлением.

Природа исходных металлических материалов является основным фактором, определяющим их свариваемость, структуру, формируемую в процессе динамического взаимодействия заготовок, а также механические свойства сварных соединений. Структура швов, формируемых при сварке, определяется характером взаимодействия компонентов. Выделяют материалы полностью растворимые друг в друге с образованием непрерывного ряда твердых растворов; материалы, образующие при взаимодействии химические соединения (в частности интерметаллиды); материалы, не растворимые друг в друге (как правило, представляют собой механические смеси на базе взаимодействующих компонентов).

Наиболее проблематичными при реализации сварочных процессов являются материалы, образующие химические соединения, наличие которых приводит к охрупчиванию сварных швов. Эффективным решением отмеченной проблемы является использование промежуточных вставок из материалов, которые могут выполнять функцию барьеров и препятствовать проявлению нежелательных диффузионных процессов в зонах соединения металлических заготовок. В качестве таких материалов могут быть использованы чистые металлы, которые характеризуются повышенной пластичностью и при этом не склонны к образованию хрупких интерметаллидных соединений с основными материалами композиции. Анализ литературных данных показал, что во многих случаях применение однослойных промежуточных вставок не позволяет получать композиты с достаточным уровнем прочности без образования интерметаллидов. Решения, которые обоснованы в диссертационной работе, связаны с использованием промежуточных барьеров, состоящих из двух тонколистовых металлических пластин.

Проблемами формирования слоистых композитов из разнородных материалов занимаются сотрудники Волгоградского государственного технического университета, Института физики металлов УрО РАН, Белгородского государственного университета, Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирского государственного технического университета и других отечественных и зарубежных научных организаций. В то же время можно вы-

делить мало работ, в которых был проведен глубокий анализ процессов, развивающихся на границах раздела материалов при сварке взрывом и последующем отжиге в зависимости от особенностей взаимодействия элементов и их взаимной растворимости.

Работа выполнена в Новосибирском государственном техническом университете при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, по государственному заданию № 2014/138 (проект № 257).

### **Степень разработанности темы исследования**

Проблема формирования неразъемных соединений из разнородных материалов, в том числе тех, которые при взаимодействии друг с другом склонны к образованию интерметаллидов, на сегодняшний день остается актуальной. Отечественными и зарубежными специалистами подробно изучены особенности сварки заготовок из различных комбинаций материалов. В работах, проанализированных автором диссертации, решение отмеченной проблемы осуществляется с применением различных методов. Установлено, что при сварке разнородных материалов эффективны дополнительные промежуточные слои, выступающие в качестве барьеров на пути диффузии элементов. Наиболее часто соединения из разнородных материалов с применением барьерных вставок получают в процессах сварки плавлением. При этом, как правило, используют один промежуточный слой. Работ, связанных со сваркой давлением заготовок из материалов, образующих химические соединения, в том числе сваркой взрывом, выполнено гораздо меньше. Основное внимание в литературе уделяется термодинамическим процессам, происходящим при сварке взрывом, а также деформационно-энергетическим условиям формирования соединений. С другой стороны, не менее важными являются исследования поведения материалов, обладающих различным характером взаимодействия. Особый интерес представляют механизмы образования соединений при высокоскоростном взаимодействии пластин. В связи с этим целесообразным является проведение детальных исследований с использованием методов структурного анализа на различных масштабных уровнях, а также проведение механических испытаний для определения прочности сварных соединений и слоев, составляющих композит.

### **Цель диссертационной работы:**

Повышение комплекса механических свойств соединений, сформированных сваркой взрывом заготовок из титанового сплава и хромоникелевой стали, а также титана и никелевого сплава с применением барьерных слоев и изучение процессов структурных преобразований, происходящих при динамическом взаимодействии тонколистовых заготовок из разнородных материалов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ структурных преобразований в зоне соединения заготовок из меди и тантала, происходящих в процессе сварки взрывом.
2. Изучение особенностей поведения материалов с различным характером взаимодействия при реализации высокоскоростного нагружения и дополнительного нагрева.

3. Исследование структуры и механических свойств сварных соединений типа "титановый сплав – хромоникелевая сталь" и "титан – никелевый сплав", полученных с применением промежуточных слоев.

4. Анализ механических свойств композиционных материалов, содержащих промежуточные слои, при комнатной и повышенных температурах.

#### **Научная новизна**

1. На примере сварки взрывом пластин из титана ВТ1-0 с никелевым сплавом ХН73МБТЮ-ВД, склонных к образованию хрупких интерметаллидов, обоснована эффективность применения тонких барьерных вставок с использованием заготовок из тугоплавких материалов. Показано, что однослойные барьеры из тантала не обеспечивают удовлетворительный уровень прочности сварных соединений при сварке титановых сплавов ВТ20 с хромоникелевой аустенитной сталью 09Х18Н10Т. Для достижения более высоких прочностных свойств композитов обосновано применение двухслойных барьерных вставок из тантала и бронзы БрБ2.

2. Обоснованы материалы, рациональные значения толщины барьерных слоев и технология сварки композитов типа "титановый сплав – барьерный слой – хромоникелевая аустенитная сталь 09Х18Н10Т" и "титан – барьерный слой – никелевый сплав ХН73МБТЮ-ВД" с высоким уровнем прочностных свойств при комнатной температуре и при нагреве до 500 °С.

3. Экспериментально установлено, что в зоне сварки взрывом пластин тантала и меди, не имеющих взаимной растворимости, образуется слой толщиной 20...40 мкм с повышенным уровнем твердости (2800 МПа), характеризующийся высокодисперсной гетерофазной структурой в виде смеси фрагментов из соединяемых металлов. Функцию матричного материала преимущественно выполняет медь, в которой тантал находится в виде изолированных включений размером ~ 5...50 нм. Предложен механизм образования гетерофазной структуры в зоне перемешивания меди и тантала, основанный на формировании впереди точки контакта фрагментированной кумулятивной струи, состоящей преимущественно из меди, движущейся вдоль поверхности пластины тантала и взаимодействующей с неровностями последней. Сформированная таким образом структура термически стабильна при нагреве до 500 °С.

4. Для формирования композиционных материалов "титан – никелевый сплав" с минимальным количеством дефектов в зонах сварных швов и максимальной прочностью предложено применять барьерные слои с суммарной толщиной 100...300 мкм. Превышение этих значений сопровождается снижением предела прочности соединения сварных соединений.

5. В качестве промежуточной вставки при сварке титана ВТ1-0 со сплавом ХН73МБТЮ-ВД предложена комбинация из пластин "сталь 12Х18Н10Т – тантал ТВЧ". Методом просвечивающей электронной микроскопии обнаружено, что на границе соединения промежуточных слоёв формируются аморфные, а также метастабильные кристаллические фазы интерметаллидного ( $Fe_5Ta_3$ ) и твёрдорастворного типа. Преимущества промежуточной вставки данного типа обусловлены затруднением развития рекристаллизационных процессов в стальной пластине и проявляются при повышенных температурах испытаний.

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Экспериментально установлено, что композиционные материалы типа "титановый сплав ВТ20 – хромоникелевая сталь 09Х18Н10Т" и "титан ВТ1-0 – никелевый сплав ХН73МБТЮ-ВД", полученные методом сварки взрывом с применением барьерных слоев, обладают высокими прочностными характеристиками и могут использоваться при производстве изделий ответственного назначения.

2. С учетом результатов математического моделирования, а также механических испытаний композиционных материалов, содержащих промежуточные слои, разработаны рекомендации по повышению их прочностных свойств путем выбора рациональной толщины пластин барьерных вставок.

3. На основании проведенных исследований разработаны практические рекомендации по выбору материала барьерного слоя при использовании сваренных взрывом композитов в условиях комнатной и повышенных температур. Установлено, что одним из основных факторов, определяющих условия эксплуатации слоистых композитов, является температура рекристаллизации материалов, входящих в композицию. При эксплуатации композиционного материала типа "титан – никелевый сплав ХН73МБТЮ-ВД" в интервале температур до 500 °С целесообразно применение промежуточной вставки "медь – тантал". Замена меди на более прочную и термически стойкую хромоникелевую сталь 12Х18Н10Т позволяет повысить температуру эксплуатации композита до 600 °С.

4. Результаты исследований, выполненных в диссертационной работе, используются в лекционных курсах и при выполнении лабораторных работ по дисциплинам "Материаловедение" и "Прогрессивные материалы и технологии" при реализации учебного процесса по направлениям "Материаловедение и технологии материалов" и "Наноинженерия" в Новосибирском государственном техническом университете.

**Личный вклад автора** заключается в формулировании задач, проведении структурных исследований и механических испытаний материалов, проведении математического моделирования, анализе и обобщении экспериментальных данных, сопоставлении результатов проведенных исследований с имеющимися литературными данными, формулировании выводов по работе.

### **Методология и методы исследования**

Композиционные материалы, содержащие промежуточные слои, были сформированы методом сварки взрывом в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. Исследования полученных образцов выполняли на аналитическом оборудовании, уровень которого соответствует современным отечественным и зарубежным научным лабораториям в области материаловедения. Структурные исследования композитов, в том числе особенности строения сварных границ, изучали с использованием оптического микроскопа *Carl Zeiss Axio Observer Z1m*, растрового электронного микроскопа *Carl Zeiss EVO 50 XVP*, оснащенного детектором для проведения энергодисперсионного анализа, и просвечивающего электронного микроскопа *Tecnai G2 20 TWIN*, оснащенного энергодисперсионным анализатором *EDAX*. Анализ микротвердости материа-

лов проводился на микротвердомере *Wolpert Group 402 MVD*. Прочностные свойства полученных композиционных материалов оценивали на установке *Instron 3369*. Кратковременные прочностные испытания композиционных материалов при повышенных температурах были проведены на универсальной машине *Zwick/Roell Z100*, оснащенной нагревательной печью *МАУТЕС*.

#### **На защиту выносятся:**

1. Результаты исследования структуры и механических свойств сварного соединения из пластин меди и тантала, сформированного в процессе сварки взрывом и последующей термической обработки.
2. Результаты математического моделирования процессов динамического соударения тонколистовых пластин из меди и тантала с использованием метода гидродинамики сглаженных частиц.
3. Результаты исследования структуры и свойств композиционных материалов с различными промежуточными слоями, полученных по технологии сварки взрывом и последующей термической обработки.
4. Результаты исследования композиционных материалов, содержащих промежуточные слои, в условиях статического нагружения при комнатной и повышенной температурах.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Все экспериментальные исследования, проведенные в диссертационной работе, были выполнены с применением современных методов анализа структуры и механических свойств композиционных материалов, использованием методов статистической обработки полученных результатов, применением взаимодополняющих методов изучения структуры и механических свойств материалов, сопоставлением результатов физических исследований с данными, полученными в ходе математического моделирования. Полученные в работе результаты надежно подтверждаются материалами экспериментальных исследований, а также данными, приведенными в отечественной и зарубежной литературе.

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались на научно-техническом семинаре в ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь, 2013 г., VIII международном форуме по стратегическим технологиям *IFOST-2013*, г. Улан-Батор (Монголия), 2013 г., всероссийской научной конференции «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2013), г. Новосибирск, 2013 г., четвертой международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении», г. Новосибирск, 2013 г., четырнадцатой всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», г. Новосибирск, 2013 г., международной научной конференции «Современные техника и технологии», г. Томск, 2013 г., всероссийской научной конференции «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2014), г. Новосибирск, 2014 г., пятой международной научно-практической конференции «Инновационные технологии и экономика в машиностроении», г. Юрга, 2014 г., пятнадцатой всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», г. Новосибирск, 2013 г., IX международном форуме по стратегическим технологиям *IFOST-2014*, г. Читтагонг (Бангладеш), 2014 г., первой международной научной

конференции молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение», г. Новосибирск, 2014 г., VI всероссийской конференции "Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине", г. Новосибирск, 2015 г.

По результатам исследований опубликовано 19 печатных научных работ, из них: 5 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ; 14 – в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций.

### Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести разделов, основных результатов и выводов и приложений. Основной текст работы изложен на 215 страницах и включает 73 рисунка, 13 таблиц, список литературы из 176 наименований.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отражена актуальность диссертационной работы, дана характеристика проведенных исследований.

**В первом разделе** "Особенности сварки материалов, склонных к образованию интерметаллидов" выполнен аналитический обзор литературы по проблемам свариваемости разнородных материалов, склонных к образованию хрупких химических соединений. Рассмотрены наиболее эффективные методы сварки разнородных материалов, их особенности и преимущества. Подробно описаны материалы, используемые в качестве барьерных промежуточных слоев, их свойства и способы введения между свариваемыми материалами. Отражено влияние промежуточных слоев на структуру и свойства композиционных материалов.

**Во втором разделе** "Материалы и методы исследования" описаны методы изучения структуры, а также механических свойств анализируемых материалов, представлен технологический процесс формирования слоистых композиционных материалов.

На первом этапе экспериментальных исследований изучали особенности получения композиции "медь – тантал". Сварку взрывом осуществляли в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева по схеме с параллельным расположением пластин (рисунок 1). Пластины тантала толщиной 1 мм располагали на стальном основании. В качестве метаемой использовали пластины меди толщиной 2 мм. С целью анализа термической стабильности соединения "медь – тантал" проводили отжиг образцов при температурах в интервале от 100 до 900 °С. Время выдержки в печи составляло 1 час. На следующем этапе были изучены структура и свойства трех типов четырехслойных композитов. Схема и режимы их сварки были такими же, как при получении биметалла "медь – тантал". Композит первого типа представлял собой пакет пластин из титанового сплава ВТ20 и хромоникелевой

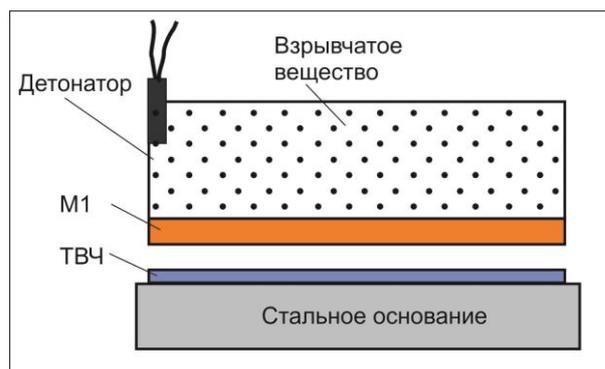


Рисунок 1 – Схема сварки взрывом двухслойного композита "медь – тантал"

стали 09X18H10T. Функцию биметаллической промежуточной вставки выполняли фольги из бронзы БрБ2 толщиной 200 мкм и тантала толщиной 100 мкм (рисунок 2 а). Композиты второго и третьего типа были получены из пластин титана ВТ1-0 и никелевого сплава ХН73МБТЮ-ВД (рисунок 2 б). В одном из них промежуточная вставка состояла из меди и тантала. В другом композите для изготовления вставки использовали хромоникелевую сталь 12X18H10T и тантал.

Процессы, происходящие при сварке взрывом и последующем нагреве материалов, изучали с применением методов металлографического анализа (микроскоп *Axio Observer Z1m*), а также растровой (микроскоп *Carl Zeiss EVO 50 XVP*) и просвечивающей (микроскоп *Tecnaï 20 G2 TWIN*) электронной микроскопии. Для определения элементного состава локальных зон образцов проводили микрорентгено-спектральный анализ исследуемых материалов на детекторе типа *INCA X-ACT (Oxfords Instruments)*. Фазовый состав областей перемешивания оценивали путем анализа дифракционных

картин, полученных с применением просвечивающей электронной микроскопии. Измерение микротвердости в околошовных зонах сваренных взрывом пластин, а также в областях, не претерпевших существенных изменений, проводили на полуавтоматическом микротвердомере *Wolpert Group 402 MVD*. Прочностные характеристики композиционных материалов, а также прочность соединения слоев оценивали при комнатной и повышенных температурах.

**В третьем разделе** "Моделирование процессов сварки взрывом листовых заготовок из технически чистых меди и тантала" описаны результаты применения программного пакета *ANSYS AUTODYN* для определения параметров ударно-волновых и деформационно-тепловых процессов, происходящих при соударении пластин меди и тантала. Моделирование проводилось с использованием бессеточного метода гидродинамики сглаженных частиц, позволяющего упростить обработку материала, деформируемого с большими степенями. Показано, что в процессе динамического взаимодействия тонколистовых пластин меди и тантала впереди точки контакта формируется дискретная кумулятивная струя, источник которой определяется свойствами свариваемых материалов. Установлено, что при сварке меди и тантала менее заметный вклад в процесс образования кумулятивной струи вносит тантал. В узком поверхностном слое соударяемых пластин наблюдается существенный рост давления, значений степени и скорости пластической деформации. Интенсивной пластической деформации подвергается объем материала на глубине до 0,2 мм от границы соударения. Максимальная температура, зафиксированная с применением лагранжевых

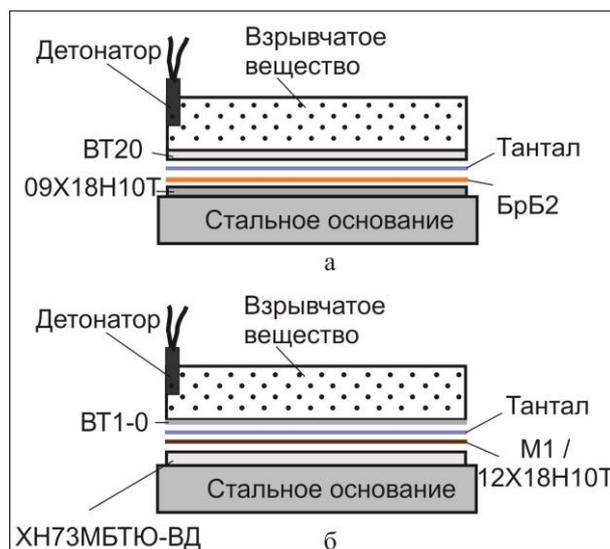


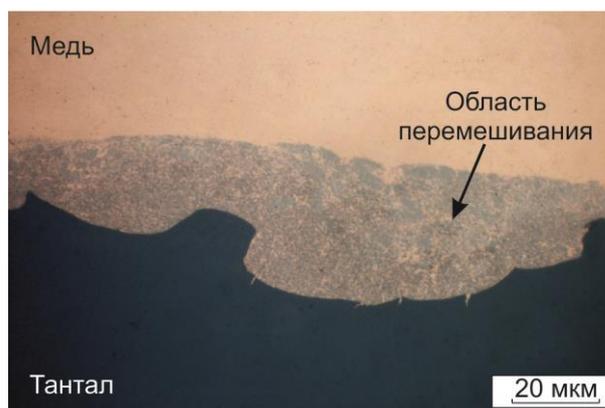
Рисунок 2 – Схемы сварки взрывом четырехслойных композитов "титановый сплав – тантал – бронза – хромоникелевая сталь 09X18H10T" (а) и "титан – тантал – медь/хромоникелевая сталь 12X18H10T – никелевый сплав" (б)

датчиков, наблюдается внутри вихревых построений. Её величина составляет 4800 К, что существенно превышает значения температуры плавления меди и тантала. Температура материала на гребнях и впадинах границ волнообразной формы колеблется в пределах от 1000 до 2500 К.

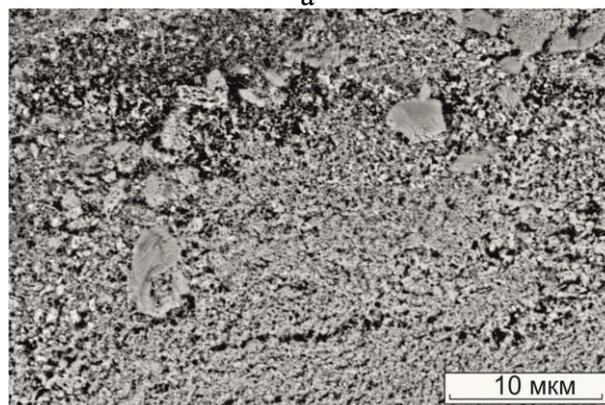
**Четвертый раздел** "Структура и свойства биметаллических композитов "медь – тантал", сформированных методом сварки взрывом" посвящен изучению структурных преобразований, протекающих при высокоскоростном соударении пластин и последующей термической обработке, определению показателей микротвердости материалов вблизи области сварки, а также выбору допустимой толщины барьерного слоя для дальнейшего формирования композиционных материалов.

Структура сварного соединения "медь – тантал" (в продольном сечении) после сварки взрывом представлена на рисунке 3. Методами оптической металлографии и растровой электронной микроскопии между пластинами тантала и меди выявлен сплошной слой интенсивно деформированного материала толщиной 20...40 мкм (рисунок 3 а, б). Внутри него зафиксирован сплав, перемешанный при динамическом взаимодействии разнородных материалов. В общем случае структуру промежуточного гетерофазного слоя можно определить как мелкодисперсную смесь меди и тантала. Функцию матричного материала, характеризующегося непрерывностью, преимущественно выполняет медь. На фоне светлой медной матрицы можно наблюдать множество темных частиц тантала округлой формы (рисунок 3 в) размером ~ 5...50 нм.

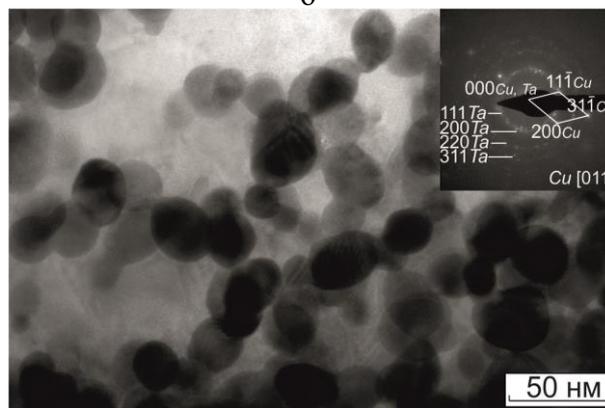
Механизм формирования промежуточного слоя можно представить следующим образом (рисунок 4). При динамическом взаимодействии пластин меди и тантала в точке контакта формируется дискретная кумулятивная струя, состоящая преимущественно из фрагментов меди. При соударении фрагментов струи с поверхностными слоями пластин формируется зона перемешивания. Большинство частиц в зоне перемешивания распределены хаотично. Следует отметить, что значения температуры плавления меди и тантала различаются почти в три раза (1084 °С и



а



б



в

Рисунок 3 – Общий вид сварного соединения "медь – тантал" (а) и структура гетерофазной прослойки механически перемешанных материалов (б, в)

2996 °С). Частицы тантала в таких условиях остаются твердофазными или частично оплавленными. Наряду с хаотично перемешанными материалами встречаются микрообъемы меди с упорядоченно расположенными частицами тантала.

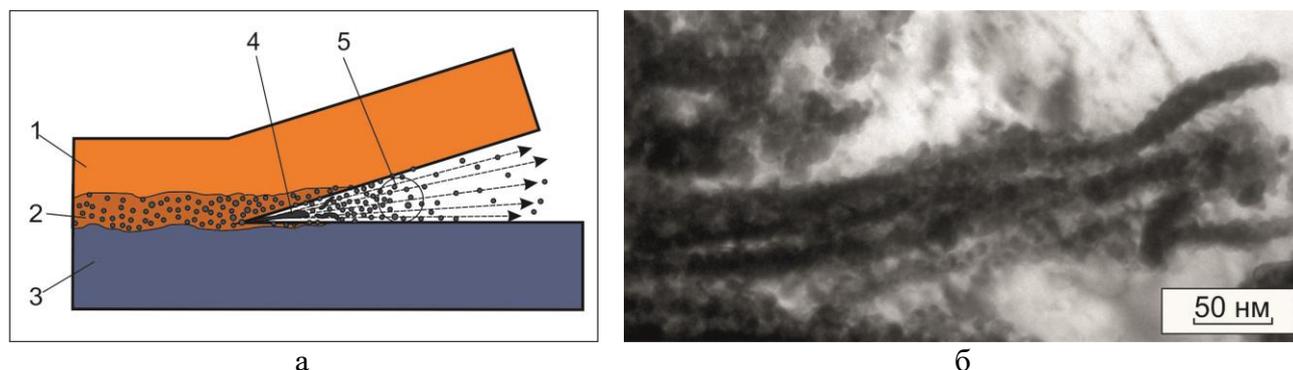


Рисунок 4 – Механизм формирования области перемешивания между пластинами меди и тантала (а) и структура, подтверждающая данный механизм (б): 1 – пластина меди; 2 – гетерофазная прослойка; 3 – пластина тантала; 4 – фрагменты кумулятивной струи; 5 – кумулятивная пелена

Для оценки термической стабильности сварного соединения "медь – тантал" были проведены эксперименты с выдержкой образцов в течение 1 часа при 100...900 °С и последующим изучением структурных изменений и микротвердости материалов. Установлено, что зона соединения "медь – тантал" термически стабильна при нагреве до 500 °С. Максимальный уровень микротвердости (2800 МПа) был зафиксирован в узком промежуточном слое с гетерофазной структурой (рисунок 5). После отжига при 900 °С микротвердость промежуточного слоя со смешанной структурой снижается до значения, соответствующего микротвердости тантала (~ 1500 МПа).

Методом численного моделирования, выполненного в пакете *MSC. Marc* 2012, показано, что с увеличением толщины меди и тантала прочностные свойства композиционного материала снижаются. Максимальный уровень прочности сварных соединений соответствует значениям толщины пластин в диапазоне 100...300 мкм. Результаты математического моделирования подтверждаются данными, полученными при проведении экспериментальных исследований (рисунок 6).

**В пятом разделе** "Структура и свойства многослойных композиций, полученных по технологии сварки взрывом с применением барьерных слоев" отражены результаты анализа структурных преобразований, происходящих на границах раздела заготовок, а также процессов деформации при разрушении слоистых композиций, полученных с применением промежуточных слоев.

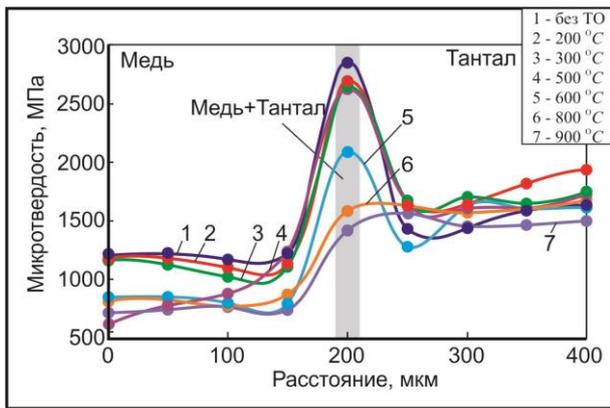


Рисунок 5 – Микротвердость области перемешивания и прилегающих к ней зон после сварки взрывом пластин меди и тантала и последующего отжига сварных соединений при различных температурах

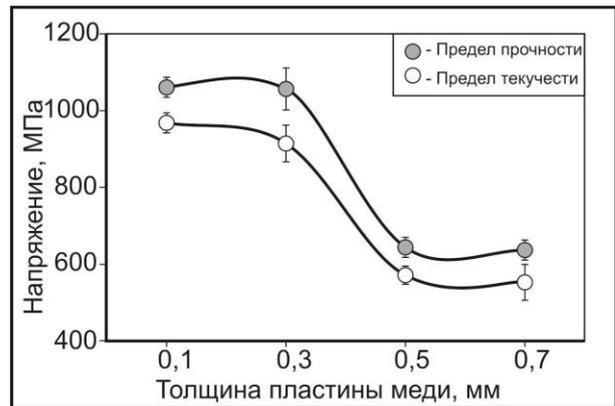
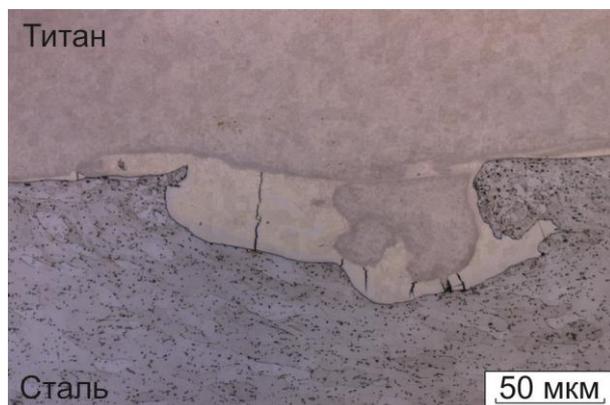
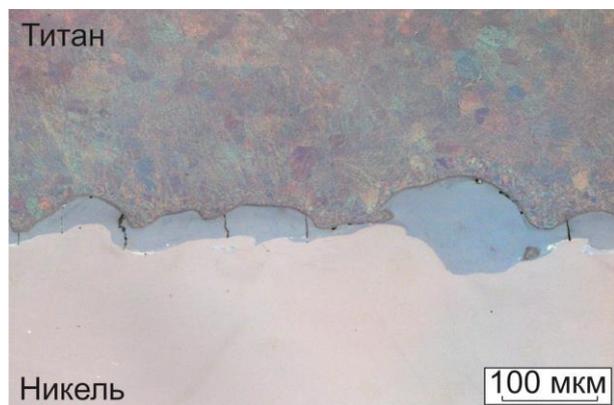


Рисунок 6 – Влияние толщины медного слоя на прочность композиционного материала

На границах соединений пластин титана и низкоуглеродистой стали, а также титана и никеля, сваренных взрывом, зафиксированы вихревые зоны, внутри которых присутствуют микротрещины, обусловленные возникновением хрупких интерметаллидов (рисунок 7). Для устранения описанных выше дефектов были сформированы композиционные материалы типа "титановый сплав – хромоникелевая сталь 09X18H10T" и "титан – никелевый сплав" с применением тонких барьерных вставок, введенных между заготовками.



а



б

Рисунок 7 – Структура композиционных материалов титан – сталь (а) и титан – никель (б), сформированных по технологии сварки взрывом

Использование при сварке хромоникелевой аустенитной стали 09X18H10T и титанового сплава BT20 дополнительных комбинированных промежуточных вставок из тонколистовой бронзы БрБ2 и тантала является эффективным техническим решением, предотвращающим прямой контакт металлургически плохо совместимых материалов и позволяющим получать сварные швы с пониженным содержанием дефектов (рисунок 8 а). В вихревых зонах, возникших на границе сварного соединения "бронза – тантал", была получена гетерофазная смесь, состоящая из мелкодисперсных частиц метастабильного  $\beta$ -тантала и медной основы. Легирующие элементы (бериллий и никель), присутствующие в бронзе, препятствуют переходу тантала в стабильное состояние при нагреве

композиата до 800 °С. Одна из особенностей, проявляющихся на границе соединения бронзы и тантала в процессе отжига при 800 °С, заключается в образовании по всей длине пластин тонкого слоя толщиной ~ 2 мкм. Основной структурной составляющей этого слоя является интерметаллид типа  $Ve_{17}Ta_2$  (рисунок 8 б).

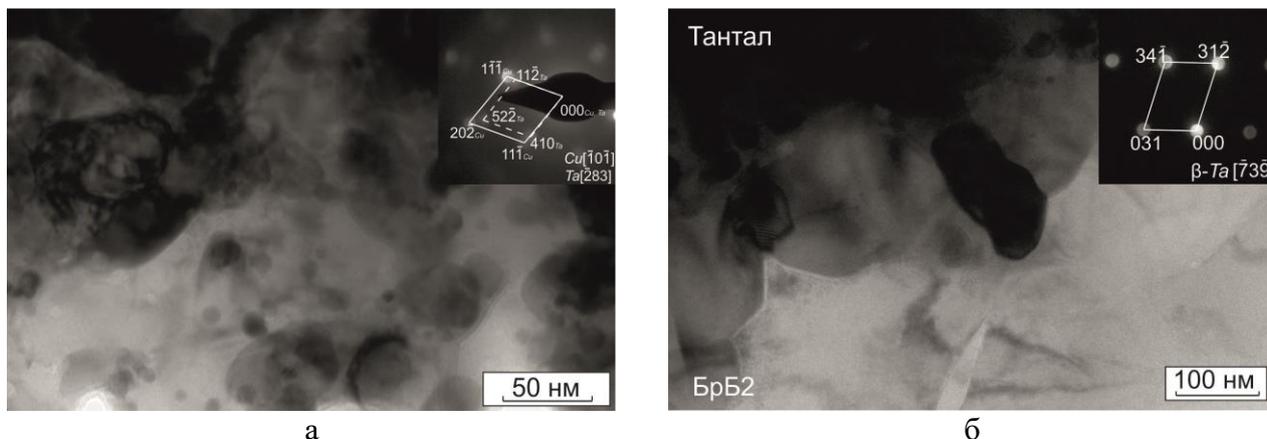


Рисунок 8 – Тонкое строение прослойки, возникшей на границе между пластинами бронзы и тантала в процессе сварки взрывом (а) и последующего нагрева до 800°С (б)

Механические испытания показали, что значение предела прочности композита "титановый сплав – хромоникелевая сталь 09Х18Н10Т" с барьерной вставкой из бронзы и тантала находится на уровне, превышающем прочностные свойства исходных титана ВТ20 и стали 09Х18Н10Т (рисунок 9). Увеличению прочностных характеристик композиционного материала способствует деформационное упрочнение пластин, имеющее место в процессе сварки взрывом. Экспериментально показано, что с позиции повышения прочности соединения заготовок из разнородных материалов (стали 09Х18Н10Т и сплава ВТ20) двухслойная промежуточная вставка, сочетающая пластины бронзы и тантала, более предпочтительна по сравнению с однослойной (танталовой) вставкой.

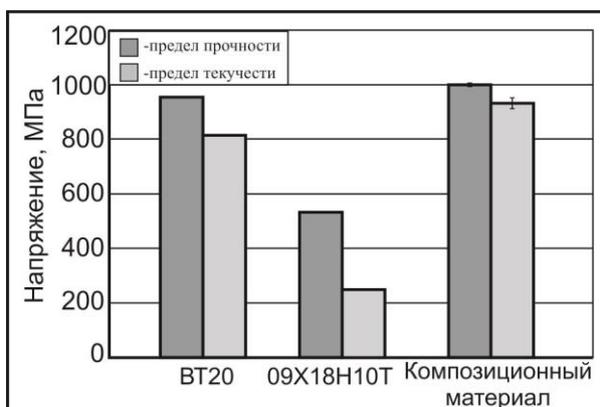


Рисунок 9 – Результаты испытаний четырехслойной композиции на растяжение

При сварке взрывом композиционного материала на основе титана и никелевого сплава ХН73МБТЮ-ВД с использованием промежуточной вставки из хромоникелевой стали 12Х18Н10Т и тантала зафиксирована потеря сплошности стальной пластины, результатом чего является образование трещин, распространяющихся вдоль гребней волнового профиля (рисунок 10 а). Образование дефектов этого типа наблюдалось в тех случаях, если при сварке взрывом пластина из хромоникелевой стали вытеснялась пластиной из никелевого сплава. При этом в локальных участках происходило соединение пластин из никелевого сплава и тантала. В случае отсутствия соединения между этими материалами длина образовавшихся трещин была существенно меньше (рисунок 10 б).

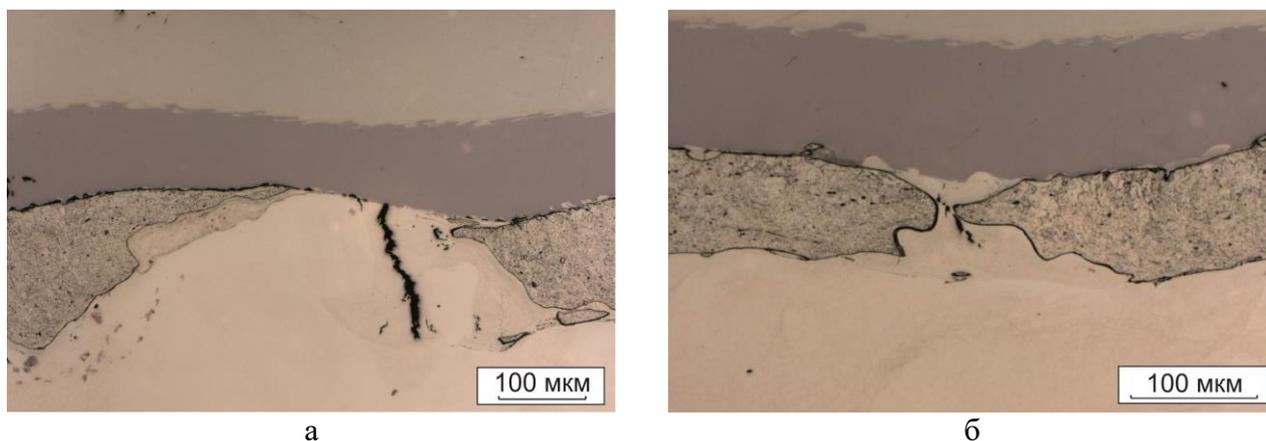


Рисунок 10 – Потеря сплошности пластины из хромоникелевой стали 12X18H10T

Тонкое строение вихрей, возникших между хромоникелевой сталью 12X18H10T и танталом, а также прилегающих к ним микрообъемов, было изучено методом просвечивающей электронной микроскопии. В зоне шва между танталом и сталью в процессе их интенсивного взаимодействия был сформирован тонкий слой толщиной  $\sim 200$  нм (рисунок 11 а). Анализ дифракционных картин, полученных при съемке различных участков слоя, показал, что он состоит из метастабильной интерметаллидной фазы  $Fe_5Ta_3$ . Одна из особенностей тонкого строения границы "тантал – хромоникелевая аустенитная сталь 12X18H10T" связана с формированием частично аморфной структуры (рисунок 11 б).

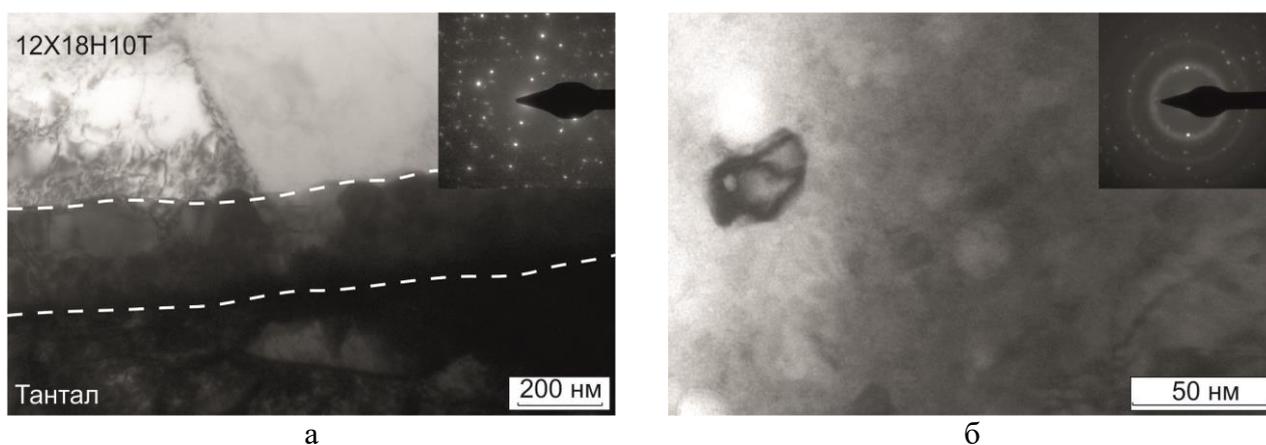


Рисунок 11 – Особенности строения вихрей и прилегающих к ним микрообъемов на границе между хромоникелевой сталью 12X18H10T и танталом

Результаты кратковременных испытаний композиционных материалов со вставками из меди и тантала, а также из хромоникелевой стали 12X18H10T и тантала при повышенных температурах представлены на рисунке 12. Приведенные на графике данные свидетельствуют о том, что при комнатной температуре прочностные показатели композиционного материала с промежуточной вставкой "медь – тантал" превышают аналогичные свойства композиционного материала, содержащего комбинированные вставки из стали и тантала. Основным процессом, отвечающим за механизм разупрочнения при нагреве, является

рекристаллизация. В работе это показано на примере меди. В процессе сварки взрывом исходные зерна меди деформируются с образованием дефектной структуры, характеризующейся высоким уровнем внутренних напряжений.

При последующем нагреве в результате рекристаллизационных процессов напряжения релаксируют. В меди рекристаллизационные процессы наблюдаются уже при 500 °С, что приводит к падению прочностных свойств композитов. При испытании композиционного материала, содержащего вставку из материала с более высокой температурой плавления (хромоникелевая сталь 12Х18Н10Т), снижение прочности отмечается в процессе нагрева до 900 °С.

В шестом разделе "Апробация результатов экспериментальных исследований" приведены рекомендации по практическому применению сваренных взрывом композиционных материалов на основе разнородных материалов, содержащих промежуточные слои. Композиционные материалы, полученные сваркой взрывом с применением барьерных слоев, могут быть использованы при изготовлении деталей ответственного назначения в авиации, энергетике, химической промышленности. Результаты диссертационной работы представляют практический интерес для ОАО "Авиадвигатель" (г. Пермь) и используются в виде рекомендаций при разработке перспективной продукции. Кроме того, результаты исследований используются в лекционных курсах и при выполнении лабораторных работ по дисциплинам "Материаловедение" и "Прогрессивные материалы и технологии" при реализации учебного процесса по направлениям "Материаловедение и технологии материалов" и "Наноинженерия" в Новосибирском государственном техническом университете.

### Заключение

1. Применение тонких барьерных слоев при сварке взрывом заготовок из разнородных материалов, склонных к образованию интерметаллидов, является эффективным технологическим процессом при формировании надежных, прочных и бездефектных соединений. Использование промежуточных слоев, состоящих из двух материалов, не имеющих взаимной растворимости, позволяет повысить прочностные свойства композиционных материалов титанового сплава ВТ20 и хромоникелевой аустенитной стали 09Х18Н10Т, а также титана ВТ1-0 и никелевого сплава ХН73МБТЮ-ВД.

2. С применением программного комплекса *ANSYS AUTODYN* численно определены параметры ударно-волновых и деформационно-тепловых процессов при соударении тонколистовых металлических пластин меди и тантала. В процессе их динамического взаимодействия впереди точки контакта формируется дискретная кумулятивная струя, отклоняющаяся от биссектрисы угла со-

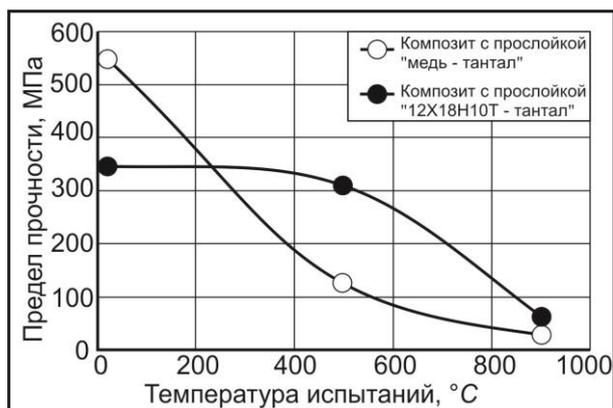


Рисунок 12 – Предел прочности композитов со вставками "медь – тантал" и "хромоникелевая сталь 12Х18Н10Т – тантал", испытанных при повышенных температурах

ударения в сторону более плотного тантала. Расчеты показали, что в тонком поверхностном слое на расстоянии 0,2 мм от границы сопряжения соударяемых пластин наблюдается существенный рост давления, степени и скорости пластической деформации. Максимальная температура внутри вихревых построений достигает 4800 К, что существенно превышает значения температуры плавления меди и тантала. На гребнях и впадинах волн материал нагревается в пределах от 1000 до 2500 К.

3. В процессе сварки взрывом в зоне соединения пластин тантала и меди образуется промежуточный слой с гетерофазной высокодисперсной структурой, представляющей собой смесь фрагментов из разнородных материалов. Тантал в меди находится в виде изолированных включений размером 5...50 нм. Микротвердость гетерофазной прослойки (2800 МПа) существенно выше микротвердости недеформированной меди (1300 МПа) и тантала (1600 МПа). Анализ полученных результатов свидетельствует о термической стабильности прослойки при нагреве образцов до 500 °С. Предложенный механизм образования структуры в зоне перемешивания меди и тантала основан на формировании впереди точки контакта пластин фрагментированной кумулятивной струи, которая движется непосредственно вдоль поверхности пластины тантала и взаимодействует с неровностями последней.

4. С увеличением толщины прослоек меди и тантала прочностные свойства композиционного материала снижаются. Суммарная толщина пластин барьерного слоя, соответствующая максимальному уровню прочности сварных соединений, составляет 100...300 мкм. На примере композиционных материалов "титан ВТ1-0 – никелевый сплав ХН73МБТЮ-ВД" с промежуточными слоями из меди и тантала показано, что увеличение толщины слоя меди от 0,1 мм до 0,7 мм сопровождается снижением предела прочности образцов на 40 %. Результаты проведенных расчетов объясняются особенностями механизма деформационного упрочнения промежуточных слоев различной толщины. Экспериментальные данные, полученные при проведении прочностных испытаний, подтверждены результатами численного моделирования.

5. Механические испытания показали, что значение предела прочности композита "титановый сплав – хромоникелевая сталь 09Х18Н10Т" с барьерной вставкой из бронзы и тантала находится на уровне, превышающем прочностные свойства исходных титана ВТ20 и стали 09Х18Н10Т. Полученный результат объясняется деформационным упрочнением соединяемых пластин в процессе сварки взрывом. Установлено, что с позиции повышения прочности соединения заготовок из разнородных материалов (стали 09Х18Н10Т и сплава ВТ20) двухслойная промежуточная вставка, сочетающая пластины бронзы и тантала, более предпочтительна по сравнению с однослойной танталовой вставкой.

6. Формирование структуры в вихревых зонах и интенсивно деформированных микрообъемах материалов, полученных сваркой взрывом с применением барьерных слоев, определяется характером их взаимодействия:

– В процессе сварки взрывом между материалами, обладающими высокой или неограниченной растворимостью, формируются твердые растворы ("бронза

– хромоникелевая сталь", "тантал – титановый сплав", "медь – никелевый сплав").

– При сварке взрывом материалов, не имеющих взаимной растворимости, наблюдается механическое перемешивание поверхностных микрообъемов пластин с образованием мелкодисперсной гетерофазной смеси ("бронза – тантал", "медь – тантал").

– Если материалы склонны к образованию химических соединений, в интенсивно деформированных слоях формируются метастабильные фазы, имеющие частично аморфное или интерметаллидное строение ("хромоникелевая сталь – тантал").

7. Процессом, определяющим температуру, до которой может быть нагрет слоистый композит при эксплуатации, является рекристаллизация какого-либо материала, входящего в него. Для получения сваркой взрывом композиции типа "титан ВТ1-0 – никелевый сплав ХН73МБТЮ-ВД", нагреваемого при эксплуатации до 500 °С, целесообразно применение промежуточной вставки "медь – тантал". Использование меди в качестве одного из слоев комбинированной промежуточной вставки обеспечивает предел прочности композиции на уровне 1060 МПа, что на 30 % превышает предел прочности исходного никелевого сплава. Замена меди на более прочную и термически стойкую хромоникелевую сталь 12Х18Н10Т позволяет повысить температуру эксплуатации композита до 600 °С.

8. Основные результаты исследований, проведенных в диссертационной работе, используются в лекционных курсах и при выполнении лабораторных работ по дисциплинам "Прогрессивные материалы и технологии" и "Материаловедение наноматериалов и наносистем") при реализации учебного процесса по направлениям "Материаловедение и технологии новых материалов" и "Наноинженерия" в Новосибирском государственном техническом университете.

#### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:**

##### В изданиях, рекомендованных ВАК

1. *Structure and microhardness of Cu-Ta joints produced by explosive welding [Text] / Iu. N. Maliutina, V. I. Mali, I. A. Bataev, A. A. Bataev, M. A. Esikov, A. I. Smirnov, K. A. Skorokhod // The Scientific World Journal. – 2013. – Vol. 2013. – P. 1–7. [Структура и микротвердость соединений Cu-Ta, полученных сваркой взрывом].*

2. *Mali, V. I. Microstructure and strength of explosively welded titanium / Ni-based alloy composite with Cu / Ta as interlayer [Text] / V. I. Mali, Iu. N. Maliutina, K. A. Skorokhod // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 21–24. [Микроструктура и прочность сваренных взрывом композитов титан / сплав на основе никеля с Cu/Ta в качестве прослойки].*

3. *Microstructure and mechanical properties of copper-tantalum joints [Text] / V. I. Mali, A. A. Bataev, I. A. Bataev, Yu. N. Malyutina, M. A. Esikov, V. S. Lozhkin // The 8<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology, Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013. – Mongolia : MUST, 2013. Vol. 1. – P. 9–12. [Микроструктура и механические свойства медь-танталовых соединений].*

4. *Explosive welding of titanium with stainless steel using bronze-tantalum as interlayer* [Text] / *Iu. N. Maliutina, A. A. Bataev, I. A. Bataev, V. I. Mali, K. A. Skorokhod* // *The 9<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology, Bangladesh, Chittagong, 21–23 October 2014. – Bangladesh : CUET, 2013. – P. 436–439.* [Сварка взрывом титана с нержавеющей сталью, используя бронзу-тантал в качестве промежуточного слоя].

5. Структурные исследования покрытий системы "титан - тантал", полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки [Текст] / И. А. Батаев, Т. В. Журавина, А. А. Руктуев, О. Г. Ленивцева, Ю. Н. Ромашова // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3 (56). – С. 56–59.*

#### В прочих изданиях

6. Ромашова, Ю. Н. Получение композиционного материала "медь-тантал" методом сварки взрывом [Текст] / Ю. Н. Ромашова, К. А. Скороход // *Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе : материалы 11-й всероссийской науч. - практ. конференции, Новосибирск, 27 марта 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013 – С. 295–297.*

7. Малютина, Ю. Н. Особенности строения соединения "медь-тантал", полученного методом сварки взрывом [Текст] / Ю. Н. Малютина, К. А. Скороход // *Наука. Промышленность. Оборона : тр. XIV всероссийской науч.-техн. конференции, Новосибирск, 24–26 апр. 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 383–384.*

8. Ромашова, Ю. Н. Структурный анализ композиционного материала системы "медь-тантал" [Текст] / Ю. Н. Ромашова, К. А. Скороход // *Современные техника и технологии (СТТ–2013) : тр. XIX международной науч. - практ. конференции студентов и молодых ученых, Томск, 15–19 апр. 2013 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2013. Том 2. – С. 138–139.*

9. Малютина, Ю. Н. Микроструктурный анализ соединения "медь - тантал", сформированного по технологии сварки взрывом / Ю. Н. Малютина, К. А. Скороход // *Новые материалы. Создание, структура, свойства-2013 : сборник трудов XIII Всероссийской школы-семинара, Томск, 9–13 сентяб. 2013 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2013. – С. 119–120.*

10. Малютина, Ю. Н. Структурная стабильность соединения "Cu-Ta", сформированного по технологии сварки взрывом и последующей термической обработки [Текст] / Ю. Н. Малютина, К. А. Скороход, Д. А. Петрина // *Инновации в машиностроении : тр. 4-ой международной научно-практической конференции, Новосибирск, 2–4 октяб. 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 317–319.*

11. Малютина, Ю. Н. Влияние термической обработки на структуру и механические свойства соединения медь – тантал [Текст] / Ю. Н. Малютина, К. А. Скороход, А. В. Иванова // *Наука. Технологии. Инновации : материалы всероссийской науч. конференции молодых ученых, Новосибирск, 21–24 нояб. 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 207–209.*

12. Ромашова, Ю. Н. Исследование структуры композиционного материала "медь – тантал", полученного методом искрового плазменного спекания [Текст]

/ Ю. Н. Ромашова // Студент и научно-технический прогресс : материалы 51-й международной науч. - студ. конференции, секция "Новые материалы и технологии", Новосибирск, 12–18 апр. 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 60.

13. Малютина, Ю. Н. Композиционный материал медь – тантал, сформированный сваркой взрывом и последующей термической обработкой [Текст] / Ю. Н. Малютина, К. А. Скороход // Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ–2014) : сборник научных трудов III международной науч. - техн. конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 26–28 марта 2014 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2014. – С. 357–359.

14. Малютина, Ю. Н. Формирование надежного сварного соединения между титановыми и никелевыми сплавами путем сварки взрывом [Текст] / Ю. Н. Малютина, К. А. Скороход, О. Э. Матц, И. А. Соколов // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 15-й всероссийской науч.-техн. конференции, Новосибирск, 23–25 апр. 2014 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – С. 423–425.

15. Малютина, Ю. Н. Композиционный материал *Ti-Ta-Cu*-ЭИ698-ВД, сформированный сваркой взрывом [Текст] / Ю. Н. Малютина, К. А. Скороход // Сборник научных трудов XV международной науч.-техн. Уральской школы-семинара металловедов – молодых ученых, Екатеринбург, 8–12 декаб. 2014 г. – Екатеринбург : УрФУ, 2014. – С. 75–77.

16. Барьерные материалы для сварки взрывом титановых и никелевых сплавов [Текст] / Ю. Н. Малютина, В. И. Мали, К. А. Скороход, В. С. Ложкин, М. А. Есиков // Инновации в материаловедении : сборник материалов 2-ой всероссийской молодежной научно-технической конференции с международным участием, Москва, 1–4 июня 2015 г. – Москва : Изд-во ООО "Ваш полиграфический партнер", 2015. – С. 28–29.

17. Использование ниобия в многослойной композитной вставке при лазерной сварке титана с нержавеющей сталью [Текст] / В. О. Дроздов, А. Г. Маликов, М. А. Есиков, Ю. Н. Малютина, К. А. Скороход // Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине : сборник трудов VI всероссийской конференции, Новосибирск, 24–27 марта 2015 г. – Новосибирск : Изд-во Параллель, 2015. Том II. – С. 25–27.

18. *Amorphous, quasicrystalline and other metastable structures produced at the interface of explosively welded dissimilar materials [Text] / I. A. Bataev, Yu. N. Malutina, D. V. Lazurenko, K. Hokamoto, M. A. Esikov, V. I. Mali, A. M. Jorge Junior, A. A. Bataev // 22<sup>nd</sup> International Symposium of Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials (ISMANAM 2015), France, Paris, 13–17 July 2015. – France. – P. 25. [Аморфные, квазикристаллические и другие метастабильные структуры, сформированные на границе разнородных материалов, сваренных взрывом].*

19. *Effect of heat-treatment on the interface microstructure of explosively welded stainless steel – bronze composite [Text] / Yu. N. Malutina, V. I. Mali, K. A. Skorokhod, A. A. Bataev // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 495–500. [Влияние термической обработки на микроструктуру границы раздела композита нержавеющая сталь – бронза, сваренных взрывом].*

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 1,25 п.л. Тираж 100 экз.  
заказ № 1443. Подписано в печать 20.10.2015 г.