

На правах рукописи

Малахов Андрей Юрьевич

ПЛАКИРОВАНИЕ ВЗРЫВОМ ДЛИННОМЕРНЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ
ПОКРЫТИЯМИ

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (металлургия)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Черноголовка – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН)

Научный руководитель: **Первухина Ольга Леонидовна**
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник ИСМАН

Официальные оппоненты: **Родионова Ирина Гавриловна**
доктор технических наук, заместитель директора научного центра физическо-химических основ и технологий металлургии, Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина, г. Москва

Шахрай Денис Владимирович
кандидат физико-математических наук, заведующий отделом экстремальных состояний вещества, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики Российской академии наук, г. Черноголовка.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования **Пензенский государственный университет**, г Пенза.


Защита диссертации состоится «29 мая» 2019 года в 13.00 на заседании диссертационного совета Д 002.092.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук по адресу: 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипяна, д. 8.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСМАН и на сайте:
http://www.ism.ac.ru/n_struct/dsc/annonces/malakhov.pdf

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью организации) просьба направлять по адресу: 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипяна, д.8, ИСМАН, Диссертационный совет Д 002.092.02.

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н.



Петров Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования

Изделия цилиндрической формы (трубы, стержни) широко используются в нефтехимической отрасли машиностроения, электроэнергетике, металлургии и т.д. Рабочие поверхности данных изделий испытывают как механические нагрузки, так и коррозионно-эрозионное разрушение. Например, стальные насосно-компрессорные трубы, которые используются при эксплуатации газовых и нефтяных скважин, в процессе работы испытывают значительные механические нагрузки и подвергаются коррозионному воздействию агрессивных веществ, находящихся в добываемом продукте. Интенсивной коррозии в растворах электролитов подвергаются элементы электролизной ванны, в частности токоподводы, которые служат для подвода постоянного тока к электролизёрам. Коррозионно-эрозионному разрушению подвергаются внутренние поверхности стволов в гладкоствольных артиллерийских системах.

Важной задачей для отечественного машиностроения является создание нового композиционного материала для изготовления из него стволов артиллерийских систем, внутренняя поверхность которых испытывает действие высокоэнергетических конденсированных систем. В настоящее время износостойкость существующих и перспективных оружейных сталей не соответствует требованиям повышения мощности метательных составов. Проблема защиты рабочей поверхности стволов от эрозионного износа является актуальной задачей. Одним из возможных способов решения данной проблемы является изготовление двухслойного материала. В качестве наружного слоя остается конструкционная высокопрочная оружейная сталь. Внутренний слой должен состоять из жаропрочного эрозионно-стойкого сплава (например, ниобиевый, никель-кобальтовый, танталовый и т.п.).

Для защиты поверхности токоподводов от агрессивного воздействия электролитов в процессе электролиза цветных металлов в основном применяют титан с нанесенным на него металлооксидным активным покрытием. Титан и медь при сварке образуют на границе соединения ряд хрупких интерметаллидных соединений, что может существенно влиять на прочность соединения слоев и на увеличение электросопротивления в токоподводе. В свою очередь, повышение электросопротивления приводит к нагреву элемента и потерям электричества из-за повышения силы тока. Таким образом, актуальной задачей современной цветной металлургии является создание медно-титановых токоподводов для электролизных ванн с минимальным количеством хрупких интерметаллидов на границе соединения и прочным сцеплением слоев.

Исходя из всего вышесказанного, для создания многослойных изделий цилиндрической формы в том, числе длинномерных, с сочетанием слоев из материалов с резко различающимися свойствами перспективно использовать сварку взрывом, либо применять комплексную технологию, сочетающую в себе сварку взрывом и прокатку.

Сварка взрывом в силу присущих ей особенностей является одним из самых эффективных, а в ряде случаев единственно возможным способом создания высококачественных многослойных материалов. Несмотря на очевидные достоинства технологии, для получения биметаллов цилиндрической формы этот способ имеет ряд трудностей. При плакировании длинномерных цилиндрических заготовок (когда длина изделия превышает 10 наружных диаметров) возникает проблема снижения прочностных свойств соединения по мере удаления от точки инициирования процесса сварки. Импульсный характер нагружения свариваемых металлов требует жесткого соблюдения всех режимных параметров процесса сварки. В противном случае имеет место

появление трещин, и даже разрушение металла. Точность сборки технологических схем особенно при сварке взрывом длинномерных изделий цилиндрической формы определяет качество соединения. Даже минимальное отклонение в геометрии коаксиально собранных элементов может привести к появлению зон несплошностей и неприваров, что снижает коррозионную стойкость полученного биметалла и его прочностные свойства.

Также существуют трудности при получении сваркой взрывом биметаллических трубных заготовок с сочетанием слоев титан+сталь вследствие образования хрупких интерметаллидных соединений на границе соединения слоев.

Таким образом, актуальной задачей прикладного материаловедения является создание биметаллического материала в виде трубы или стержня у которого на рабочую поверхность нанесен функциональный коррозионно- или эрозионностойкий слой. Прочность и сплошность соединения слоев из материалов, значительно различающихся по теплофизическим и механическим свойствам, являются главными характеристиками, определяющими работоспособность композиционного материала.

Актуальность темы подтверждается её выполнением в конкурсах и проектах:

1. Стипендия Президента РФ молодым ученым и аспирантам по теме: «Разработка энергосберегающей технологии производства сваркой взрывом двухслойных коррозионностойких трубных заготовок для нужд нефтегазодобывающей отрасли» (Конкурс СП-2016), 2017-2018.

2. Программа «У.М.Н.И.К» по теме: «Разработка энергосберегающей технологии получения композиционных материалов трубчатой формы с внутренним коррозионностойким слоем», 2016-2017.

3. Грант РФФИ №14-08-00845 и Грант РФФИ №17-08-01248.

Научная новизна работы заключается:

1. Впервые экспериментально установлено, что для формирования равнопрочного бездефектного соединения с однородной структурой при сварке взрывом жаропрочных сплавов на ниобиевой и никель-кобальтовой основах с высокопрочной оружейной сталью ОХНЗМ необходимо в 3-7 раз увеличить удельную кинетическую энергию метаемого элемента из жаропрочного сплава по сравнению со сваркой взрывом материалов с сочетанием слоев углеродистая сталь + аустенитная сталь.

2. Установлена следующая закономерность при сварке взрывом плоских и цилиндрических двухслойных изделий высокопрочная сталь+жаропрочный сплав: при близких режимах в цилиндрических изделиях объём литых включений на границе соединения значительно увеличен, что связано с дополнительным тепловым воздействием на свариваемые поверхности ударно-сжатого газа, движущегося с гиперзвуковой (свыше 5М) скоростью в сварочном зазоре, при отсутствии его бокового истечения.

3. На основе анализа опубликованных данных по сварке взрывом титана со сталью, оценочного расчета глубины проплавления свариваемых поверхностей, результатов экспериментов с заполнением сварочного зазора воздухом, аргоном и разряженной воздушной атмосферой теоретически и экспериментально установлено, что с целью получения соединения с заданным комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств, в сварочном зазоре необходимо создать атмосферу разреженного аргона.

4. Установлено, что для получения качественных цилиндрических изделий сваркой взрывом по «обратной» схеме необходимо использование дисперсного твердо-жидкого опорного наполнителя с акустическим сопротивлением (импедансом), близким к импедансу тонкостенной трубы, что позволяет снизить интенсивность (амплитуду) ударной волны в зоне соединения и

уменьшить среднюю толщину литых включений в 4 раза по сравнению со сваркой по схеме с использованием стального стержня с изолирующим слоем.

5. Установлено, что колебание сварочного зазора по длине и диаметру длинномерных цилиндрических заготовок приводит к образованию в поршне ударно-сжатого газа турбулентных потоков как в осевом, так и в радиальном направлениях, что приводит к неравномерному аэродинамическому прогреву свариваемых поверхностей и образованию литых включений на границе соединения, располагающихся полосами вдоль осевого направления цилиндрического изделия.

6. Впервые установлено, что наличие локальных непроваров и интерметаллидной прослойки между титановой трубой и медным стержнем не оказывает заметного влияния на падение напряжения по длине биметаллических токоподводов медь М1+титан ВТ1-0. Показано, что при сплошности соединения равной 50% от общей площади контакта сваренных поверхностей падение напряжения на биметаллическом стержне соответствует падению на медном стержне.

На защиту выносятся следующие основные положения и результаты:

1. Выявленная взаимосвязь состава атмосферы в сварочном зазоре со структурой и свойствами соединения титана со сталью в цилиндрических изделиях, полученных сваркой взрывом.

2. Механизм образования дефектов при сварке взрывом длинномерных цилиндрических изделий.

3. Установленное в ходе экспериментальных исследований на плоских и цилиндрических образцах влияние режима сварки взрывом на структуру и свойства соединения жаропрочных сплавов с высокопрочной оружейной сталью.

4. Разработанный дисперсный твердо-жидкий опорный наполнитель и экспериментально установленные закономерности его влияния на структуру и деформацию при сварке взрывом длинномерных трубных заготовок по «обратной» схеме.

5. Требования к наличию локальных непроваров (до 50%) на границе соединения титановой трубы и медного стержня, не оказывающих заметного влияния на падение напряжения по длине биметаллических токоподводов медь М1+титан ВТ1-0, определённые на стенде, имитирующего условия эксплуатации в электролизной ванне.

6. Разработанные технологические основы производства длинномерных цилиндрических изделий, обеспечивающие в заданных пределах уровень деформации и сплошность соединения слоев.

7. Результаты промышленного производства биметаллических стержней титан + медь, использующиеся для изготовления токоподводов для анодных ячеек электролизных ванн никеля и выпуска опытных партий длинномерных биметаллических трубных заготовок для последующей их прокатки в насосно-компрессорные трубы.

Практическая значимость полученных результатов

1. Разработанные технологические основы производства длинномерных биметаллических цилиндрических изделий позволили создать технологии изготовления сваркой взрывом изделий широкой номенклатуры, в которых требуется нанесение относительно тонкого наружного и внутреннего слоя для защиты от агрессивной среды.

2. Определено, что в условиях реального промышленного производства использование дисперсного твердо-жидкого опорного наполнителя на основе металлической дроби и воды при изготовлении биметаллических трубных заготовок по «обратной» схеме обеспечивает

минимальную поперечную деформацию и практически 100%-ую сплошность соединения при минимальном количестве литых включений.

3. Для осуществления производства цилиндрических токоподводов разработаны и согласованы в установленном порядке технические условия «ТУ 18827-002-21414987-2016. Пруток биметаллический титан+медь, изготовленный сваркой взрывом».

4. Полученные биметаллические цилиндрические изделия могут быть рекомендованы для изготовления насосно-компрессорных труб, артиллерийских стволов, цилиндрических переходников и токоподводов, работающих в агрессивных средах.

Реализация результатов

На предприятии ООО «Битруб» (г. Красноармейск) освоена технология промышленного производства сваркой взрывом медно-титановых двухслойных стержней длиной 1500 мм диаметрами 20 и 32 мм, которые были использованы в качестве токоподводов для изготовления анодных ячеек электролизных ванн для получения никеля с ежемесячным объёмом производства до 3000 шт. Качество двухслойных стержней соответствует техническим условиям и конструкторской документации: фактическая сплошность соединения слоёв не ниже 75%, деформация по длине не более 2 мм. Биметаллические стержни, изготовленные по заказу ООО «Арсенал» (г. Москва), были поставлены в количестве 34500 штук на предприятия АО «Тамбовское опытно-конструкторское технологическое бюро» и АО «Башкирская содовая компания» (г. Стерлитамак), которые использовали их для оснащения анодных ячеек ванн электролизеров. В настоящее время анодные ячейки, оснащенные цилиндрическими токоподводами титан+медь производства ООО «Битруб», успешно работают на АО «Кольская ГМК».

В ООО «Битруб Интернэшнл» изготовлены две опытно-промышленные партии длинномерных биметаллических трубных заготовок длиной 1000 мм и 2400 мм из конструкционной стали 37Г2Ф толщиной 12 мм и трубы из коррозионностойкой стали 08X18H10T толщиной 2,0 мм, которые были прокатаны в АО «Первоуральский Новотрубный завод» (г. Первоуральск) в насосно-компрессорные трубы диаметром 73 мм, исследована структура и механические свойства. Испытания прокатанных биметаллических труб на коррозионное разрушение и прочностные свойства показали, что полученные по двухстадийной технологии биметаллические насосно-компрессорные трубы по показателям прочностных характеристик соответствуют группе К по ГОСТ 633-80, а плакирующий слой из стали 08X18H10T имеет высокую стойкость против коррозионного разрушения в различных средах, в том числе сероводороде. Исходя из проведенных исследований и испытаний следует, что результаты диссертационной работы могут быть использованы в виде практических рекомендаций для освоения технологии получения двухслойных коррозионностойких бесшовных насосно-компрессорных труб, работающих в условиях повышенного износа.

Апробация работы

Результаты работы были доложены на следующих конференциях:

VII Международная научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов «Сварка и родственные технологии», г. Киев, Институт им. Патона, 2013; Всероссийская конференция «Взрыв в физическом эксперименте», г. Новосибирск, 2013; Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов, ИМЕТ РАН, г. Москва, 2013, 2015, 2017; Международная конференция «Деформация разрушения материалов и наноматериалов», ИМЕТ РАН, г. Москва, 2013, 2017; Всероссийская с международным участием Школа-семинар по структурной макрокинетике для молодых ученых, г. Черноголовка, 2013-2018; VI Научно-

практическая конференция «Молодежные научно-инновационные проекты Московской области», г. Реутов, 2013; XXI International Symposium on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations, Krakow, 2014; VI Международная конференция «Новые материалы и технологии их получения», г. Волгоград, 2014; X Научно-практическая конференция «Молодежные научно-инновационные проекты Московской области», г. Жуковский, 2015 г; Ежегодная научная конференция ИСМАН, 2017; Международная конференция «СВС-50», приуроченная к 50-летию юбилею научного открытия «Явление волновой локализации автотормозящихся твердофазных реакций», Черноголовка, 2017; XIV International Symposium on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations, St.Petersburg, 2018; 6TH International congress on energy fluxes and radiation effects (EFRE-2018), Tomsk, Russia, 2018.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 статей в реферируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК, в том числе 5 статей, входящих в базы данных Web of Science и Scopus, 22 тезиса в сборниках трудов на перечисленных выше конференциях.

Личный вклад автора

Автором выполнен литературный обзор и анализ опубликованных работ по теме диссертационного исследования по результатам которого сформулированы цель и задачи исследования. Автором разработана методика проведения теоретических и экспериментальных исследований с разработкой схем проведения опытов и их реализации. Принимал непосредственное участие при подготовке и проведении экспериментов по сварке взрывом, проводил визуально-измерительный контроль, исследовал деформации цилиндрических изделий и структуры соединения слоев. Проведен анализ результатов исследований, на основании которого разработаны технологические основы производства сваркой взрывом длинномерных цилиндрических изделий. Им были написаны статьи по теме диссертационного исследования, результаты каждого этапа работы докладывались на научно-практических конференциях.

Обоснование и достоверность

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается большим объемом экспериментов с применением современных методов исследования в материаловедении (растровая электронная микроскопия, рентгеновский спектральный микроанализ), значительным количеством экспериментальных данных и статистической обработкой полученных результатов.

Структура и объем работы

Диссертационная работа содержит введение, 5 глав, выводы, список литературы и 5 приложений. Общий объем работы составляет 171 страницу, включая 85 рисунков, 17 таблиц и библиографию из 118 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе опубликованных данных выполнен анализ технологий получения изделий цилиндрической формы. Рассмотрены основные достоинства и недостатки каждого из способов. Был проведен анализ работ по получению сваркой взрывом двухслойных труб и стержней с указанием имеющихся проблем в получении длинномерных цилиндрических изделий. Рассмотрены особенности сварки взрывом цветных металлов и сплавов в приложении к

производству двухслойных материалов с сочетанием слоев титан+сталь и титан+медь. Проанализированы способы защиты внутренней и наружной поверхностей цилиндрических изделий, работающих в контакте с агрессивными средами. Показано, что использование сварки взрывом для получения длинномерных двухслойных изделий цилиндрической формы позволит в разы увеличить срок эксплуатации различного вида конструкций. На основании проведенного обзора сформулированы цели и задачи исследований.

Во второй главе описаны методические основы экспериментальных исследований, разработанные методики испытаний механических и эксплуатационных свойств биметаллов, приведено описание материалов, используемых в работе.

Исходя из целей исследования для экспериментов были выбраны следующие исходные материалы:

- для плакирующего слоя использовались жаропрочные и жаростойкие сплавы на ниобиевой и никель-кобальтовой основах Н65В2МЦ и ЭК102 соответственно, а также коррозионностойкая сталь 08Х18Н10Т и титан ВТ1-0 и ПТ-7М;

- для основного слоя использовались высокопрочная сталь ОХНЗМ, конструкционная сталь 37Г2Ф, медь марки М1 и конструкционная сталь 20;

- для опорных наполнителей использовались: литая стальная дробь, стержень из стали Ст.3, строительный песок и поваренная соль.

Микроструктуру полученных материалов и элементный состав образовавшихся на границе соединения переходных зон исследовали методами растровой электронной микроскопии с помощью металлографического инвертированного микроскопа МЕТАМ ЛВ-34 (съемка изображений с микроскопа осуществлялась камерой модели ТС-500) и автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа сверхвысокого разрешения Zeiss Ultra plus на базе Ultra 55 с приставкой рентгеновского микроанализа INCA 350 Oxford Instruments.

Оценка продольной деформации цилиндрических образцов после сварки взрывом проводилась с помощью технологии нанесения специальных меток (реперные точки) и замеров расстояния между метками до и после сварки взрывом. Поперечная остаточная деформации оценивалась методом измерения наружного диаметра трубы штангенциркулем ШЦ-1-150-0,05 ГОСТ 166-89 в двух перпендикулярных друг другу направлениях. Ультразвуковой контроль проводился прибором УД2В-П45. Измерения падения напряжения в местах контакта медного стержня и титановой трубы по длине токоподвода были проведены на стенде АО «Башкирская содовая компания» (г. Стерлитамак).

В третьей главе исследованы особенности сварки взрывом жаропрочных ниобиевого Н65В2МЦ и никель-кобальтового ЭК102 сплавов с высокопрочной оружейной сталью ОХНЗМ на модельных плоских и трубчатых образцах, а также исследовано влияния состава газа в сварочном зазоре на образование соединения цилиндрических изделий в трубных заготовках с сочетанием слоев сталь 20+титан ПТ-7М.

Режимы сварки взрывом и результаты механических испытаний на отрыв плакирующего слоя представлены в таблице 1.

Сварка взрывом сплавов Н65В2МЦ и ЭК102 со сталью ОХНЗМ производилась плоскопараллельной схеме. Параметры режимов сварки взрывом определяли исходя из опыта промышленного производства биметаллических листов с плакирующим слоем из нержавеющей сталей типа 12ХМ (таблица 1), оценке физико-механических свойств свариваемых сплавов и количественной оценке удельной кинетической энергии соударения свариваемых материалов. В результате экспериментальной работы было установлено, что для качественной сварки взрывом

жаропрочных сплавов с высокопрочной сталью необходимо повысить удельную кинетическую энергию метаемой пластины в 3 раза для сварки ниобиевого сплава и в 7 раз для сварки никель-кобальтового сплава. Прочность соединения слоёв для биметалла, содержащего ниобиевый сплав, составляет 250-300 МПа, а для биметалла, содержащего сплав ЭК102 – 950-1000 МПа. Таким образом, для сварки взрывом жаропрочных ниобиевых и никель-кобальтовых сплавов с высокопрочной оружейной сталью следует повысить скорость точки контакта с 2500 м/с до 2800 м/с, тем самым увеличивается параметр r до значений 1,6-2,2 и удельная кинетическая энергия метаемой пластины до 4,18 и 6,9 МДж/м².

Таблица 1 Сводная таблица параметров режимов сварки взрывом и результатов механических испытаний

Материал		Скорость детонации D , м/с*	Параметр r	Скорость метания v_0 , м/с	Удельная кинетическая энергия, ω МДж/м ²	Предел прочности соединения на отрыв σ_e , МПа
Основа	Метаемая пластина					
12ХМ	12Х18Н10Т	2400	1,0	446	1,17	400-450
ОХНЗМ	Н65В2МЦ	2500	1,6	782	4,18	250-300
ОХНЗМ	ЭК102	2500	1,6	782	4,18	Нет соединения
ОХНЗМ	ЭК102	2800	2,2	1050	6,9	950-1000

* – Данные получены ФКИП НИИ «Геодезия» и ООО «Битруб Интернэшнл»

После экспериментальной отработки режимов сварки взрывом жаропрочных сплавов с высокопрочной сталью, которая показала возможность получения соединения, решалась задача получения биметаллических трубных заготовок с тем же сочетанием слоёв, что и в плоском варианте (рисунок 1).

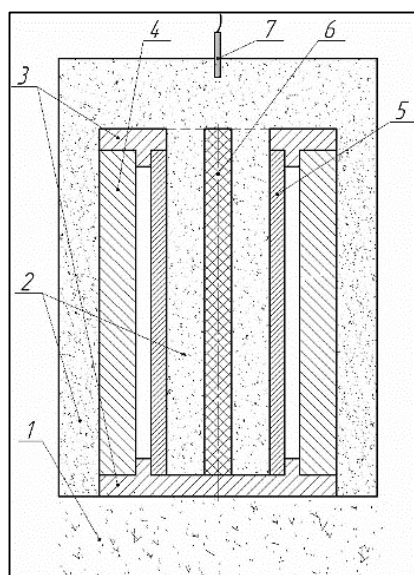
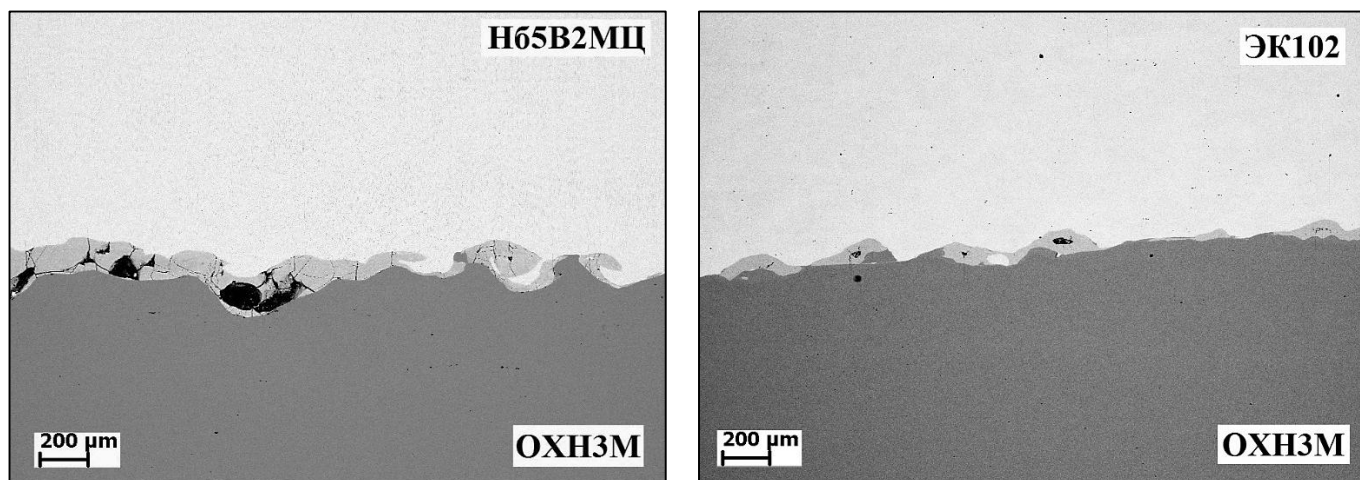


Рисунок 1 – Сборка для сварки взрывом трубных заготовок:

- а – схема:
 1 – песчаная основа,
 2 – заряды взрывчатого вещества (аммонит 6ЖВ), 3 – крышки,
 4 – наружная труба из стали ОХНЗМ,
 5 – внутренняя труба из жаропрочного сплава ЭК102/Н65В2МЦ,
 6 – пластиковая труба,
 7 – детонатор;
 б – сборка на полигоне

Зона соединения Н65В2МЦ+ОХНЗМ представляет собой практически сплошную прослойку литых включений толщиной 250-300 мкм, в состав которой входят компоненты свариваемых слоёв. Зона сварного шва содержит дефекты кристаллизационного характера, такие как микротрещины и поры, не выходящие за пределы прослойки (рисунок 2, а). В биметалле ЭК102+ОХНЗМ по всей длине соединения присутствуют локализованные участки с литыми включениями, имеющие усадочные пустоты (рисунок 2, б).



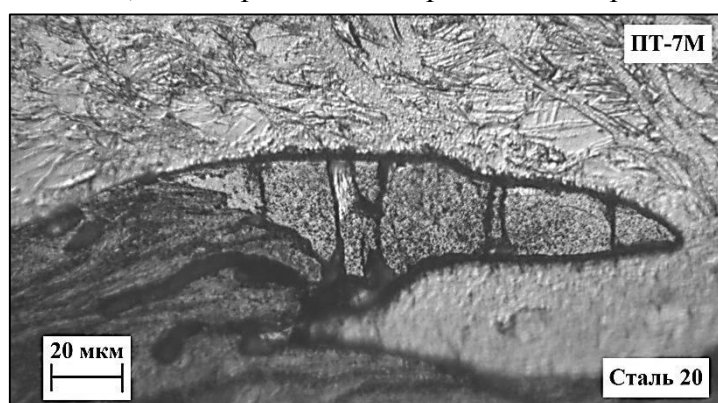
а

б

Рисунок 2 – Граница соединения полученных сваркой взрывом трубных образцов:
а – Н65В2МЦ+ОХНЗМ; б – ЭК102+ ОХНЗМ

Анализ результатов исследований зоны соединения биметаллических трубных заготовок и механических испытаний позволил сделать вывод, что получены качественные двухслойные изделия цилиндрической формы с заданным сочетанием слоев «жаропрочный сплав ЭК102 и высокопрочная сталь ОХНЗМ». Для пары материалов сталь ОХНЗМ и ниобиевый сплав Н65В2МЦ необходима корректировка режимов в сторону уменьшения скорости детонации.

Сравнение структуры соединений при сварке взрывом плоских и цилиндрических изделий показало, что при близких режимах сварки в цилиндрических изделиях количество литых



включений значительно увеличено. Это, по-видимому, связано с увеличением удельной кинетической энергии метаемых труб по сравнению с плоскими образцами и влиянием движущегося с гиперзвуковой скоростью ударно-сжатого газа в сварочном зазоре, который, не имея бокового истечения гораздо интенсивнее воздействует на свариваемые поверхности, чем в случае с плоскими образцами.

Рисунок 3 – Граница соединения сталь 20+ТТ-7М

В рамках диссертационной работы были проведены исследования влияния состава атмосферы в сварочном зазоре на процесс образования соединения при сварке взрывом модельных трубных заготовок сталь 20+титан ТТ-7М.

Микроструктура соединения во всех трубных образцах на границе соединения сталь 20+титан ТТ-7М имеет особенности: со стороны стали вблизи зоны контакта наблюдается интенсивная пластическая деформация зерен с вытяжением их вдоль границы соединения, в титане наблюдаются полосы локализованного сдвига, расположенные под углом ≈ 45 градусов к линии контакта (рисунок 3). Были проведены расчёты глубины проплавления свариваемых поверхностей и измерения толщин оплавок на границе соединения. Расчёты показали, что при создании разряжения в сварочном зазоре степень оплавления свариваемых поверхностей в процессе сварки взрывом уменьшается. Введение аргона в сварочный зазор исключает горение

титана в процессе сварки взрывом, что снижает степень нагрева поверхностей свариваемых материалов. Однако принятая методика расчёта не учитывает отсутствие нагрева при горении титана.

Установлено, что в образцах, сваренных при наличии в сварочном зазоре атмосферного воздуха, количество литых включений по длине заготовки значительно увеличивается в конце процесса по сравнению с его началом (рисунок 4, а) вплоть до появления сплошной полосы литых включений на границе соединения толщиной до 100 мкм (рисунок 4, б).

При разряджении воздуха до 16 кПа в структуре соединения наблюдаются локальные участки интерметаллидов (рисунок 4, в и г). При сварке в аргоне размеры этих участков возрастают, но при этом сплошного слоя не образуется (рисунок 4, д и е)

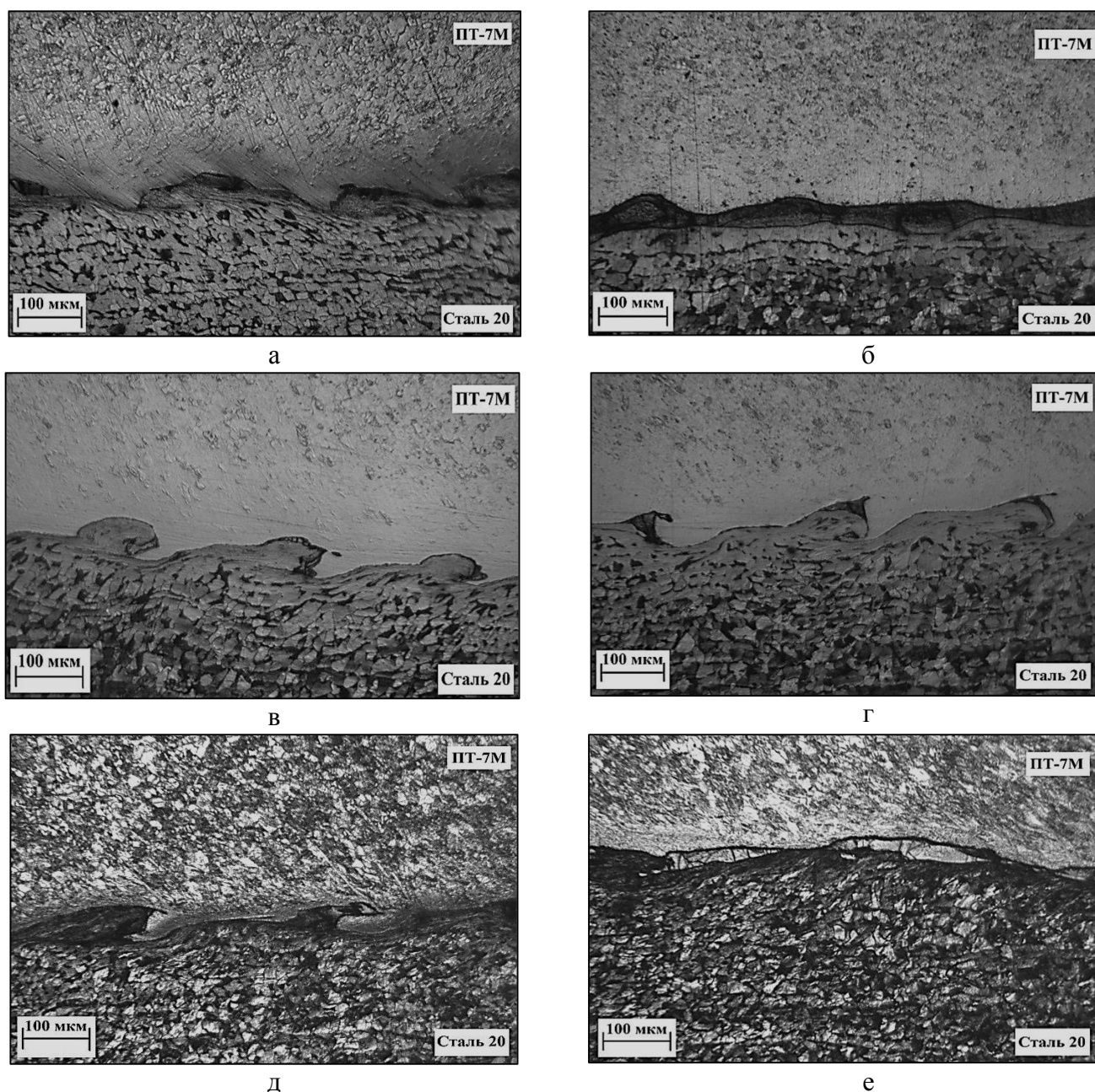


Рисунок 4 – Структура границы соединения сталь 20+титан ПТ-7М:
а, б – в зазоре воздух; в, г – в зазоре разряженный воздух; д, е – в зазоре аргон

По результатам экспериментов с заполнением сварочного зазора воздухом, аргоном и с созданием разряджения воздушной атмосферы и оценочного расчета глубины проплавления

выявлено, что для получения сваркой взрывом соединения сталь 20+титан ПТ-7М с минимальным количеством литых включений в трубных заготовках необходимо создание в сварочном зазоре атмосферы разреженного аргона. Это позволит за счёт разрежения снизить термодинамические параметры ударно-сжатого газа, а за счет инертных свойств аргона исключить возгорание титана в процессе сварки взрывом.

Четвертая глава посвящена разработке технологических основ производства сваркой взрывом двухслойных длинномерных цилиндрических изделий, таких как коррозионностойкие насосно-компрессорные трубы и медно-титановые токоподводы. При разработке технологических основ сварки взрывом были решены следующие основные задачи: 1). Обеспечение оптимального зазора между наружной и внутренней трубой или стержнем по длине и диаметру, 2). Обеспечение минимальной деформации в процессе сварки взрывом, 3). Обеспечение условий для равномерной детонации взрывчатого вещества по длине цилиндрического образца, 4). Защита поверхности плакирующего слоя от механического повреждения продуктами детонации взрывчатого вещества, 5). Обеспечение одновременности инициирования большого числа зарядов.

В качестве исходных материалов для сварки взрывом трубных заготовок использовались трубы и стержни из следующих материалов: 1). Основной слой – труба из стали 37Г2Ф толщиной 12 мм и наружным диаметром 108 мм. Длины труб – 1000 и 2400 мм. 2). Плакирующий слой – труба из стали 08Х18Н10Т толщиной 2,5 мм и наружным диаметром 80 мм. Длины труб – 1000 и 2400 мм. 3). Материалы для внутреннего наполнителя: стальная литая дробь ДСЛУ с диаметром фракции 2,2 мм; стальной стержень из стали Ст.3 диаметром 70 мм и длиной 1000 мм.

Для сварки взрывом медного стержня с титановой трубой использовались следующие материалы: 1). Основной слой – стержни из меди М1 диаметрами 16 и 28 мм и длиной 1500 мм, 2). Плакирующий слой – трубы из технического титана ВТ1-0 толщиной 2 мм и наружным диаметром 22 и 35 мм и длиной 1500 мм.

Эксперименты проводили в три этапа по разработанным схемам. На первом этапе экспериментально отработывалась схема получения двухслойных труб длиной 1000 мм с применением схемы с синхронным инициированием двух противоположно установленных зарядов. На втором этапе получали сваркой взрывом биметаллические трубы длиной 1000 мм с использованием разных внутренних наполнителей – дисперсной твёрдо-жидкой опоры и сплошного стержня с прослойкой из изолирующего слоя NaCl; также проводились эксперименты с плакированием труб длиной 2400 мм и разрабатывались технологические основы их производства с выпуском опытной партии. На третьем этапе осуществлялось плакирование тонким слоем титана медных стержней длиной 1500 мм.

Результаты проведенных экспериментов по схеме с синхронным инициированием противоположно установленных зарядов показали, что схему эксперимента сложно реализовать практически для получения длинномерных биметаллических труб: требуется достаточная точность сборки свариваемых элементов по представленной схеме, что может существенно затруднить промышленное применение данной схемы. Используемые в данной схеме эксперимента параметры режимов сварки взрывом и технологическая оснастка обеспечили условия формирования волнообразного бездефектного соединения, однако сохранить целостность двухслойной заготовки не удалось.

Были разработаны и экспериментально опробованы две «обратные» схемы плакирования стальной трубы тонким слоем из нержавеющей стали (рисунок 5). «Обратная» схема характеризуется тем, что при сварке взрывом метаемым элементом является толстостенная труба, тогда как тонкостенный плакирующий слой остается неподвижным.

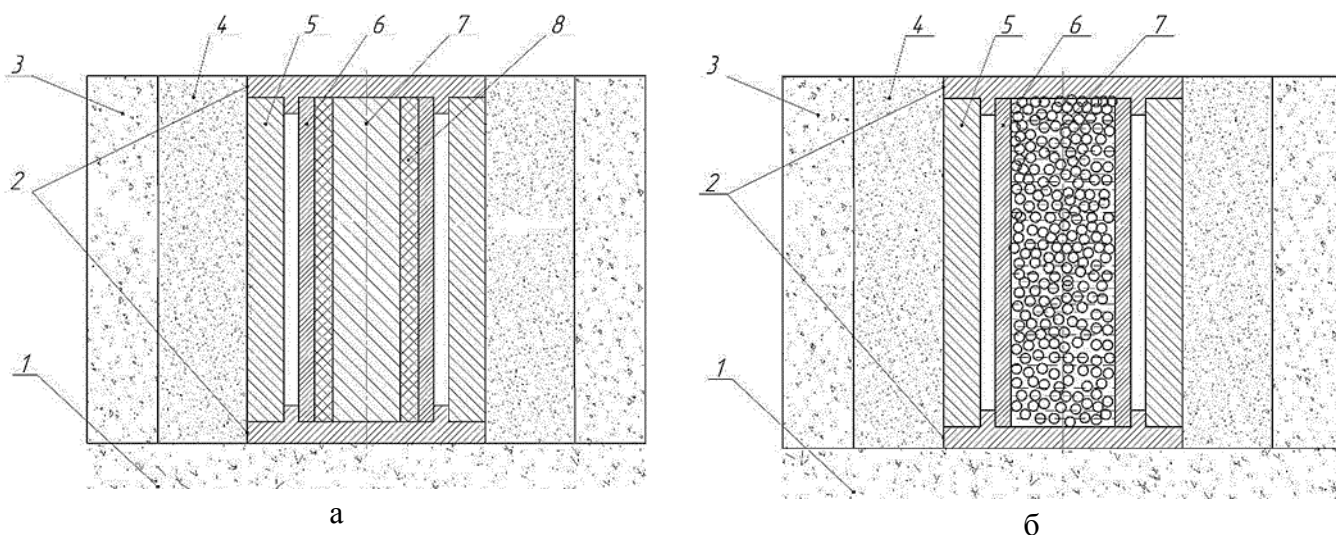


Рисунок 5 – Экспериментальные схемы сборки двухслойных трубных заготовок с применением внутренних опорных наполнителей: а – стальной стержень; б – стальная дробь+вода: 1 – песчаная опора, 2 – верхние и нижние крышки, 3 – забойка из песка, 4 – заряд ВВ, 5 – наружная труба, 6 – внутренняя труба, 7 – внутренний наполнитель, 8 – изолирующий слой

Сборка под сварку взрывом по схеме, указанной на рисунке 5, а осуществлялась следующим образом: на песчаную насыпь 1 устанавливали сборку, состоящую из двух труб 5 и 6, стержня 7, находящегося во внутренней полости трубы 6. Нижняя часть стержня помещалась в центrovочную крышку 2, зазор между стержнем и трубой 6 заполнялся солью 8. Зазор между трубами 5 и 6 составлял 2 мм. По схеме, указанной на рисунке 5, б сборка осуществлялась аналогичным образом и вместо стального стержня и соли была использована дробь с водой 7. Сварку проводили на двух режимах со скоростями точек контакта 2900 м/с и 3300 м/с.

По разработанным схемам сваркой взрывом были получены двухслойные трубные заготовки (рисунок 6, а). Для дальнейших исследований из них были изготовлены кольцевые образцы для изучения макро- и микроструктуры границы соединения (рисунок 6, б и в).

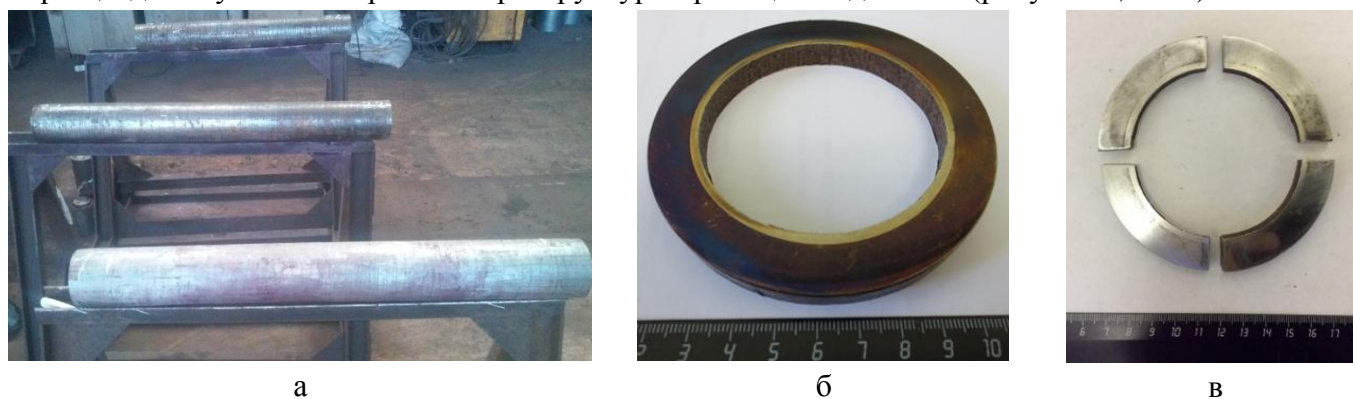
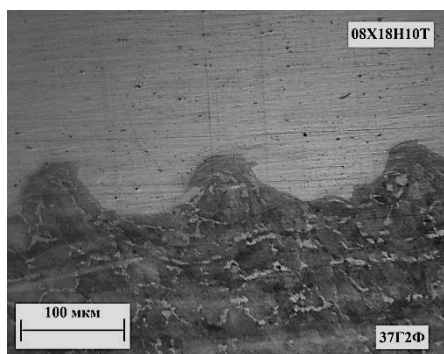


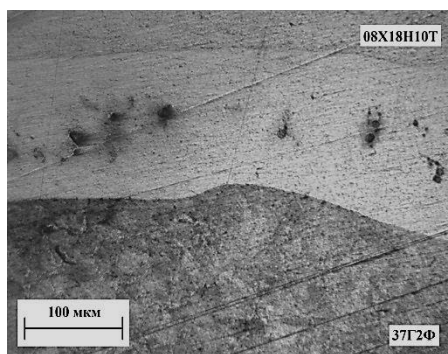
Рисунок 6 – Биметаллические образцы сталь 08X18N10T+сталь 37Г2Ф: а – образцы после УЗК и обрезки; б – кольцевой образец; в – образец, разрезанный на квадранты.

При использовании в качестве внутреннего наполнителя стального стержня с изолирующим слоем из соли граница соединения имеет следующие особенности:

1. На расстоянии 100 мм от начала трубной заготовки граница соединения по всем четырем квадрантам имеет упорядоченный волнообразный профиль с амплитудой волны в 50-70 мкм и длиной 170-200 мкм (рисунок 7, а).



а



б

Рисунок 7 – Структура зоны соединения слоёв биметаллической трубы 37Г2Ф (нижний слой) +08X18H10Т (верхний слой), полученной по схеме со стальным стержнем: а – начальный участок, б – конечный участок

2. Граница соединения в конечной области отличается по структуре и геометрии околошовной зоны: по двум образующим трубной заготовки граница имеет волнообразный профиль с амплитудой 180-200 мкм и длиной 750-800 мкм, а по двум другим – сплошная прослойка литого металла толщиной от 50 до 300-350 мкм (рисунок 7, б).

Эксперименты по получению биметаллических заготовок с дисперсным твердо-жидким наполнителем (металлическая дробь+вода) проводили по двум режимам. Режиму №1 соответствовала скорость точки контакта – 2900 м/с (труба №1), а при режиме №2 скорость точки контакта составляла 3300 м/с (труба №2).

Металлографические исследования образцов из труб №1 и №2 показали, что во всех образцах, взятых на расстоянии 100 мм от начала трубных заготовок граница соединения «сталь 37Г2Ф+08X18H10Т» имеет безволновой профиль с наличием локальных участков с литыми включениями толщиной от 2 до 20 мкм.

Таким образом, околошовная зона в начальных участках в образцах, полученных при использовании дисперсного твердо-жидкого наполнителя имеет отличную форму и структуру от зоны соединения, полученного по схеме со стальным стержнем.

Установлено, что распределение расплавов по диаметру трубных заготовок в продольном направлении в трубах №1 и №2 имеет неравномерный характер. Результаты измерения толщины расплавов в каждом из квадрантов в концевых образцах представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Усреднённая толщина расплавов

№ трубы	№ квадранта	Усредненная толщина расплавов, мкм
№1 Дисперсный твердо-жидкий наполнитель $V_k=2900$ м/с	1	20
	2	27
	3	31
	4	26
№2 Дисперсный твердо-жидкий наполнитель $V_k=3300$ м/с	1	35
	2	30
	3	33
	4	19
№3 Стальной стержень с изолирующим слоем $V_k=2900$ м/с	1	270
	2	25
	3	71
	4	20

Усредненная толщина расплавов на границе соединения в конечных участках образцов с применением твердо-жидкого опорного наполнителя колеблется от 20 до 35 мкм, а с применением стального стержня с изолирующим слоем из NaCl находится в пределах от 20 до 270 мкм, что в среднем в 4 раза больше.

На основе полученных результатов по сварке взрывом труб длиной 1000 мм были проведены эксперименты по плакированию взрывом заготовок из тех же материалов длиной 2400 мм с применением дисперсного твердо-жидкого наполнителя (металлическая дробь+вода).

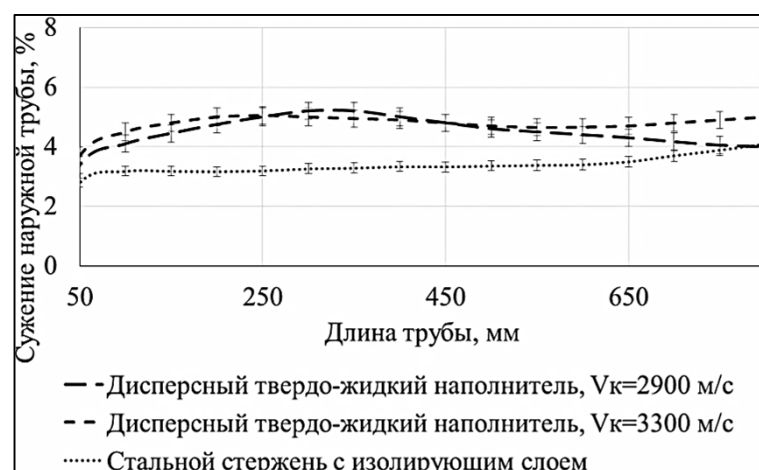
Металлографическими исследованиями образцов, полученных из трубных заготовок показано, что на длине 100 мм от начала оплавленные участки практически отсутствуют, а при их наличии в околошовной зоне они имеют незначительные размеры. В конечных зонах были

обнаружены сплошные прослойки расплавов. Были замерены их толщины в четырёх квадрантах. Результаты замеров показали, что усредненные толщины варьируются от 50 до 90 мкм, что в примерно в два раза больше, чем на конечных образцах из труб длиной 1000 мм.

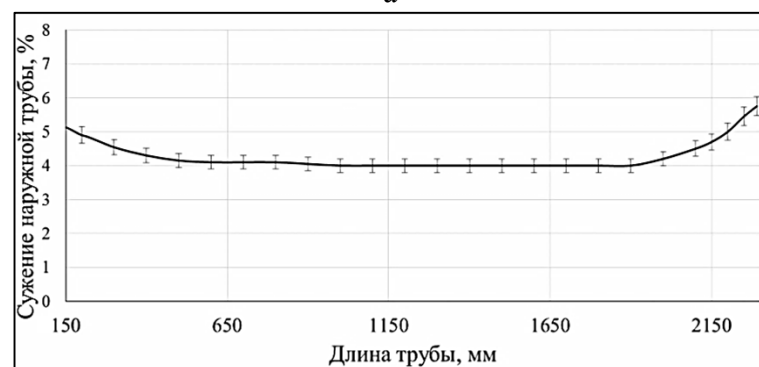
Исходя из результатов исследований был предложен механизм образования дефектов: колебание сварочного зазора по длине и диаметру цилиндрических заготовок приводит к образованию в поршне ударно-сжатого газа,двигающегося в зазоре с гиперзвуковой скоростью, турбулентных потоков как в осевом, так и в радиальном направлениях, что приводит к неравномерному аэродинамическому прогреву свариваемых поверхностей и образованию литых включений, располагающихся полосами вдоль осевого направления цилиндрического изделия.

Для определения относительного радиального сужения наружной трубы по длине заготовки и оценки возможной потери цилиндричности после сварки взрывом были проведены замеры в двух перпендикулярных плоскостях наружного диаметра исходных труб и построены графики изменения относительного сужения наружной трубы по длине заготовок (рисунок 8). Результаты замеров сужения и овальности наружной трубы в биметаллических заготовках, полученных по двум режимам и с применением разных опорных наполнителей, показали, что:

1. Относительное сужение наружной трубы в пределах 3-4% и овальность (0,1%) определены в биметаллических трубных заготовках, полученных с использованием стального стержня и изолирующего слоя из соли.



а



б

Рисунок 8 – Графики изменения относительного сужения наружной трубы по длине заготовок: а – для образцов длиной до 1000 мм; б – длиной до 2400 мм

которых скорости точек контакта V_k составляли 1500 м/с, 2000 м/с и 3500 м/с соответственно.

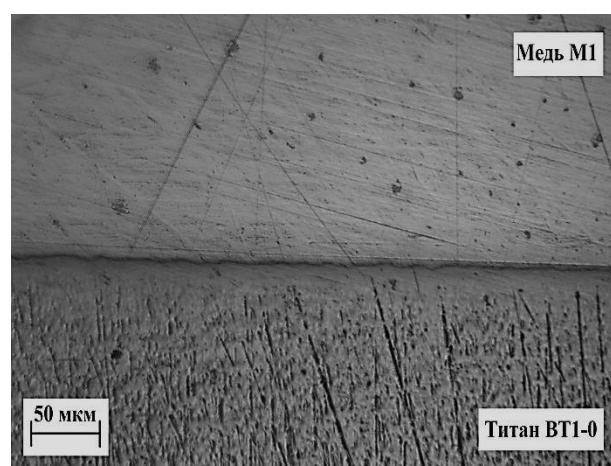
2. Поперечная остаточная деформация трубной заготовки благодаря жесткости опоры (стальной стержень) распределяется равномерно.

3. При использовании дисперсного твердо-жидкого наполнителя поперечная деформация достигает максимальных значений ближе к середине трубной заготовки (5%), затем в зависимости от скорости точки контакта происходит установление значения относительного сужения в пределах 4-5%.

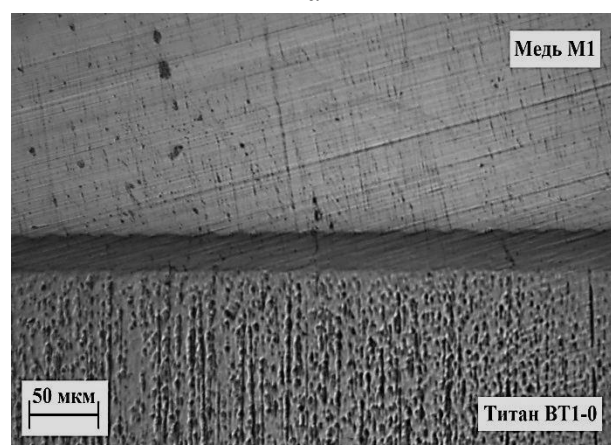
4. Овальность биметаллических трубных заготовок, полученных при использовании твердо-жидкого наполнителя составила 0,1-0,3%.

Разработка режимов сварки взрывом и технологической схемы сборки медно-титановых стержней велась с учетом требований к крупносерийному круглогодичному производству. Защиту наружной поверхности титановой трубы осуществляли с помощью нанесения термоусадочной трубки. Сварка взрывом осуществлялась на трёх режимах, при

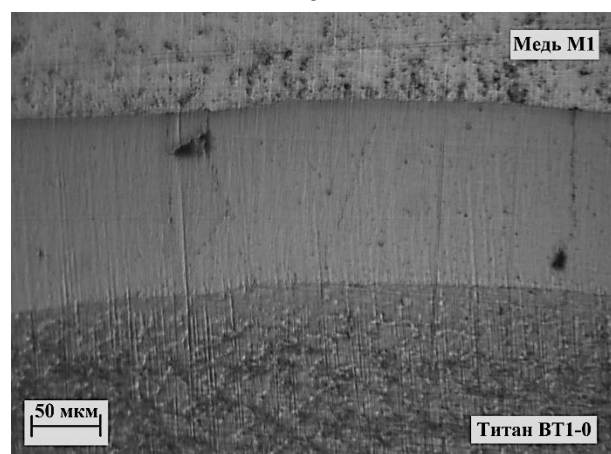
После правки из биметаллических стержней отбирались образцы из начала (100 мм от точки начала соударения) и конца (100 мм от конца стержня) для металлографических исследований.



а



б



в

Рисунок 9 – Граница соединения в медно-титановых стержнях, полученных сваркой взрывом

Проведенный металлографический анализ границы соединения (рисунок 9) позволил выявить следующие особенности околошовной зоны в медно-титановых стержнях:

1. На начальных участках (100 мм от начала) граница соединения меди М1 и титана VT1-0 в образцах, полученных на трёх разных режимах представляет собой практически плоскую линию без наличия литых включений (рисунок 9, а).

2. На границе соединения в конечных участках (100 мм от конца заготовки) были обнаружены сплошные прослойки интерметаллида различной толщины (рисунок 9, б). Максимальная толщина прослойки (до 300 мкм) наблюдается при использовании скорости точки контакта 3500 м/с и располагается по одной образующей микрошлифа (рисунок 9, в).

Проведенные механические испытания на срез плакирующего слоя образцов, вырезанных из медно-титановых стержней показали, что при 100%-ой сплошности (по результатам УЗК) предел прочности на срез составил 190-200 МПа, а при 50%-ой сплошности 100-115 МПа.

В рамках диссертационной работы были проведены замеры падения напряжения в биметаллических стержнях с различной сплошностью слоев на стенде АО «Башкирская содовая компания» (таблица 3) при рабочем токе 500А и напряжении 5В для определения влияния локальных непроваров и интерметаллидной прослойки в биметаллических медно-титановых цилиндрических токопроводах на падение напряжения. Результаты показали, что покрытие из титана при различной сплошности соединения практически не влияет на падение напряжения в токопроводе и в первую очередь зависит от сопротивления меди.

Таблица 3 – Расчётное падение напряжения по длине в медном стержне

Расстояние, мм	Падение напряжения U , мВ					
	Расчётные значения		100% сплошность слоев		50% сплошность слоев	
	медь	титан	медь	титан	медь	титан
200	9	100	9,9	10,6	9,4	10,4
400	18	200	18,4	18,5	18,8	18,2
600	27	300	25,2	25,3	25,4	25,5
800	36	400	36,9	36,9	32,5	32,4
1000	45	500	48,7	48,9	42,9	42,9
1200	54	600	58,7	58,8	53,2	53,3
1400	63	700	66,4	6,2	62,1	61,9

Для исследования особенностей распределения продольных остаточных деформаций титановой трубы по длине биметаллического стержня и определения влияния скорости детонации взрывчатого вещества на относительное удлинение была использована методика реперных точек, которые наносились на поверхность титановой трубы перед сваркой взрывом.

По результатам замеров были построены графики зависимости относительного удлинения двухслойных стержней от скорости детонации (рисунок 10).

На графике видно, что с увеличением скорости детонации взрывчатого вещества удлинение стержня снижается, а на режиме 3500 м/с – практически отсутствует, что связано с высокой скоростью прохождения волны сжатия по титановой трубе. Использование откольного элемента позволило значительно сократить относительное удлинение за счёт перевода части волн сжатия в тело откольника.

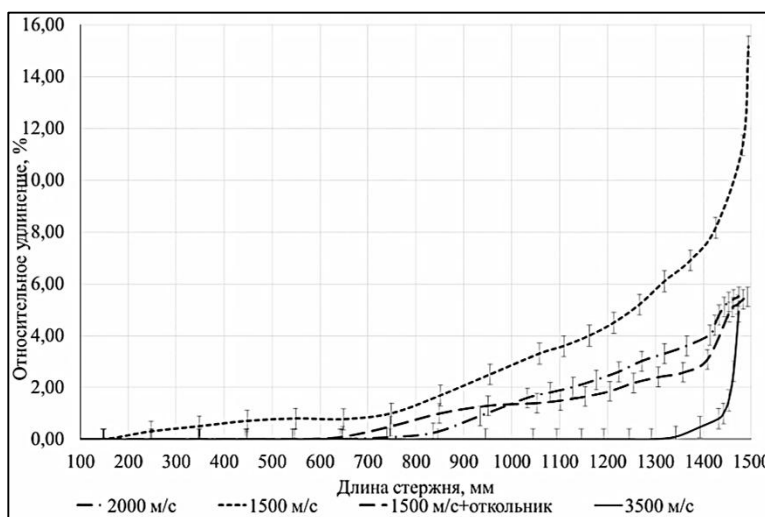


Рисунок 10 – Графики зависимости относительного удлинения по длине двухслойного стержня от скорости детонации

Таким образом, на основе проведенных исследований особенностей сварки взрывом длинномерных двухслойных цилиндрических изделий

были разработаны технологические основы производства сваркой взрывом коррозионностойких насосно-компрессорных труб и медно-титановых токоподводов, обеспечивающие сплошность, прочность соединения и уровень деформаций в заданных параметрах.

Пятая глава направлена на разработку опытных технологий изготовления двухслойных трубных заготовок для насосно-компрессорных труб различной длины и промышленной технологии производства стержней титан+медь для токоподводов.

Разработка двухстадийной технологии с применением сварки взрывом и холодной прокатки для получения биметаллических труб с выпуском опытной партии

На основе результатов исследований разработана комплексная технология получения двухслойных материалов трубчатой формы, сочетающая сварку и прокатку. Для фиксирования зазора между трубами были изготовлены специальные стальные крышки с проточенным по диаметру под размер зазора пазом высотой 10 мм. Нижняя крышка вваривалась во внутреннюю трубу из стали 08X18N10T плотным герметичным швом аргонодуговой сваркой. На полигоне

засыпался твердо-жидкий наполнитель и устанавливался заряд взрывчатого вещества. После укладывалась забойка из песка и проводился подрыв зарядов. После взрыва заготовка проходила ультразвуковой контроль на сплошность соединения. В результате экспериментальной работы была получена опытно-промышленная партия трубных заготовок (12 штук) для насосно-компрессорных труб длиной 1000 и 2400 мм, превышающей 30 диаметров (рисунок 11).

После термической обработки проводилась холодная прокатка на АО «ПНТЗ» (г. Первоуральск) на стане холодной прокатки труб в два этапа: после первого этапа трубы имеют наружный диаметр 88 мм с толщиной стенки 11 мм, а после второго – чистовой размер 73×7 мм.



а



б

Рисунок 11 – Партия биметаллических труб 37Г2Ф+08Х18Н10Т:
а – длина заготовок до 1 метра;
б – длина заготовок до 2,4 метра

Готовые трубы подвергались контролю сплошности соединения слоев труб методом ультразвуковой дефектоскопии. После второго этапа прокатки трубные заготовки проходили механические испытания и испытания на коррозионную стойкость. По полученным характеристикам механических свойств биметаллическая труба была отнесена к группе К по ГОСТ 633-80. Результаты комплексных коррозионных испытаний показали, что плакирующий слой готовых биметаллических труб является стойким против межкристаллитной и питтинговой коррозии. Плакирующий слой двухслойной трубы имеет стойкость против общей коррозии не ниже стойкости стали 08Х18Н10Т при испытании в CO_2 и H_2S – содержащих средах.

Разработка и освоение промышленной технологии производства двухслойных стержней для токоподводов

На основании исследования особенностей удлинения титановой трубы в процессе сварки взрывом, металлографических исследований, механических испытаний и эксплуатационных испытаний на экспериментальном стенде для определения влияния сплошности соединения на характеристики падения напряжения были разработаны промышленная технология получения сваркой взрывом длинномерных медно-титановых стержней и технические условия «ТУ 18827-002-21414987-2016. Прутки биметаллический титан+медь, изготовленный сваркой взрывом».

После входного контроля медных стержней, титановых и пластиковых труб (используются для опалубки под взрывчатое вещество) осуществляется обрезка исходных материалов под размер сборки. Поверхности обезжириваются и происходит сборка, а затем на собранные стержни наносится термоусадочная трубка с помощью специального цилиндрического нагревателя. После сборки стержни доставляются на взрывную площадку. Далее осуществляется монтаж собранных пакетов (рисунок 12, а) и подрыв. Полученные двухслойные стержни после сварки проходят ультразвуковой контроль правку. Затем производится обрезка в чистовой размер и отгрузка заказчику (рисунок 12, б). На предприятиях-изготовителях АО «Тамбовское опытно-конструкторское технологическое бюро» и АО «Башкирская содовая компания» из полученных сваркой взрывом стержней собирают титановые коррозионностойкие анодные ячейки с металлооксидным активным покрытием на основе диоксида иридия (рисунок 12, в).

В настоящее время анодные ячейки, оснащенные цилиндрическими токоподводами титан+медь производства ООО «Битруб», успешно работают на АО «Кольская ГМК». За 2016 год ООО «Битруб» было произведено 1000 биметаллических медно-титановых стержней, за 2017 – 25000 шт., за 2018 – 8500 биметаллических стержней и штанг.



Рисунок 12 – Результаты освоения промышленной технологии получения сваркой взрывом медно-титановых токоподводов: а – собранные пакеты на взрывной площадке; б – партия готовых стержней; в – собранные анодные ячейки

Результаты анализа статистического распределения показали, что 96% изготовленных двухслойных стержней удовлетворяют требованиям по сплошности соединения, следовательно, разработанная технология обеспечивает заданный уровень качества продукции.

Выводы по работе:

1. Экспериментально установлено, что для обеспечения бездефектной границы соединения и прочности сцепления слоев на уровне 250-300 МПа для ниобиевого сплава и 950-1000 МПа для никель-кобальтового сплава с высокопрочной сталью, необходимо в 3-7 раз увеличить удельную кинетическую энергию метаемого элемента из жаропрочного сплава по сравнению со сваркой взрывом материалов с сочетанием слоев углеродистая сталь+ аустенитная сталь.

2. На основе результатов металлографических исследований было выявлено, что при близких режимах сварки взрывом в цилиндрических изделиях количество литых включений значительно увеличено по сравнению с плоскими образцами вплоть до появления сплошной прослойки литых включений на границе соединения Н65В2МЦ+ОХН3М. Одной из причин их увеличения является влияние на свариваемые поверхности ударно-сжатого газа, движущегося с гиперзвуковой (свыше 5М) в сварочном зазоре при отсутствии его бокового истечения.

3. Механические испытания на сплющивание биметаллических кольцевых образцов показали, что получены качественные двухслойные изделия с сочетанием слоев ЭК102+ОХН3М. Для пары материалов сталь ОХН3М и ниобиевый сплав Н65В2МЦ необходима корректировка режимов в сторону уменьшения скорости детонации, что позволит не допустить появления сплошных прослоек расплавов.

4. Сравнительный анализ результатов расчетов глубины проплавления и металлографических исследований зоны соединения слоёв сталь 20+титан ПТ7-М показал, что применение в сварочном зазоре атмосферы разреженного аргона позволит сформировать в

трубных заготовках соединения с минимальным количеством литых включений, вследствие снижения термодинамических параметров (температуры) ударно-сжатого газа в сварочном зазоре, и исключения возгорания титана в зазоре.

5. Установлено влияние свойств опорного наполнителя и неравномерности сварочного зазора на процесс формирования соединения, его структуру и деформацию трубной заготовки в процессе сварки взрывом и показано:

- в конечных участках биметаллических трубных заготовок наблюдается неравномерность распределения расплавов по толщине, что указывает на прохождение в сварочном зазоре перед точкой контакта турбулентных течений ударно-сжатого газа, как в осевом так в радиальных направлениях;

- усредненная толщина расплавов на границе соединения в конечных участках биметаллических трубных образцов, полученных по схеме сварки взрывом с применением дисперсного твердо-жидкого опорного наполнителя колеблется от 20 до 31 мкм, а с применением стального стержня с изолирующим слоем из NaCl находится в пределах от 20 до 270 мкм; что в среднем в 4 раза больше, чем с использованием твердо-жидкого опорного наполнителя;

- относительное сужение наружной трубы при использовании стального стержня находится в пределах 3-4%, а при использовании дисперсного твердо-жидкого наполнителя 4-5%, овальность на всех образцах не превышает 0,3%.

6. Экспериментально подтверждено, что для получения сваркой взрывом качественных цилиндрических изделий по «обратной» схеме необходимо обеспечить за счет применения дисперсного твердо-жидкого наполнителя «беспрепятственное» прохождение границы раздела между плакирующей трубой и наполнителем ударной волны, которая вследствие близости акустических сопротивлений трубы и наполнителя испытывает «диссипацию (поглощение) энергии».

7. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований структуры и свойств опытных образцов разработаны технологические основы производства сваркой взрывом длиномерных биметаллических материалов цилиндрической формы и изготовлена опытно-промышленная партия трубных заготовок длиной до 2400 мм.

8. Экспериментально установлена методом реперных точек зависимость удлинения наружной титановой трубы от скорости детонации взрывчатого вещества. Показано, что с увеличением скорости детонации взрывчатого вещества удлинение титановой трубы снижается в процессе сварки взрывом, а на режиме 3500 м/с удлинение полностью отсутствует. Однако, рост скорости детонации приводит к образованию сплошных прослоек интерметаллида типа TiCu толщиной от 200 до 500 мкм, что заметно снижает прочностные и эксплуатационные свойства готового изделия.

9. Разработана методика исследования падения напряжения по длине биметаллического медно-титанового токоподвода на опытном стенде АО «Башкирская содовая компания, имитирующий условия эксплуатации в электролизной ванне.

10. Установлено, что наличие локальных непроваров и интерметаллидной прослойки между титановой трубой и медным стержнем не оказывает заметного влияния на падение напряжения по длине биметаллических токоподводов медь М1+титан ВТ1-0. При сплошности соединения равной 50% от общей площади контакта сваренных поверхностей падение напряжения на биметаллическом стержне соответствует падению на монометаллическом стержне из меди М1.

11. По разработанной технологической схеме сварка взрывом+холодная прокатка, были изготовлены образцы холоднодеформированных биметаллических труб с удовлетворительным

качеством поверхности, геометрическими параметрами и высокой коррозионной стойкостью. По показателям прочностных характеристик биметаллические трубы 37Г2Ф+08Х18Н10Т соответствуют группе К по ГОСТ 633-80.

12. На предприятии ООО «Битруб» (г. Красноармейск) была освоена и используется импортозамещающая технология сварки взрывом длинномерных цилиндрических изделий для промышленного производства сваркой взрывом медно-титановых стержней длиной 1500 мм и диаметрами 20 и 32 мм. Разработаны технические условия «ТУ18827-002-21414987-2016. Пруток биметаллический титан+медь, изготовленный сваркой взрывом». Биметаллические стержни поставлены на предприятия АО «Тамбовское опытно-конструкторское технологическое бюро» и АО «Башкирская содовая компания», которые использовали их для оснащения анодных ячеек ванн электролизеров никеля. В настоящее время анодные ячейки, оснащенные цилиндрическими токоподводами успешно работают на АО «Кольская ГМК».

Публикации по теме работы:

1. **Malakhov, A.Yu.** Application of the internal protective layer from stainless steel to the surface of long-length pipes with an explosive welding / A.Yu. Malakhov and I V Saikov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1115 (2018) 042052, DOI: 10.1088/1742-6596/1115/4/042052

2. Курилкин, В.В. Исследование структуры границы соединения в биметалле сталь 08Х18Н10Т+ванадий ВнПл-1+титан ВТ1-0 при воздействии энергии взрыва / В.В. Курилкин, И.В. Сайков, **А.Ю. Малахов**, А.С. Щукин, А.А. Бердыченко // Технология машиностроения. – 2018. – № 10. – С.11-15, DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1289-1291

3. **Малахов, А.Ю.** Разработка экспериментальных схем взрывного плакирования длинномерных трубных заготовок / А.Ю. Малахов и др. // Перспективные материалы. – 2017. – № 12. – С. 59-65.

Malakhov, A. Yu. Reverse Schemes of Explosive Cladding of Long-Length Pipe Billets / A.Yu. Malakhov, I. V. Saikov, P. A. Nikolaenko, I. V. Denisov and L. V. Pervukhin // Inorganic Materials: Applied Research, 2018, Vol. 9, No. 2, PP. 347–350, DOI: 10.1134/S207511331802020X.

4. **Малахов, А.Ю.** исследование влияния режимов сварки взрывом на линейную деформацию титановой трубы в биметаллическом стержне Ti+Cu / А.Ю. Малахов, И.В. Сайков, П.А. Николаенко // Приложение к журналу. Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2018. – Т. 23. – № 123. – С. 445-447.

5. **Малахов, А.Ю.** Получение двухслойных трубных заготовок «сталь + коррозионностойкая сталь» сваркой взрывом / А.Ю. Малахов и И.В. Сайков // Ползуновский вестник. – 2017. – № 4. – С. 197-201.

6. Сайков, И.В. Получение термобиметалла латунь-инвар сваркой взрывом с последующей прокаткой / И.В. Сайков, И.В. Денисов, **А.Ю. Малахов** и др. // Сварочное производство. – 2016. – № 10. – С. 38-41.

7. **Малахов, А.Ю.** Исследование влияния сплошности соединения на эксплуатационные свойства медно-титанового токоподвода, полученного сваркой взрывом / А.Ю. Малахов и др. // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21. – № 3. – С. 1136-1138, DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1136-1138.

8. **Малахов, А.Ю.** Особенности сварки взрывом труб по «обратной схеме» / А.Ю. Малахов, И.В. Сайков, Л.Б. Первухин // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21. – № 3. – С. 1139-1141, DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1139-1141.

9. Сайков, И.В. Применение барьерного слоя из ванадия в биметалле сталь-титан / И.В. Сайков, А.Ю. Малахов, И.Н. Нурсаинов, В.С. Челноков // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21. – № 3. – С. 1289-1291, DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1289-1291.

10. Малахов, А.Ю. Получение сваркой взрывом биметаллических трубных заготовок с внутренним жаропрочным слоем из никель-кобальтового сплава ЭК102 / А.Ю. Малахов, И.В. Сайков, О.Л. Первухина // Письма о материалах. – 2016. – Т. 6. – № 4 (24). – С. 276-280.

Malakhov, A.Yu. Obtaining of bimetallic pipe billets with internal layer of heat-resistant nickel-cobalt alloy EK102 by explosive welding / A.Yu. Malakhov, I.V. Saikov and O.L. Pervukhina // Letters on materials, 2016, 6(4) PP. 276-280, DOI: 10.22226/2410-3535-2016-4-276-280

11. Малахов, А.Ю. Плакирование взрывом внутренней части стальной трубы жаропрочным ниобиевым сплавом / А.Ю. Малахов, Л.Б. Первухин, И.В. Сайков и О.Л. Первухина. // Перспективные материалы. – 2015. – №10. – С. 80-84.

Malakhov, A.Yu. Explosive cladding of the inner side of a steel tube with a heat-resistant niobium alloy / A.Yu. Malakhov, I.V. Saikov, O.L. Pervukhina and L.B. Pervukhin // Inorganic Materials: Applied Research. – 2016. – Т. 7. – № 2. – PP. 300-302, DOI: 10.1134/S2075113316020131.

12. Малахов, А.Ю. Создание сваркой взрывом высокопрочных биметаллических материалов с плакирующим слоем на основе ниобиевых и никель-кобальтовых сплавов / А.Ю. Малахов, Л.Б. Первухин, И.В. Сайков, В.Б. Вихман // Сварочное производство. – 2014.– №10. – С.16-20.

Malakhov, A.Yu. Explosion welding of high-strength bimetallic materials with a cladding layer based on niobium and nickel–cobalt alloys / A.Y. Malakhov, Pervukhin L.B., Saikov I.V., Vikhman V.B. // Welding International. – 2015. – Т. 29. – № 10. – PP. 805-808, DOI: 10.1080/09507116.2014.986887.