

На правах рукописи

ПУШКИН Марк Сергеевич

ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ
ПРИ ПОЛУЧЕНИИ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ
МЕТОДОМ ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2018

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН)

Научный руководитель: Гринберг Бэлла Александровна, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории физики высоких давлений Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

Официальные оппоненты: Глезер Александр Маркович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, профессор, НИТУ МИСиС, г. Москва

Конева Нина Александровна, доктор физико-математических наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск

Ведущая организация: Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь

Защита состоится «14» декабря 2018 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.003.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН) по адресу: 620108, г.Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ УрО РАН и на сайте института www.imp.uran.ru.

Автореферат разослан «__»

2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Чарикова Татьяна Борисовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Создание новых материалов, способных функционировать в различных экстремальных условиях, требует опережающего исследования физических процессов, происходящих в твёрдых телах. Для получения новых свойств композиционных материалов, отличных от свойств составляющих их компонентов, существенную роль играет понимание физической природы процессов, протекающих при формировании данных композитов. Значительный интерес представляет также класс открытых систем, подверженных сильному внешнему воздействию и находящихся достаточно далеко от равновесия. При этом за счёт подводимой высокой энергии рассматриваемая система становится специфически внутренне структурированной, а её свойства и поведение можно качественно, а в некоторых случаях и количественно, объяснить с помощью теории самоорганизации.

Эффективным способом соединения материалов и создания на этой основе высокопрочных биметаллических и многослойных композитов является сварка взрывом, которая в некоторых случаях обеспечивает сцепление материалов, невозможное другим способом. С помощью данной технологии можно реализовывать соединения как разнородных, так и однородных металлов, получать высококачественные биметаллические и многослойные композиты, обладающие высокой прочностью, жаростойкостью, коррозионной устойчивостью и многими другими весьма важными для практических применений свойствами. Сварка взрывом в настоящее время уже достаточно широко используется в различных отраслях техники (авиационной, атомной, судостроительной, химической и т.д.) и в то же время обладает значительным потенциалом для своего дальнейшего развития и усовершенствования. Наиболее отличительной особенностью сварки взрывом как метода соединения различных материалов является то, что она представляет собой высокоинтенсивное быстротечное воздействие со следующими характерными временами: длительность взрыва примерно 10^{-6} с, скорость деформации 10^4 - 10^7 с⁻¹, скорость охлаждения 10^5 К/с. Именно с этим и связана необычная микроструктура соединений, возникающая при таком сильном внешнем воздействии.

К настоящему времени имеется большое количество теоретических и экспериментальных исследований, посвящённых анализу процессов, происходящих при сварке взрывом и выяснению механизмов, контролирующих свариваемость материалов между собой. При этом большинство подходов обычно используют гидродинамические модели и представления о необходимости идеально гладких и чистых контактирующих поверхностей для обеспечения их надёжного сцепления. Однако, проведённый в ряде предшествующих работ анализ показывает, что такие представления не позволяют описать имеющуюся совокупность экспериментальных данных для широкого класса материалов. При этом большинство методов анализа, описываемых в литературе,

базируется на оптической микроскопии поперечных сечений поверхности раздела, что может быть недостаточно для выявления на этой основе закономерностей формирования получаемых соединений и оптимизации их параметров. Таким образом, можно сказать, что как для сварки взрывом, так и для других методов сильного внешнего воздействия на материалы отсутствуют модели, которые позволяли бы достаточно последовательно и в соответствии с широким кругом данных описать явления, протекающие при таких воздействиях и эволюцию структуры материалов в контактной области. В частности, для сварки взрывом остаются в значительной мере нерешёнными такие вопросы как механизмы свариваемости материалов, причины возникновения и особенности поведения рельефа поверхности, особенности зон расплава и др. Для описания происходящих при этом процессов требуется проведение широкого и детального комплекса структурных исследований.

В настоящей работе для создания подобного подхода подробно исследованы полученные сваркой взрывом соединения следующих пар металлов: медь-тантал, медь-титан и медь-медь. Предлагаются и исследуются несколько механизмов, реализующихся при сварке взрывом. Во-первых – фрагментация типа дробления, проявляющаяся в виде образования и разлёта частиц, которые вызывают локальный разогрев, что делает расплавление на поверхности раздела практически неизбежным. Во-вторых – это сами зоны локального расплавления, которые могут обеспечивать сцепление материалов, однако также могут являться зонами риска. В-третьих – формирование выступов на поверхности раздела, а также выступов на выступах, что в значительной степени способствует результирующему сцеплению материалов при сварке взрывом.

Поскольку процессы, происходящие при сварке взрывом, в определённой мере можно рассматривать как класс открытых систем с большой подводимой энергией, находящихся далеко от равновесия, представляет интерес объяснить многие особенности возникающей при этом внутренней структуры с помощью теории самоорганизации, используя фрактальный анализ. На этой основе в работе предлагается новый подход, объясняющий эволюцию структуры контактной поверхности металлов при интенсификации режима сварки.

Цель работы

Получение и анализ фундаментальных закономерностей, определяющих поведение металлических систем и их структуру при сильном внешнем воздействии на примере сварки взрывом, включая выявление основных механизмов, контролирующих сцепление материалов.

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

1. Выявить закономерности эволюции поверхности раздела при интенсификации режима сварки для соединений медь-тантал, медь-титан, медь-медь.
2. Выяснить причины возникновения и способы формирования зон локального расплавления, а также их влияние на свойства свариваемого образца в целом.

3. Установить закономерности формирования определённых границ раздела. Выявить механизмы сцепления материалов при сварке взрывом.
4. Используя самоподобие элементов исследуемых систем, провести фрактальный анализ сечений поверхности раздела. Для различных соединений вычислить фрактальную размерность этих сечений.
5. Найти зоны риска для соединений медь-тантал и медь-титан, используя полученный в работе подход.

Научная новизна

1. Предложен подход, использующий теорию самоорганизации, который может объяснить причины формирования того или иного рельефа поверхности раздела, полученного при сварке взрывом. Данный подход даёт возможность объяснить выбор системой определённых диссипативных каналов. Установлена эволюция микроструктуры сварного соединения при интенсификации режима сварки: на первом этапе возникают отдельные выступы на поверхности, затем идёт объединение выступов в так называемые «всплески». Дальнейшее увеличение подводимой энергии ведёт к формированию квазиволновой границы. Последний этап: образование волнообразной границы в центре окна свариваемости.
2. Предложено и проанализировано несколько новых механизмов сцепления материалов. Показано, что появление при формировании контактной поверхности “излишней” площади идёт как за счёт роста амплитуды волны (переход от всплесков к волнам), так и за счёт увеличения изрезанности поверхности всплесков и волн. В случае интенсификации режима сварки наблюдалось уменьшение шероховатости, что можно объяснить выбором системой таких диссипативных каналов, которые быстрее всего «тратят» подводимую внешнюю энергию. Ещё одним механизмом свариваемости являются зоны локального расплавления, расположенные на вершинах волн.
3. Сформулирован фрактальный подход для численного описания шероховатости поверхности раздела. В случае минимальной подводимой энергии, при которой образец сварился, наблюдается максимальная фрактальная размерность, уменьшающаяся при интенсификации режима сварки.

Практическая значимость

Полученные в данной работе экспериментальные данные, демонстрирующие механизмы, протекающие при сварке взрывом, расширяют знания и дополняют представления о процессах, происходящих в открытых системах, подвергнутых сильному внешнему воздействию. Сведения, полученные в ходе исследования, позволяют расширить современные представления о закономерностях поведения металлов при сварке взрывом, и также могут быть использованы для оптимизации свойств данных соединений.

В данной работе были найдены зоны, которые могут негативно повлиять на сцепление материалов (зоны риска): для соединения Cu-Ta – это специфическая

квазиволновая граница, формирующаяся в узкой полосе окна свариваемости; для соединения Cu-Ti – это области, в которых наблюдаются интерметаллиды, образующиеся благодаря взаимной растворимости исходных материалов внутри зоны расплава при сильных режимах сварки.

Областью применения приведённых выше сварных пар может служить корпус химического реактора. Стенка реактора состоит из композита сталь – медь – тантал. Поскольку тантал обладает высокой коррозионной стойкостью, он служит обшивкой внутренней части корпуса.

Сварку взрывом также можно использовать для создания пары медь-титан, которая применяется при изготовлении оборудования в электролитическом процессе получения ряда цветных металлов. При этом оптимальным материалом для изготовления барабан-катода электролизёра медной тонкомерной фольги является титан.

Выносимые на защиту научные положения

1. Совокупность полученных в работе экспериментальных данных о микроструктуре переходной зоны соединений медь-тантал, медь-титан, медь-медь, полученных сваркой взрывом. Особенности поведения формы границы раздела в зависимости от параметров сварки.
2. Закономерная эволюция развития поверхности (отдельные выступы; всплески; квазиволновая граница; волнообразная граница), которую можно объяснить, используя теорию самоорганизации.
3. Механизмы сцепления материалов при сварке взрывом: «склеивание» волнообразной поверхности, когда хаотически разбросанные зоны расплава способствуют соединению металлов; генерация свариваемой поверхностью излишней площади контакта; образование выступов и всплесков, состоящих из наиболее тугоплавкого и твердого элемента.
4. Изрезанность поверхности раздела при сварке взрывом, описанная с помощью фрактального подхода.

Личный вклад автора

В течение четырех лет аспирантуры автор работал под руководством профессора А.П. Танкеева. Вместе с ним были сформулированы цели и задачи диссертации, разработаны основные направления научной работы. Из-за безвременной кончины А.П. Танкеева автор заканчивал работу над диссертацией под руководством профессора Б.А. Гринберг. Более десяти работ, включая коллективную монографию, были выполнены автором совместно с коллективом исследователей, руководимым Б.А. Гринберг. Автор участвовал в подготовке образцов (совместно с к.т.н. А.В. Иноземцевым) для металлографических, электронно-микроскопических (совместно с Н.В. Николаевой) и рентгенографических (совместно с к.ф.-м.н. А.М. Пацеловым) исследований. Автор лично выполнял структурные исследования, и проводил обработку экспериментальных данных. Автор самостоятельно разработал программное обеспечение, позволяющее рассчитывать фрактальную размерность поверхности. Автор

принимал непосредственное участие в планировании экспериментов, обсуждении результатов и написании статей. Автор принимал участие в работе над коллективной монографией “Сварка взрывом: процессы и структуры” (Москва, Инновационное машиностроение, 2017).

Достоверность результатов

Достоверность полученных данных обусловлена достаточным объёмом используемых для сравнения экспериментальных данных, а также проведением измерений на сертифицированном оборудовании лаборатории физики высоких давлений, отдела электронной микроскопии Центра коллективного пользования Института физики металлов Уральского отделения Российской Академии наук (ЦКП ИФМ УрО РАН), а также Волгоградского государственного технического университета. В работе использовались современные методы исследования структуры, полученные результаты согласуются с данными других исследований. Основные выводы диссертационной работы изложены в статьях, опубликованных в реферируемых научных журналах из списка ВАК.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует пункту 3. «Изучение экстремального состояния конденсированных веществ (сильное сжатие, ударные воздействия, изменение гравитационных полей, низкие температуры), фазовых переходов в них и их фазовые диаграммы состояния» и пункту 1. «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твёрдом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления» Паспорта специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Структура и объем диссертации

Полный объем работы составляет 120 страниц, включая 4 таблиц и 63 рисунка. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы из 106 наименований.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы были доложены на 9 всероссийских и международных конференциях: XIV Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов-молодых учёных (Екатеринбург, 2014), Международная школа-конференция студентов, аспирантов, молодых учёных «Фундаментальная математика и её приложения в естествознании» (УФА, 2014), XII Международная конференция «Забабахинские научные чтения» (Снежинск, 2014), XIII Международная конференция Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов (Екатеринбург, 2014), VI Международная конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов» (Москва, 2015), VI Международный междисциплинарный симпозиум «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (Нальчик-Южный, 2016), IX Международная

конференция «Фазовые превращения и прочность кристаллов» памяти академика Г.В. Курдюмова (Черноголовка, 2016), LVIII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (Пермь, 2017), XVIII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (Екатеринбург, 2017).

Публикации по результатам работы

Результаты, представленные в диссертации, изложены в 9 статьях в рецензируемых журналах, включённых в перечень ВАК и индексируемых в Web of Science, а также в 1 монографии.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, основные задачи и положения, выносимые на защиту, указана научная новизна и практическая значимость, приведены сведения об апробации результатов, личном вкладе, структуре и объёме диссертации.

В **Первой главе** представлен литературный обзор проблемы. Приводятся особенности процессов и структур, связанные со сваркой взрывом. Описано, как физические свойства получаемых образцов зависят от технологических схем сварки и различных параметров. Показаны различные условия, необходимые для реализации сварного соединения. Рассмотрены известные гипотезы свариваемости металлов при взрыве.

В главе отмечены и проанализированы известные особенности, связанные с тепловыми процессами, реализующимися в сварном шве, т.е. на границе соединяемых материалов. Известно, что процесс соединения металлов при сварке взрывом сопровождается локальным повышением температуры в зоне соединения. В момент сварки значительная часть тепловыделения происходит именно в переходной зоне. Температура может достигать точки плавления некоторых соединяемых металлов, при этом возникает оплавление, которое может покрывать при особо интенсивных режимах весь рельеф поверхности раздела. Зоны локального расплавления, проявляющиеся при определённых режимах, могут быть заполнены различными формами коллоидных растворов. В данной главе описано, при каких условиях возникают те или иные формы коллоидных растворов.

В первой главе отмечено также, что для изучения происходящих процессов внутри сварного шва удобно использовать принципы теории самоорганизации. Важной отличительной особенностью этой теории является специфическое структурирование объекта изучения. Подобное структурирование наблюдается во множестве систем, связанных с самоорганизацией. В главе рассмотрены некоторые примеры системы, связанные с данной теорией (так называемые «ячейки Бенара» и структуры в литии после импульсного нагрева лазером), отдельно отмечены некоторые их особенности – это открытые системы, связанные с внешним достаточно мощным источником энергии. Образование специфических структур происходит лишь при условии достижения

внешними параметрами некоторых критических значений. Имеет место коллективное (кооперативное) поведение образующихся подсистем. В процессах самоорганизации важнейшую роль играют нелинейные и диссипативные процессы. Однако когда нелинейные эффекты играют важную роль (например, для описания рельефа поверхности, получаемой при сварке взрывом), возникает необходимость введения новых численных и аналитических методов анализа таких процессов. Поэтому в данной главе рассмотрена теория фракталов и способы её применения в материаловедении.

Анализ известной научно-технической литературы показал, что процесс и причины формирования того или иного рельефа поверхности раздела, полученного сваркой взрывом, изучены недостаточно. Также остаются в значительной мере нерешёнными такие вопросы как механизмы свариваемости материалов и особенности зон расплава. Это позволило сформировать основную цель и задачи исследования.

Во **Второй главе** представлены методики исследования и способы приготовления образцов, полученных сваркой взрывом.

Исследуемые системы представляют собой композиты на основе меди: Cu-Ta, Cu-Ti и Cu-Cu. Все композиты были получены сваркой взрывом, методом параллельно расположенных пластин (рисунок 1). Неподвижная пластина располагалась на металлической подложке. Сварку выполняли при разных внешних параметрах, в качестве которых выбраны угол соударения γ и скорость точки контакта V_k .

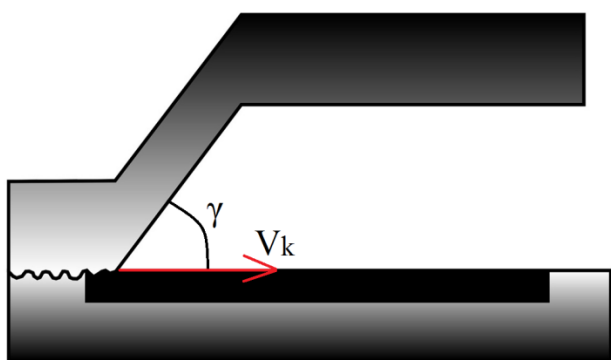


Рисунок 1 – а) Принципиальная параллельная схема сварки взрывом после инициации взрывчатого вещества; б) параметры сварных образцов (угол соударения γ и скорости точки контакта V_k)

При выполнении исследований в работе использовались несколько методик, с помощью которых была получена информация о рельефе поверхности:

- 1) Исследовалось продольное сечение образца.
- 2) Исследовалось поперечное сечение образца.
- 3) Для соединений Cu-Ta, Cu-Ti в реактиве (1 часть HNO_3 + 1 часть H_2O) полностью удалялась (вытравливалась) медь, таким образом, проявлялся рельеф поверхности тантала и титана.

В качестве исходных материалов для получения биметаллического соединения были выбраны тантал (ТВЧ), медь марки М1 и технически чистый титан марки ВТ1-0. Использовался мельхиор марки МН19, имеющий химический состав: Ni - 18-20%, Cu - 78-80%, и с концентрацией примеси – 1.5%.

Толщина пластины тантала (соединение Cu-Ta, плоская граница) составляла 1 мм, толщина пластины меди – 4 мм, зазор между пластинами – 1 мм. Толщина пластины тантала для соединения Cu-Ta (волнообразная граница) составляла 0,1 мм.

В случае соединения Cu-Ti длина пластин составляла 10 см, ширина 5 см. Толщина пластины тантала составляла 1 мм, толщина пластины меди – 3 мм.

В случае соединения медь-мельхиор длина пластин составляла 10 см, ширина 10 см. Толщина пластины мельхиора составляла 2,5 мм, толщина пластины меди – 4,5 мм. Далее, будет использоваться обозначение Cu-Cu, так как сварная пара медь-мельхиор близка по своим свойствам к однородной медной паре.

Используемое взрывчатое вещество – это смесь аммиачной селитры мелкого помола (в качестве окислителя) с древесной мукой или керосином (в качестве горючего) и кварцевым песком (инертная добавка для снижения скорости детонации).

Экспериментальные исследования микроструктуры проводились с помощью следующих методов: рентгеновской дифрактометрии (ДРОН 3), сканирующей (СЭМ) электронной микроскопии QUANTA 200 FEI Company. При исследовании эволюции микроструктуры в процессе нагрева использовалась приставка к сканирующему микроскопу. Для исследования шероховатости поверхности исходных материалов использовался оптический профилометр Zygo NewView 7300.

В **Третьей главе** представлены результаты изучения сварного соединения Cu-Ta. Особое внимание уделено эволюции поверхности раздела при интенсификации режима сварки.

Известны две достаточно простые формы поверхности раздела сварного соединения: плоская и волнообразная (рисунок 2, а и рисунок 2, б соответственно). Исследования переходных состояний между этими формами поверхности раздела ранее не проводилось. Для изучения таких состояний был рассмотрен набор соединений, получаемых при промежуточных режимах сварки. При этом была выявлена последовательность изменяющихся структурных состояний поверхности раздела, сменяющих друг друга при интенсификации режима сварки.

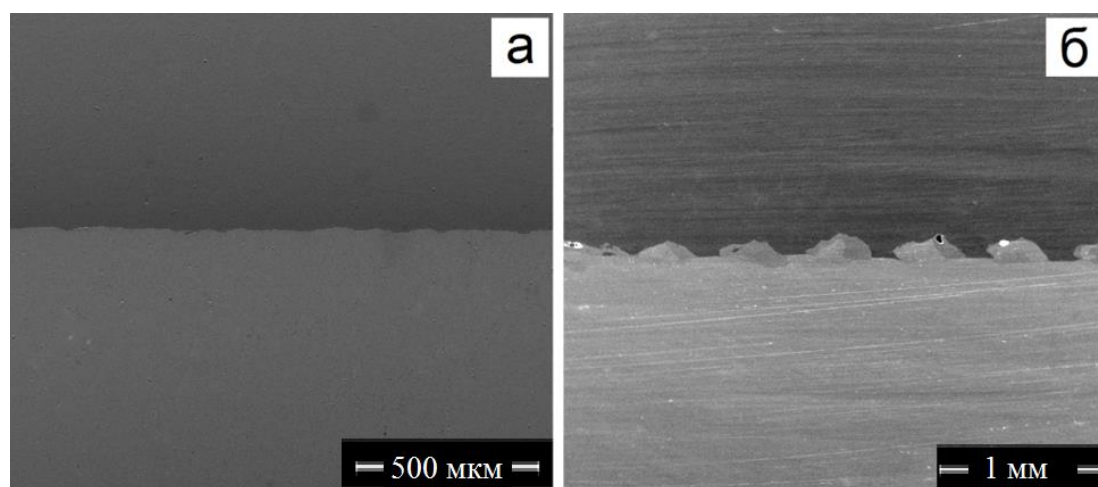


Рисунок 2 – СЭМ изображение поперечного сечения соединения Cu-Ta: а) плоская граница; б) волнообразная граница (медь – более тёмная, тантал – более светлый)

При интенсификации режима сварки происходит переход к плоской границе раздела (металлы уже сварились). На рисунке 3 б представлена плоская граница соединения Cu-Ta ($\gamma=5,2^\circ$, $V_k=2571$ м/с), где медь вытравлена. В данном случае наблюдалась поверхность, похожая на всплески волн. Это отражает ситуацию, когда отдельных выступов стало достаточно много, чтобы они смогли объединиться в одну структуру. Подобное поведение материала при сварке было названо «всплесками». Изучение того же самого соединения используя продольное сечение показало, что всплески обладают сложной геометрической формой с множеством отдельных выступов на поверхности.

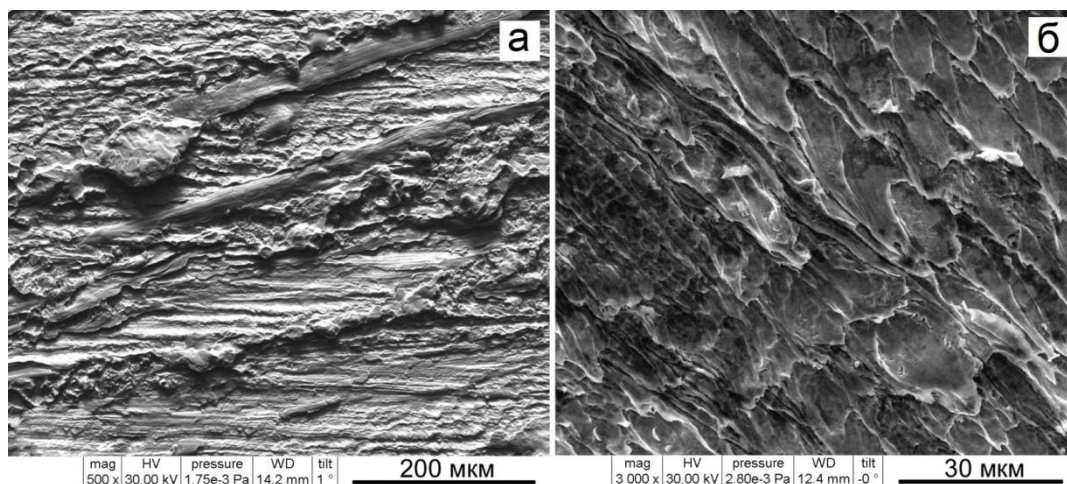


Рисунок 3 – СЭМ изображение поверхности тантала: а) нет сцепления исходных материалов; б) плоская граница соединения (медь вытравлена)

Анализ получаемых образцов при дальнейшей интенсификации режима сварки ($\gamma=8,6^\circ$, $V_k=2000$ м/с) показал неоднородность рельефа поверхности раздела (рисунок 4, а). Здесь выделены три зоны, кардинально отличающиеся друг от друга. Областям «1» и «2» соответствуют волнообразные поверхности, отличающиеся амплитудой волны, её периодом и направлением распространения. Амплитуда волны в области 1 примерно в два раза больше, чем в области «2». В области «3» вместо ожидаемых волн были обнаружены всплески. Таким образом, на одной и той же сварной поверхности были одновременно обнаружены как всплески, так и волны. Такая поверхность была названа квазиволновой, а именно состоящей из отдельных волнообразных областей, каждая из которых характеризуется собственным периодом и амплитудой волны, а также областью, для которой характерны всплески. Так формируется переход от всплесков к волнам.

Следующий и самый высокоинтенсивный режим сварки ($\gamma=11,8^\circ$, $V_k=2140$ м/с), обладает волнообразной границей раздела. На рисунке 4, б проведён рельеф поверхности тантала для данного соединения. Структура волнообразная, период и амплитуды отдельных гребней варьируются несущественно по поверхности и составляют 310 ± 15 мкм и 62 ± 4 мкм соответственно. Отдельных всплесков не наблюдается. Однако, видны

смыкания полос, перемишки, наложение одной волны на другую, как и для описанных ранее режимов. Изучение того же самого соединения (волнообразного) с использованием продольного сечения выявило небольшие выступы на каждой волне.

Таким образом, было показано, что при сварке взрывом возникает избыточная площадь соприкосновения. Используя данные профилометра, была построена оценочный выступ для плоской границы (такие же вычисления можно провести и для волнообразной границы), которая показала прирост площади порядка 15%. При этих расчётах выступ считается достаточно гладким, однако фактически он весь покрыт небольшими неровностями, которые в значительной мере увеличивает площадь соприкосновения. Эта площадь обеспечивает сцепление двух поверхностей. Одновременно с этим возможна ещё одна причина сцепления двух материалов. При вытравливании меди внутри выступов тантала наблюдались внутренние полости и другие неоднородности. До вытравливания эти полости были заполнены медью или застывшей медью с частицами тантала. Таким образом, свариваемость пары металлов объясняется топологическими особенностями рельефа поверхности.

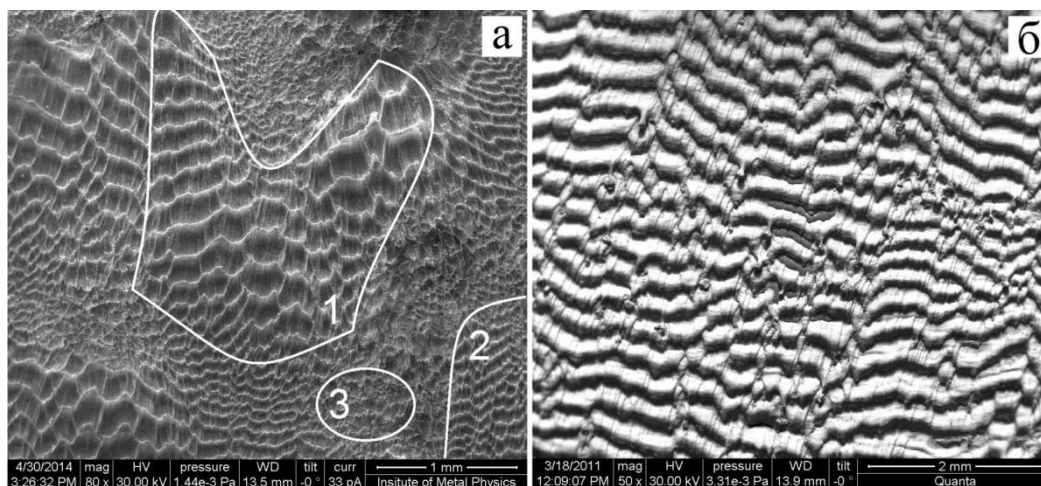


Рисунок 4 – СЭМ изображение поверхности тантала (медь вытравлена): а) квазиволновая граница; б) волнообразная граница

Кроме исследования микро-неоднородностей поверхности раздела для соединения Cu-Ta на примере выступов, значительное внимание было уделено также анализу других особенностей тонкой структуры сварного шва таких соединений, а именно зон локального расплавления и сильно дисперсной наноразмерной микроструктуры, возникающей в результате фрагментации типа дробления (ФТД). Последняя является аналогом фрагментации при обычном взрыве, однако для неё характерно отсутствие потери сплошности материала. Возникающие при этом микрочастицы не разлетаются далеко друг от друга из-за наличия преграды (другого материала или же исходного материала), а врезаются в неё и могут даже расплавлять эту преграду, формируя таким образом зоны расплава. На рисунке 5, а представлено продольное сечения волнообразной границы раздела, где хорошо виден отдельный выступ, соединяющий два гребня волн. На рисунке 5, б показан этот выступ при большем увеличении. На рисунке

заметны частицы, отрывающиеся с поверхности тантала. Некоторые из них остаются вблизи поверхности, тогда как другие могут пройти большее расстояние и попасть в зону расплава меди. На рисунке 5, а – это серая зона, внутри которой находятся небольшие частицы. Очевидно, что при ФТД происходит разлёт частиц той из твёрдых контактирующих фаз, которая не испытывает расплавления. В случае соединения медь-тантал, где температуры плавления металлов: $T_m^{(Ta)} = 3300$ К, $T_m^{(Cu)} = 1300$ К, такими твёрдыми являются частицы тантала. При этом температура вблизи границы раздела в процессе сварки может достигать 2000 К. В этом случае в зоне расплава образуется дисперсионно упрочнённая суспензия, что и обеспечивает прочность соединения. Разлёт частиц происходит на вершине выступа, что привязывает зону расплава к выступам тантала.

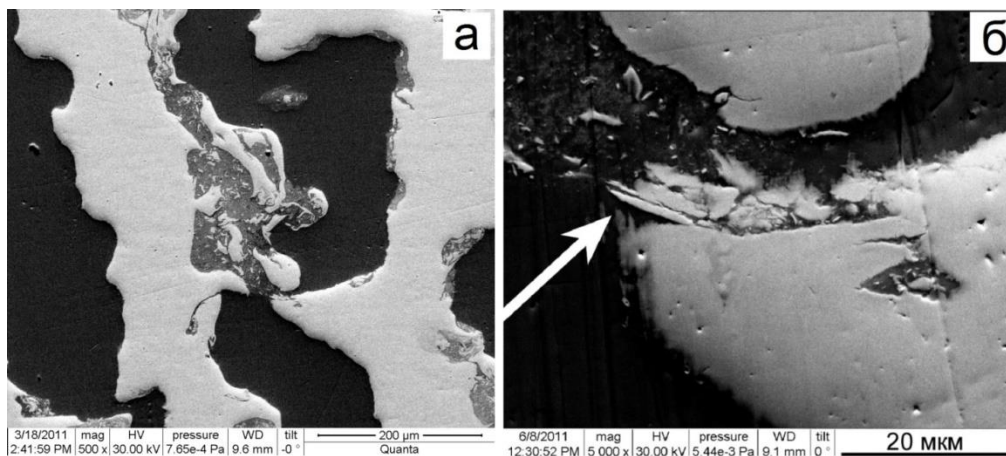


Рисунок 5 – Разлёт частиц тантала и их проникновение в медь для волнообразной границы (СЭМ; поперечное сечение; медь – более тёмная, тантал – более светлый)

Выявлено, что для соединений, образованных при сварке взрывом, зона расплава контактирует как с однородным исходным материалом, так и с областями неоднородности, обусловленными перемешиванием материалов. Именно наличие таких контактов и обеспечивает точечное «склеивание» двух материалов. С увеличением количества зон локального расплавления, усиливается сцепление материалов. Однако, для обеспечения качественного сцепления, зона расплава не должна покрывать всю границу раздела.

Проведенные исследования показали, что на всплесках и волнах, формирующих сварной шов, в свою очередь обнаруживаются достаточно многочисленные выступы. Каждый такой выступ создаёт дополнительную площадь соприкосновения соединяемых металлов. Именно поэтому, на поверхности рассматриваемых образцов наблюдался сложный и весьма изрезанный рельеф. Для того, чтобы иметь возможность оценить изрезанность поверхности сварного шва, был использован фрактальный подход, который здесь применяется впервые для описания сварки взрывом.

Чтобы рассчитать фрактальную размерность продольного сечения соединения Cu-Ta, использовался метод «Береговой линии» и было написано соответствующее

программное обеспечение. Для корректной обработки продольных срезов с помощью предложенной программы изначальное изображение (рисунок 6, а) было преобразовано в двухцветное (рисунок 6, б). Медь и зоны локального расплавления были объединены в чёрные полосы, так как зона расплава фактически является застывшей медью.

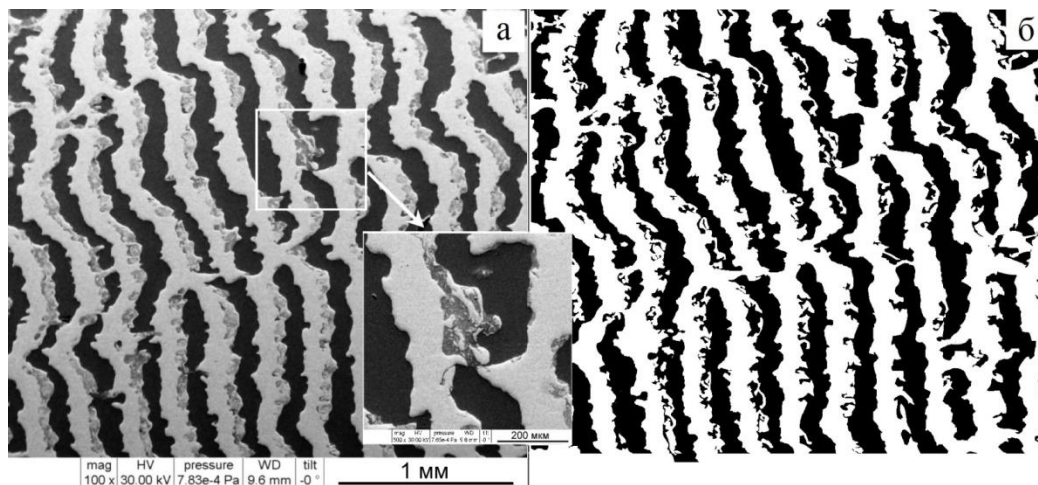


Рисунок 6 – Cu-Ta, волнообразная граница, продольное сечение: а – СЭМ изображение; б – преобразованное двухцветное изображение (медь – тёмная, тантал – светлый)

Для расчёта фрактальной размерности исходная береговая линия покрывалась квадратами со стороной δ , так чтобы в каждом из них был и чёрный и белый пиксель. Вводилась также функция $N(\delta)$ – количество данных квадратов. Использовалась следующая известная зависимость: $\log(N(\delta)) \sim -D \cdot \log(\delta)$. Программа проводит итерационную процедуру так, что с каждым следующим шагом уменьшается величина δ и каждому δ отвечает свое значение $N(\delta)$. На рисунке 7 представлен график зависимости логарифмов $\log(N(\delta))$ от $\log(\delta)$. Каждая точка на графике – одна итерация с определённой δ . После аппроксимации данных точек прямой её тангенс угла наклона равен отрицательной фрактальной размерности D .

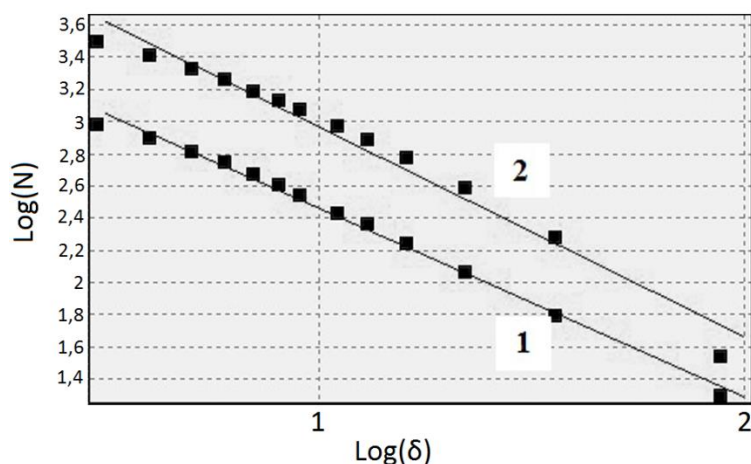


Рисунок 7 – Логарифмическая зависимость длины береговой линии от ширины ячейки

Нижняя прямая на рисунке 7, с индексом «1», соответствует случаю расчёта изрезанности одной волны. Соответствующая фрактальная размерность при этом

оказывается равной: $D_1=1.19 \pm 0.03$. Верхняя прямая, с индексом «2» отвечает нескольким волнам. Она имеет фрактальную размерность $D_2=1.31 \pm 0.02$. Дальнейшее увеличение количества полос не приводит к изменению D , то есть фрактальная размерность выходит на насыщение.

Была рассчитана также фрактальная размерность и в случае плоской границы раздела для соединения, представленного на рисунке 3, б: $D=1.68 \pm 0.07$. Таким образом, показано, что изрезанность рельефа плоской границе раздела выше, чем у волнообразной границы.

В данной главе также продемонстрировано, что одной из возможных зон риска для соединения Cu-Ta является квазиволновая граница. Это связано с её неоднородной структурой, а именно наличием разнонаправленных волновых участков, всплесков, разрывов и др.

В Четвертой главе представлены результаты изучения сварного соединения Cu-Ti. У данной сварной пары, в отличие от соединения Cu-Ta, имеет место довольно высокая взаимная растворимость исходных материалов. Такая взаимная растворимость предопределяет значительную взаимную диффузию компонент и протекание интерметаллических реакций внутри зоны расплава при тех температурах, когда эти зоны формируются.

Для изучения соединения Cu-Ti были выбраны параметры сварки, приведённые в таблице 1. Исходя из полученных данных, все образцы были разделены на три группы по мере увеличения интенсивности режима сварки: плоская граница - (1'), (2'), (5); квазиволновая граница - (1), (2); волнообразная граница - (4'), (4), (3).

Плоская граница (соединения (1'), (2'), (5)). Во всех трех рассмотренных для этого режима ((1'), (2'), (5)) случаях поверхность не является волнообразной и периодический рельеф не наблюдается. На рисунке 8 приведены изображения различных поверхностей титана (медь вытравлена): а - режим (1'), б - режим (2'), в - режим (5). Из рисунков видно, что на поверхности титана были обнаружены всплески, подобные тем, что наблюдались для плоской границы сварного соединения Cu-Ta. Изображения поверхностей титана для всех трёх режимов подобны: видны плотно прижатые друг к другу выступы, которые выстраиваются в ряды, но волны при этом не образуются. На рисунке 8, в красным цветом отмечена область, где высота всплесков резко увеличилась по сравнению с окружением. Можно полагать, что в этом месте всплески начинают объединяться в новую структуру.

Таблица 1 – Режимы сварки взрывом для соединения медь-титан

Режим	Угол соударения γ , град	Скорость точки контакта V_k , м/с	Режим	Угол соударения γ , град	Скорость точки контакта V_k , м/с
(1)	17.5°	1900	(3)	13°	2300
(1')	14.5°	1900	(4)	11°	2500
(2)	18.5°	2100	(4')	9°	2500
(2')	15°	2100	(5)	9.5°	2100

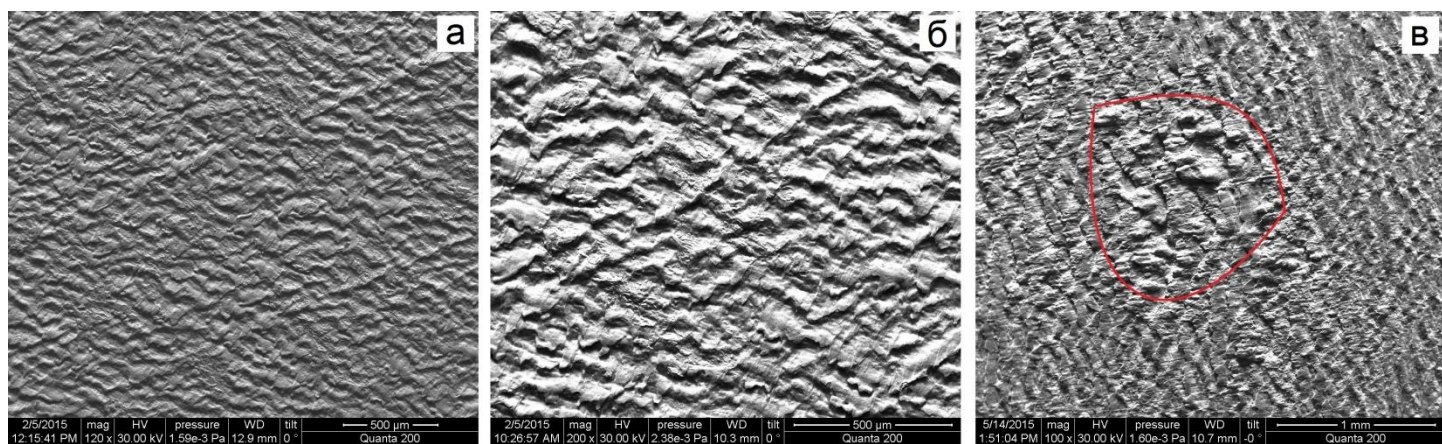


Рисунок 8 – Cu-Ti, плоская граница, медь вытравлена (СЭМ): *а* – режим (1'); *б* – режим (2'), *в* – режим (5)

Квазиволновая граница (соединения (1) и (2)). Для соединения (1) амплитуда неоднородностей составляет 50 ± 6 мкм, а длина волны - 180 ± 10 мкм. Соединения же (2) имеет амплитуду 40 ± 9 мкм и длину волны - 170 ± 20 мкм. На рисунке 9 приведены различные поверхности титана: *а* - режим (1), *б* - режим (2). Медь вытравлена. В данном случае на поверхности наблюдались всплески, однако, в отличие от режимов (1'), (2'), (5), эти всплески выстраиваются в ряды, образуя тем самым начальную форму волны. Места сбоя чередующихся полос, неустойчивость амплитуды, а также сильная изрезанность позволяет говорить в данном случае о квазиволновой форме поверхностей. Тем не менее, их форма достаточно сильно отличается от подобной формы для соединения Cu-Ta, где также наблюдались сильные перепады периода волн.

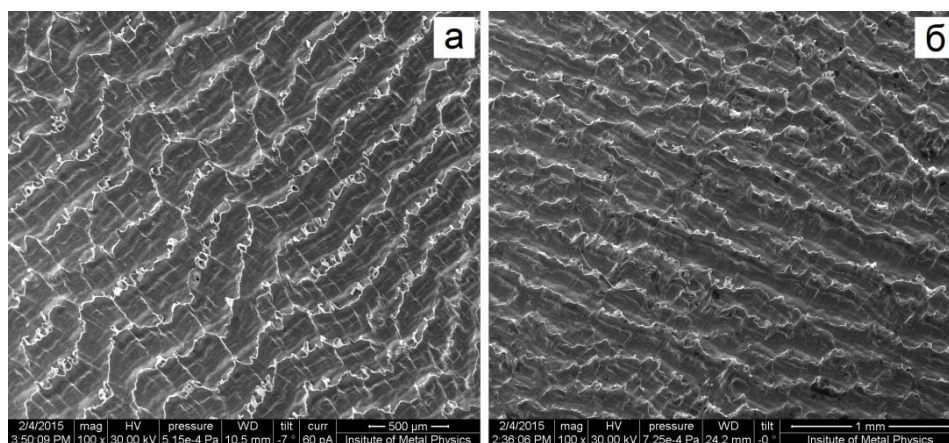


Рисунок 9 – Cu-Ti, квазиволновая граница, медь вытравлена (СЭМ): *а* – режим (1); *б* – режим (2)

Волнообразная граница (соединения (4'), (4), (3)). Для соединения (4') амплитуда составляет 75 ± 8 мкм, период волны 310 ± 15 мкм. Для соединения (4) амплитуда составляет 150 ± 10 мкм, период волны 610 ± 30 мкм. Соединение же (3) имеет амплитуду 150 ± 7 мкм и период волны 450 ± 19 мкм.

Для соединения (4') наблюдались разрывы волнообразной картины (рисунок 10, б), тогда как для соединения (4) была получена более совершенная поверхность

(рисунок 10, *а*). Ещё более качественная волна наблюдается для соединения (3), в ней практически нет разрывов (рисунок 10, *в*). Однако фрагментированный характер волны по-прежнему сохраняется.

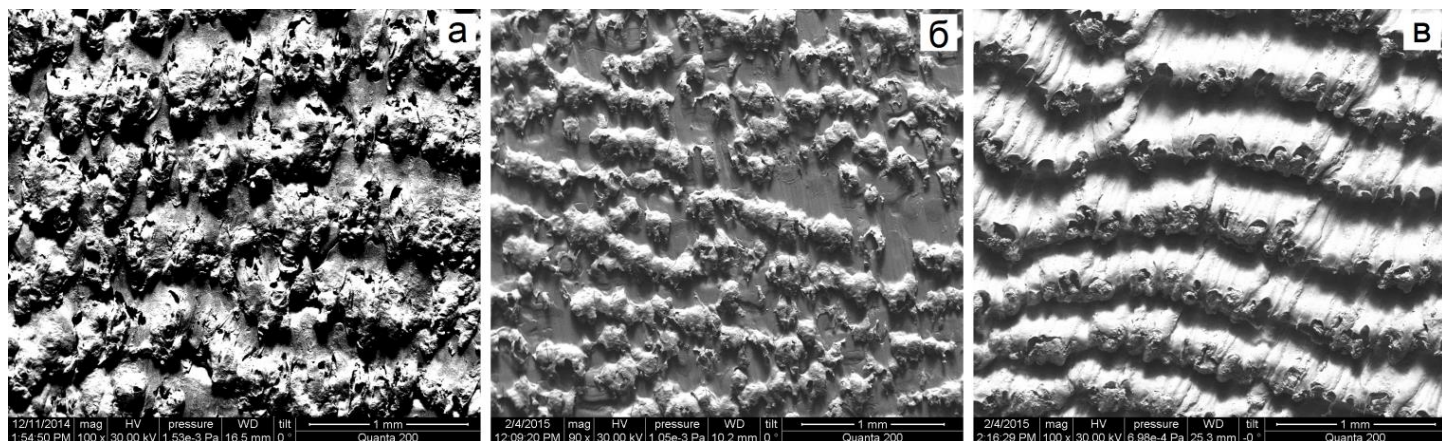


Рисунок 10 – Cu-Ti, волнообразная граница, медь вытравлена (СЭМ): *а* – режим (4); *б* – режим (4'), *в* – режим (3)

Таким образом, закономерное изменение микроструктуры при интенсификации режима сварки, установленное для соединения Cu-Ta, в целом сохраняется и для соединения Cu-Ti.

В главе 4 представлены также результаты изучения структуры зоны локального расплавления. Были обнаружены зоны расплавленной (затем застывшей) меди, которая содержит не испытывавшие расплавления частицы тантала. Зафиксирована вихревая структура зон локального расплавления. Для соединения (4) на рисунке 11, *а* показана зона локального расплавления, внутри которой отчётливо видны неидеальные вихри. Также надо отметить, что внутри зоны расплава нечётко, но всё же прослеживаются отдельные частицы (интерметаллиды). Дифрактограмма, соответствующая соединению (4), приведена на рисунке 11, *б*. Наблюдаемые линии указывают на присутствие в возникающем соединении интерметаллида Cu_3Ti . Такие же частицы наблюдались также и в соединениях (3) и (4'), тоже характеризующихся волнообразной формой границы раздела. В случае же плоской и квазиволновой границы зон локального расплавления подобные частицы практически не наблюдались.

Проведенный анализ показывает также, что зонами риска для соединения Cu-Ti, т.е. возможности появления областей с пониженной прочностью и склонностью к разрушению, как раз является образование интерметаллидов на поверхности раздела двух материалов. Однако действительно опасными данные интерметаллиды являются при интенсификации режима сварки, когда частицы образуют сплошные или почти сплошные объёмы данной фазы, которые сами по себе весьма хрупкие.

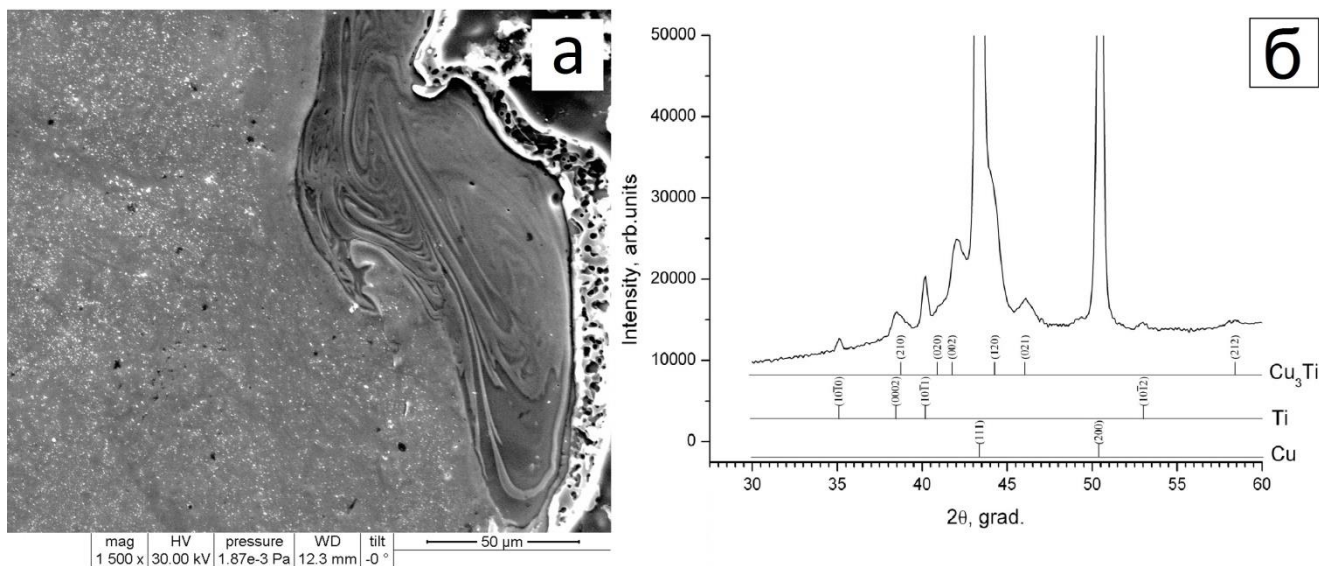


Рисунок 11 – Зона локального расплавления для соединения (4): *a* – поперечное сечение (СЭМ), *б* – дифрактограмма

В случае Cu-Ti, для каждого режима была найдена фрактальная размерность в соответствии с подводимой энергией. Анализ начинается с плоской границы, а затем рассматриваются всё более интенсивные энергетические режимы. В результате были получены следующие значения размерности: $D_{(2')} = 1.38 \pm 0.02$, $D_{(1)} = 1.32 \pm 0.03$, $D_{(2)} = 1.35 \pm 0.02$ (плоская и квазиволновая граница); $D_{(4')} = 1.18 \pm 0.02$, $D_{(4)} = 1.09 \pm 0.01$, $D_{(3)} = 1.14 \pm 0.02$ (волнообразная граница). Было установлено сильное уменьшение значений фрактальной размерности для волнообразных границ в сравнении с квазиволновыми. Таким образом, показано, что правило: «при интенсификации режима сварки фрактальная размерность падает» работает и для соединения Cu-Ti.

Проведенный в главах 2-4 анализ позволяет сделать несколько общих замечаний о характере процессов самоорганизации и эволюции микроструктуры, которые происходят на поверхности соприкосновения материалов при сварке взрывом. В момент инициации действия взрывчатого вещества (ВВ) метаемая пластина падает на неподвижную. В промежуток времени, когда часть метаемой пластины уже соприкасается с неподвижной, направленное действие реакции ВВ продолжается, принуждая пластины находиться в контакте и, в конечном счёте, свариваться. Объем используемого ВВ рассчитывается таким образом, чтобы к концу взрывного процесса большая часть пластин уже сварилась. Таким образом, химическая энергия ВВ сначала переходит в кинетическую и упругую потенциальную энергию пластин, которые фактически и можно считать подводимой энергией. Эта энергия затем «идёт» на изменение, локализованной вблизи контактной поверхности внутренней энергии исходных материалов. Изменения внутренней энергии, локализуемые вблизи контактирующей поверхностей, и приводят к дальнейшему развитию процессов самоорганизации, включая возможность возникновения определенного нового порядка.

Выше были описаны следующие процессы изменения структуры материалов вблизи контактной поверхности и, соответственно, изменения внутренней энергии, которые

успевают произойти за короткое время взрывчатого воздействия (или непосредственно вслед за ним): образование выступов, образование всплесков, формирование изрезанности на поверхности раздела, образование волны, зоны локального расплавления, фрагментация типа дробления, вихри и др. Необходимо подчеркнуть, что каждое соединения, и даже каждый конкретный образец характеризуется, в определенной мере, собственным набором механизмов диссипации энергии, а также количественным распределением энергии при реализации данных механизмов. Например, для соединения Cu-Ti в случае образца (1') не было обнаружено зон расплава, в отличие от образца (4), то есть механизм создания зон расплава реализуется не всегда. Принимая во внимание совокупность различных факторов, был сделан вывод, что система из всех возможных способов самоорганизации поверхности раздела выбирает такой, для которого скорость преобразования подводимой механической энергии во внутреннюю энергию – максимальна.

Схематически, принцип самоорганизации сварного шва представлен на рисунке 12. На начальном этапе взрывного воздействия системе достаточно создавать лишь некоторое количество выступов на поверхности (рисунок 112, а), а затем при увеличении подводимой энергии количество выступов растёт. Высота выступа, чаще всего значительно меньше площади его основания, поэтому начиная с какого-то момента при интенсификации режима сварки системе недостаточно просто увеличивать количество выступов. Они начнут мешать друг другу (рисунок 12, б). Следующий этап – это всплески, то есть поверхность объединённых выступов (проявление коллективного поведения в системе). Мы обнаружили, в частности, следующий механизм перехода выступы-всплески (рисунок 12, в): рядом стоящие выступы смыкаются друг с другом, формируя общий рельеф; увеличивая подводимую энергию данный процесс лишь усиливается (рисунок 12, г) и, начиная с какого-то момента, выступы, как отдельный элемент системы, перестают существовать. При дальнейшей интенсификации режима сварки хаотичность амплитуд всплесков уменьшается, каждый всплеск становится примерно одинакового или близкого размера (рисунок 12, д).

Всплески также начинают объединяться вместе и, в результате, они формируют волнообразную границу, что схематически изображено на рисунке 12, е, причем масштаб при переходе от рисунка 12, д к рисунку 12, е значительно меняется. Таким образом, при дальнейшей интенсификации режима сварки эволюция системы направлена по иному пути: вместо дальнейшего увеличения высоты переходной зоны, и усложнения внутренней структуры, энергия «расходуется» на превращение упорядоченных всплесков в волны. Между этапами формирования плоской и волнообразной границ наблюдается квазиволновая поверхность. Дальнейшее увеличение подводимой энергии компенсирует все «несовершенства» квазиволновых границ, создавая таким образом достаточно регулярную юволнообразную границу. Синхронно с указанными процессами появляются иные пути диссипации энергии: появление вихревых структур, зон расплава, которые растут при интенсификации режима сварки и др. Таким образом, на механизм

создания сложной, изрезанной структуры система начинает «тратить» меньшее количество энергии. Это заметно по уменьшению фрактальной размерности при интенсификации режима сварки.

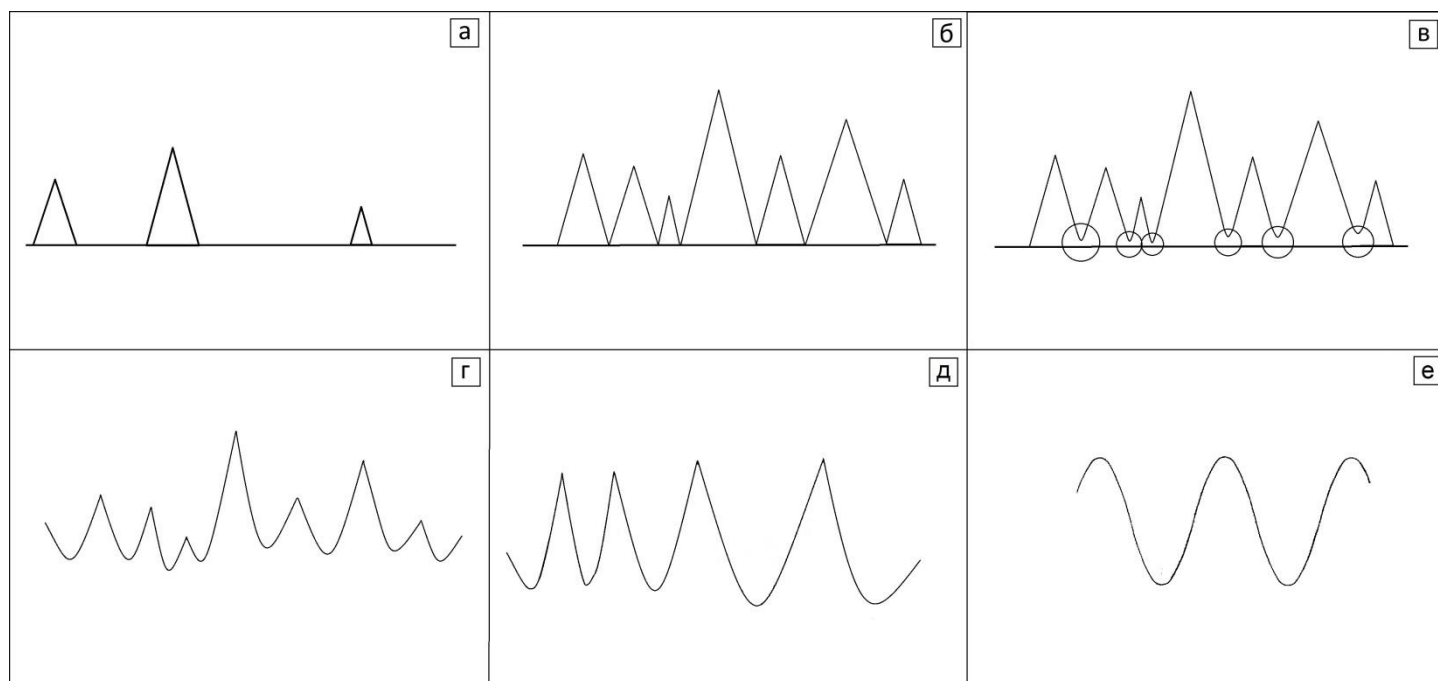


Рисунок 12 – Схематическое изображение эволюции поверхности раздела при переходе от выступов к волнам: *а, б* – формирование выступов; *в, г* – переход от выступов к всплескам; *д, е* – переход от всплесков к волнам

В **Пятой главе** представлены результаты изучения однородного сварного соединения на основе меди. Для такой сварной пары «сходит на нет» ряд механизмов самоорганизации, реализующихся для соединений медь-тантал, медь-титан. К ним относятся процессы, обусловленные как различиями в физических свойствах свариваемых образцов (разница в температуре плавления, плотности и т.д.), так и особенностями, связанными с взаимной растворимостью. Таким образом, физических процессов, реализующихся при сварке взрывом для однородной пары, становится меньше, а оставшиеся механизмы становятся более определёнными.

Пара медь-медь «моделировалась» парой медь – мельхиор для удобства изучения. Подобный выбор обусловлен тем, что медь и мельхиор во многом имеют весьма близкие свойства, включая близкую температуру плавления и плотность. Это позволяет приближённо считать их однородными. В работе использовался мельхиор марки МН19, имеющий химический состав: Ni - 18-20%, Cu - 78-80%, концентрация примеси – 1.5%. Плотность меди составляла $8,93 \text{ г/см}^3$, а плотность мельхиора - $8,9 \text{ г/см}^3$, также медь и мельхиор МН19 имеют близкие температуры плавления ($T_{пл}(\text{Cu}) = 1085^\circ\text{C}$, $T_{пл}(\text{МН19}) = 1190^\circ\text{C}$).

Режимы сварки для соединения медь-мельхиор были условно разделены на две группы. В обозначениях первой группы используются только цифры: **(1)**, **(2)**, **(3)**. Вторая группа обозначается буквами: **(А)**, **(В)**, **(С)**. Внутри первой группы была выбрана строгая

интенсификация режима сварки от самого низкоэнергетического – (3) к самому высокоэнергетическому – (1), При этом варьировался только один параметр: скорость точки контакта (V_k). Для второй же группы характерны изменения обоих внешних параметров процесса сварки: скорости точки контакта V_k и угла соударения γ . Интенсивность режимов растёт от (С) к (А). Параметры для сварных образцов соединения медь-мельхиор приведены в таблице 2.

На рисунке 13 представлены оптические изображения как продольного, так и поперечного сечений границы контакта для режимов (А), (В), (С). На рисунке 14 показан такой же набор изображений, но уже для режимов (1), (2), (3). В приведённых ниже изображениях светлый цвет соответствует исходному нерасплавленному мельхиору, тёмный – меди, а третий промежуточный – застывшему расплаву.

Таблица 1 – Режимы сварки взрывом для соединения медь-титан

Режим	Угол соударения γ , град	Скорость точки контакта V_k , м/с	Режим	Угол соударения γ , град	Скорость точки контакта V_k , м/с
(А)	9,5°	2650	(1)	9°	2080
(В)	7,5°	2650	(2)	6°	2080
(С)	5,5°	2500	(3)	3,3°	2080

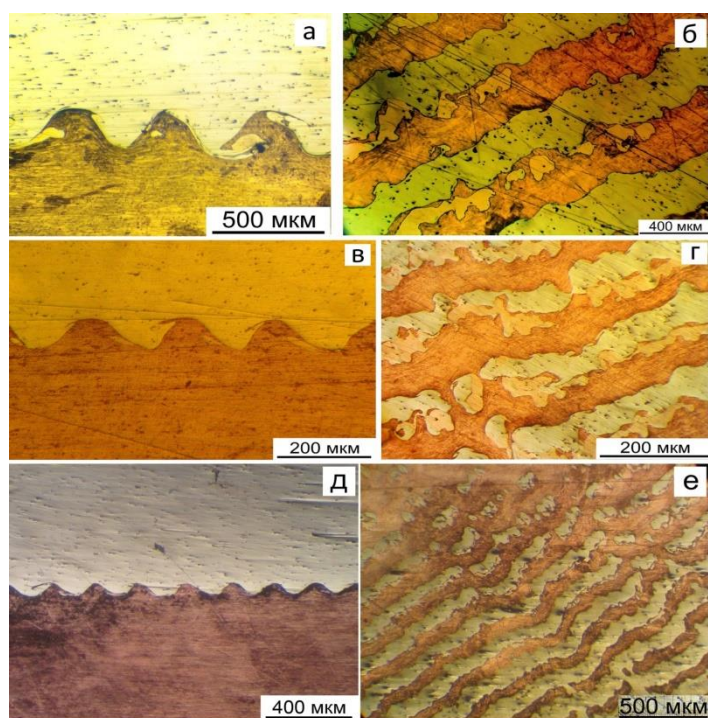


Рисунок 13 – Оптические изображения поверхности раздела. Поперечное сечение: а - (А), в - (В), д - (С); продольное: б - (А), г - (В), е - (С)

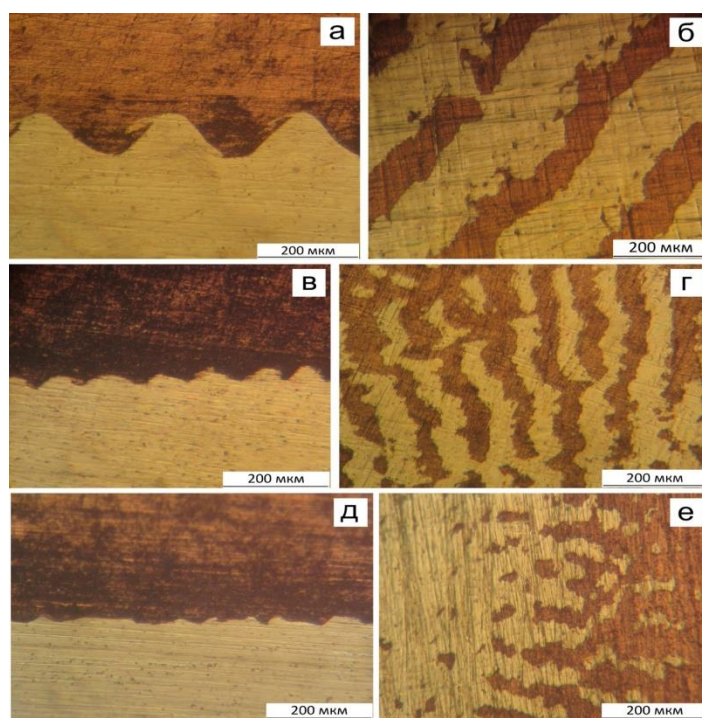


Рисунок 14 – Оптические изображения поверхности раздела. Поперечное сечение: а - (1), в - (2), д - (3); продольное: б - (1), г - (2), е - (3)

Для всех исследуемых режимов сварки наблюдаются выступы на границе раздела (рисунок 13 и рисунок 14). Они отчётливо видны на продольных сечениях, представляющих собой набор чередующихся полос, соответствующих различным материалам. Также наблюдаются многочисленные зоны локального расплавления,

которые отличаются цветом от исходных материалов. Выступы, как и зоны локального расплавления, формируют тонкую структуру контактной границы, которая обеспечивает диссипацию подводимой энергии. Такое поведение было характерно и для соединений Cu-Ta, Cu-Ti. Для соединения медь-мельхиор, как и для других рассмотренных здесь соединений, были обнаружены все три типа границ: волнообразная ((1), (A)), квазиволновая ((2), (B), (C)), и плоская ((3)).

На основе анализа продольных сечений для соединений (1), (2), (3), представленных на рисунке 13, может быть отмечена следующая весьма чёткая закономерность, заключающаяся в том, что при увеличении интенсивности режима сварки уменьшается изрезанность поверхности раздела. Для соединения (3) в случае отдельных островов наблюдается ярко выраженная шероховатость поверхности, тогда как для соединения (1) наблюдаются довольно гладкие полосы (аналогичный вывод можно сделать и для соединений (A), (B), (C)). Подобное поведение хорошо сочетается с выводами второй и третьей глав, где было сформулировано правило: «при интенсификации режима сварки шероховатость (фрактальная размерность) падает». Количественный расчёт этой зависимости демонстрирует следующая фрактальная размерность, рассчитанная для каждой из рассмотренных здесь поверхностей: $D_{(A)}=1.01 \pm 0.01$, $D_{(B)}=1.05 \pm 0.02$, $D_{(C)}=1.16 \pm 0.02$, и $D_{(1)}=1.01 \pm 0.02$, $D_{(2)}=1.20 \pm 0.03$, $D_{(3)}=1.24 \pm 0.02$. Можно отметить, что фрактальные размерности, полученные ранее для соединений медь-тантал и медь-титан, в среднем оказываются выше, чем для соединений медь-мельхиор, т.е. для однородных или почти однородных свариваемых пар границы раздела являются более гладкими. Причина такой закономерности возможно обусловлена тем фактом, что для рассмотренных сильно неоднородных пар (Cu-Ta, Cu-Ti) один из материалов (Ta или Ti) является существенно более твердым и хрупким, что и обуславливает возможность его преимущественной фрагментации с возникновением выступов, отдельных частиц твердой фазы в более пластичной, а также других элементов тонкой структуры контактной поверхности.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Впервые установлено закономерное изменение микроструктуры соединений Cu-Ta, Cu-Ti, Cu-Cu при интенсификации режима сварки: на первом этапе возникают отдельные выступы на поверхности (так называемое «схватывание»), затем идёт консолидация выступов и формирование всплесков. Дальнейшее увеличение подводимой энергии ведёт к формированию квазиволновой границы (уникальной для каждого соединения). Завершающим этапом является волнообразная граница в центре окна свариваемости.
2. Изучена структура зон расплава, образующихся за счёт фрагментации типа дробления. Зона расплава для соединения медь-тантал представляет собой дисперсионно упрочнённую суспензию. Для медь-титан в зонах локального расплавления обнаружены кластеры интерметаллидов. Зоны локального

- расплавления в случае медь-мельхиор представляют собой разбавленный твёрдый раствор никеля в меди.
3. Обнаружены несколько механизмов сцепления материалов при сварке взрывом для различных соединений. Это, во-первых, «склеивание» волнообразной поверхности, когда хаотически разбросанные зоны расплава способствуют соединению металлов (Cu-Ti), а, во-вторых, создание излишней площади контакта с помощью увеличения амплитуды всплесков и волн, а также формирование выступов, расположенных по всей границе раздела, что обеспечивают сцепление двух поверхностей (характерно для всех рассматриваемых пар металлов).
 4. Предложен фрактальный подход для сравнения рельефа контактных поверхностей, полученных при сварке взрывом. Установлена следующая закономерность: в случае, если металлы не сварились, изучаемая поверхность не является фрактальной; для плоской границы наблюдается максимальная фрактальная размерность, а при дальнейшей интенсификации режима сварки фрактальная размерность начинает падать. Для волнообразной границы были получены минимальные значения фрактальной размерности.
 5. Все процессы, протекающие внутри сварного шва, подчиняются принципу самоорганизации открытых систем, который предполагает, что система выбирает такие диссипативные каналы, которые быстрее всего «тратят» подводимую внешнюю энергию. Отдельные выступы при интенсификации режима сварки переходят в тесно контактирующие всплески, которые обладают несколькими диссипативными каналами: изменение высоты всплеска и изменение изрезанности поверхности. Рельеф поверхности при дальнейшей интенсификации режима сварки в случае плоской границы стремится к уменьшению изрезанности поверхности (уменьшение фрактальной размерности), увеличению зон локального расплавления и увеличению высоты всплесков, что, в конечном счёте, приводит к формированию квазиволновой границы, а затем к волнообразной форме поверхности контакта.
 6. Обнаружены различные зоны риска в зависимости от состава сварных пар: квазиволновая граница (Cu-Ta); образование интерметаллидов на поверхности раздела двух материалов, особенно в случае высокоэнергетических режимов (Cu-Ti).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Поверхность раздела при сварке взрывом: фрактальный анализ / Б.А. Гринберг, М.А. Иванов, М.С. Пушкин, А.М. Пацелов, А.Ю. Волкова, А.В. Иноземцев // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – N10. – С. 21-30.
2. Interface relief upon explosion welding: splashes and waves / B.A. Greenberg, M.A. Ivanov, A.V. Inozemtsev, S.V. Kuz'min, V.I. Lysak, A.M. Vlasova, M.S. Pushkin // The Physics of Metals and Metallography. – 2015. – V.116, N4. – P. 367-377.

3. Эволюция поверхности раздела при сварке взваром: переходы от всплесков к волнам / Б.А. Гринберг, М.А. Иванов, А.В. Иноземцев, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак, М.С. Пушкин // Известия РАН. Серия физическая. – 2015. – Т.79, N9. – С. 1265-1268.
4. Microheterogeneous Structure of Local Melted Zones In The Process Of Explosive Welding / B.A. Greenberg, M.A. Ivanov, A.V. Inozemtsev, A.M. Patselov, M.S. Pushkin, A.M. Vlasova. // Metallurgical and Materials Transactions – A. – 2015. – V.46, N8. – P. 3569-3580.
5. Обнаружение квазиволновой формы поверхности раздела при сварке взрывом (медь-тантал, медь-титан) / М.С. Пушкин, А.В. Иноземцев, Б.А. Гринберг, А.М. Пацелов, М.А. Иванов, О.В. Слаутин, Ю.П. Бесшапошников // Известия РАН. Серия физическая. – 2016. – Т.80, N10. – С. 1430-1435.
6. Formation of intermetallic compounds during explosive welding / B.A. Greenberg, M.A. Ivanov, M.S. Pushkin, A.V. Inozemtsev, A.M. Patselov, A.P. Tankeyev, S.V. Kuzmin, V.I. Lysak. // Metallurgical and Materials Transactions – A. – 2016. – V.47, N11. – P. 5461-5473.
7. Процесс волнообразования при сварке взрывом: релаксация неравновесной структуры / Б.А. Гринберг, М.А. Иванов, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак, М.С. Пушкин, А.В. Иноземцев, А.М. Пацелов, А.В. Пашеев // Физика металлов и металловедение. – 2016. – Т.117, N2. – С. 1269-1276.
8. Фрактальный анализ сварных соединений (Cu-Ta, Cu-Ti) / Б.А. Гринберг, М.С. Пушкин, А.П. Танкеев, А.В. Иноземцев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2017. – Т.14. – С. 445-452.
9. Микроструктуры, препятствующие сцеплению материалов при сварке взрывом / Б.А. Гринберг, М.А. Иванов, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак, Ю.П. Бесшапошников, М.С. Пушкин, А.В. Иноземцев, А.М. Пацелов // Письма о материалах. – 2018. – Т.14., N3 – С. 252-257.
10. Сварка взрывом: процессы и структуры / Б.А. Гринберг, М.А. Иванов, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак, О.В. Антонова, Ю.П. Бесшапошников, А.М. Власова, Л.М. Гуревич, О.А. Елкина, А.В. Иноземцев, В.Е. Кожевников, А.М. Пацелов, В.П. Пилюгин, А.В. Плотников, М.С. Пушкин, В.В. Рыбин, Г.А. Салищев, О.В. Слаутин, А.П. Танкеев, Т.П. Толмачев, В.О. Харламов. – М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 236 с.

Отпечатано на Ризографе ИФМ УрО РАН тираж 100 экз., заказ № 35

объем 1 печ.л. формат 60x84 1/16

620990, г. Екатеринбург, ул. С.Ковалевской, 18, ИФМ УрО РАН