

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ СТРУКТУРНОЙ МАКРОКИНЕТИКИ И ПРОБЛЕМ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ им. А.Г. МЕРЖАНОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Малахов Андрей Юрьевич

ПЛАКИРОВАНИЕ ВЗРЫВОМ ДЛИННОМЕРНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ИЗДЕЛИЙ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

05.16.09 – Материаловедение (металлургия)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
к.т.н. Первухина О.Л.

Черноголовка – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. Литературный обзор.....	16
1.1 Производство, области применения и способы изготовления биметаллических труб стержней.....	16
1.2 Сварка взрывом изделий цилиндрической формы.....	23
1.3 Особенности сварки взрывом цветных металлов и сплавов.....	28
1.4 Деформация цилиндрических изделий в процессе сварки взрывом.....	31
1.5 Способы и материалы, применяемые для защиты от коррозионного износа поверхностей цилиндрических изделий.....	34
1.6 Особенности прокатки биметаллических труб.....	39
1.7 Цель и задачи исследования.....	42
Глава 2. Материалы и методики исследований.....	44
2.1 Характеристики используемых материалов.....	44
2.2 Методы исследования.....	46
2.2.1 Разработка общей методики исследований.....	46
2.2.2 Методика определения прочности соединения на срез и на отрыв...	47
2.2.3 Механические испытания на сплющивание	49
2.2.4 Методика измерения продольной и поперечной деформации цилиндрических заготовок.....	50
2.2.5 Методика изготовления шлифов для металлографических исследований.....	51
2.2.6 Метод растровой электронной микроскопии.....	53
2.2.7 Метод оптической микроскопии	53
2.2.8 Метод рентгенофазового анализа	53

2.2.9 Измерение микротвердости.....	54
2.2.10 Ультразвуковой контроль.....	55
2.2.11 Методика измерения падения напряжения по длине биметаллического токоподвода.....	56
Глава 3. Исследование особенностей получения сваркой взрывом двухслойных цилиндрических изделий.....	58
3.1 Особенности сварки взрывом жаропрочных сплавов с высокопрочной сталью по плоскопараллельной схеме плакирования.....	59
3.2 Получение сваркой взрывом опытных биметаллических трубных заготовок с внутренним жаропрочным слоем.....	67
3.3 Исследование влияния состава газа в сварочном зазоре на процесс на образования соединения при сварке взрывом модельных трубных заготовок сталь 20+титан ПТ-7М.....	76
3.4 Выводы к Главе 3.....	87
Глава 4. Разработка технологических основ производства сваркой взрывом двухслойных длинномерных цилиндрических изделий.....	90
4.1 Разработка экспериментальных схем сварки взрывом и исследование особенностей образования соединения в длинномерных цилиндрических образцах	90
4.2 Особенности получения сваркой взрывом биметаллических медно- титановых стержней.....	109
4.3 Выводы к Главе 4.....	120
Глава 5. Разработка опытных технологий изготовления двухслойных трубных изделий и промышленной технологии производства стержней титан+медь для токоподводов.....	123

5.1 Разработка двухстадийной технологии «сварка взрывом + прокатка» для получения биметаллических труб с выпуском опытной партии.....	123
5.2 Разработка и освоение промышленной технологии производства двухслойных стержней для токоподводов.....	131
5.3 Выводы к Главе 5.....	141
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....	143
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	147
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	159

ВВЕДЕНИЕ

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. Прутки 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 08Х18Н10Т 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 08Х18Н10Т 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 «Молодёжные научно-инновационные проекты Московской области», г. Жуковский, 2015 г; Ежегодная научная конференция ИСМАН, 2017; Международная конференция «CBC-50», приуроченная к 50-летию 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.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю к.т.н. Первухиной Ольге Леонидовне, искреннюю признательность профессору, д.т.н. Первухину Леониду Борисовичу, а также к.т.н. Сайкову Ивану Владимировичу, к.т.н. Денисову Игорю Владимировичу, к.т.н. Николаенко Павлу Анатолиевичу и д.ф.-м.н. Буравовой С.Н. за неоценимую помощь при выполнении работы.

Автор выражает глубокую благодарность генеральному директору ООО «Битруб» г. Красноармейск Шишкину Тимофею Андреевичу за обеспечение

подготовки и проведении экспериментов, а также организацию промышленного производства двухслойных медно-титановых стержней.

Глава 1. Литературный обзор

1.1 Производство, области применения и способы изготовления биметаллических труб и стержней

В биметаллическом материале сочетаются свойства, которые невозможно получить в отдельно взятом металле или сплаве. В металлургической промышленности используются различные методы создания такой металлопродукции. Существует четыре основных способа изготовления биметаллов: наплавка, сварка взрывом, литье и обработка давлением, которая включает в себя некоторые способы волочения, прессования, и прокатку.

Практически начало промышленного производства биметалла относится к концу XIX – началу XX вв. В 1860-х годах в США были изготовлены сталемедные провода, применявшиеся вместо медных в слаботочных телефонных, телеграфных, сигнальных и других сетях. В 1885 г. такие провода были получены во Франции, а в 1890 г. – в Германии. Способ получения такой проволоки заключался в предварительной очистке стального сердечника, погружении его в расплав меди для нанесения на него тонкого слоя меди и затем установки такой заготовки в изложницу и заливки сердечника жидкой медью. В дальнейшем биметаллическую заготовку прокатывали в калибрах и волочили до получения проволоки нужного диаметра [1].

Первое специализированное предприятие «Биметалл» было основано в 1890 г. во Франции. В начале XX века биметаллические материалы начали производиться в США и Германии. Массовое производство биметаллов в СССР относится к началу 30-х годов XX века, когда на Кольчугинском заводе было освоено производство биметаллической проволоки сталь+медь. Исходной заготовкой являлись биметаллические стержни, полученные путем заливки меди на омедненные и нагретые до температуры 900-950°C стальные стержни. Затем заготовку подвергали прокатке и волочению [2]. Одновременно была разработана технология получения свертопаянных труб из холоднокатаной низкоуглеродистой стальной ленты, покрытой гальваническим способом с обеих

сторон слоем меди. В 1946 году в СССР была разработана технология получения биметаллических труб из стали 10, 20, 12ХН3А и Х6СЮ (сикромаль-8) с внутренней плакировкой марганцовистой медью, медью МЗр, нержавеющей сталью, никелем и другими металлами. Для получения данных материалов использовались следующие технологические схемы: прессование-холодная прокатка и волочение; прокатка на непрерывном стане-холодная прокатка и волочение; прокатка на пилигримовом стане [3].

В 1963 г. на Алчевском металлургическом комбинате был введен в строй цех по изготовлению биметаллических пакетов, прокатку которых осуществляли на существующем стане 2800. Этим было положено начало промышленного выпуска коррозионностойкого биметалла пакетным способом, который был усовершенствован в середине 90-х годов в ОАО «Ижорские заводы» [4].

В настоящее время в промышленно развитых странах мира около 80% плакированных листов получают горячей прокаткой вакуумированных пакетов. Именно по этой технологии изготавливается основная масса плакированных листов в Австрии (фирма Voest Alpine), Японии (фирма NKK), Германии (фирмы Preussage Stahl- и Dillinger Hutte), Англии, США, Франции, Швеции [5].

Сегодня в России для производства коррозионностойкого биметаллического проката используются три основные технологии. Это, в первую очередь, электродуговая и электрошлаковая наплавка, пакетная прокатка с вакуумированием пакетов и сварка взрывом на полигонах Подмосковья, Волгоградской области и Уральском регионе [1].

По функциональным признакам все производимые в настоящее время слоистые композиты подразделяются на следующие виды: коррозионностойкие, антифрикционные, электротехнические (проводниковые и контактные), инструментальные, износостойкие, термобиметаллы, биметаллы для глубокой вытяжки и бытовых изделий.

Применение коррозионностойких слоистых композитов характеризуется высокой эффективностью и экономичностью: значительно сокращается расход легирующих элементов, снижается стоимость машин и механизмов, повышается

ресурс их работы. Из этих материалов изготавливаются детали и конструкции, работающие в условиях низких и высоких температур и давлений, при воздействии различных агрессивных сред.

Монометаллические трубы и втулки в химической, нефтяной, горнодобывающей и металлургической промышленности, в судостроении и других областях техники не удовлетворяют современным требованиям, так как имеют недостаточный ресурс работы в экстремальных условиях, поэтому все большее применение находят биметаллические изделия.

Применяемые в промышленности способы производства биметаллических труб и прутков могут быть классифицированы в зависимости от метода получения соединения слоев следующим образом [2]:

1. Металлургические способы, основанные на получении сварки при взаимодействии расплава металла с твердым компонентом (центробежное литье, наплавка).

2. Термомеханические способы (прокатка, прессование, волочение и др.), основанные на получении сварки в процессе макропластической деформации металлов в твердом состоянии.

3. Термодиффузионные способы, основанные на сварке в твердом состоянии при малых пластических деформациях (термодиффузионная сварка).

4. Физико-химические и термомеханические способы, заключающиеся в нанесении покрытий из окружающей среды на металл (электрохимические напыления в вакууме, высаживания из металлических расплавов).

5. Способы, использующие импульсные нагрузки, основанные на высокоскоростном соударении твердых металлов (сварка взрывом).

Способом центробежного литья получают товарные и передельные биметаллические трубы. Данным способом, можно получать трубы диаметром от 250 до 960 мм с толщиной стенки равной 15-50 мм [2]. При этом плакирующий слой составляет 20-30% от общей толщины. Способом центробежного литья обеспечивается надежное сцепление слоев, однако среди недостатков следует отметить необходимость механической обработки поверхности труб и

образование вследствие этого разностенности обоих слоев. В процессе изготовления возникают трудности, связанные с точной дозировкой слоев. Также данным методом нельзя получить биметаллические трубы с наружным легкоплавким слоем [6, 7].

Производство биметаллических труб прессованием широко распространено в цветной металлургии, и оно является основным методом изготовления труб из цветных металлов и сплавов. В основе этого способа лежит совместное истечение металлов, составляющих многослойную заготовку. Действие высоких удельных давлений, температуры и непрерывное интенсивное обновление поверхностей контактирующих металлов вследствие больших пластических деформаций создают благоприятные условия для образования металлических связей [2].

Схемы технологических процессов прессования биметаллических и монометаллических труб практически аналогичны. В основном, для прессования труб применяют вертикальные и горизонтальные трубные прессы. Однако при деформации биметаллических заготовок имеются некоторые характерные особенности, в результате которых возникают специфические проблемы и ограничения, не характерные для прессования монометаллических труб. Например, на передних концах труб может возникать продольная разнотолщинность и расслоения составляющих биметаллической трубы, вследствие преимущественного истечения одного из компонентов биметаллической пары на начальной стадии прессования [8].

Широкое применение, наряду с прессованием, получил такой термомеханический способ получения биметаллических труб, как прокатка.

Прокатку на непрерывном стане используют для получения передельных труб из углеродистых и легированных сталей, плакированных медью, никелем, нержавеющей сталью и т.д. Исходными являются биметаллические сплошные цилиндрические заготовки, полученные прессованием, наплавкой или литьем. При изготовлении бесшовных биметаллических труб основной операцией является прошивка биметаллической сплошной заготовки, т.е. получение пустотелой гильзы. Её изготовление является очень ответственной операцией, от

которой зависит качество готовых изделий. Преимуществом прокатки на непрерывном стане является кратковременность процесса и высокая производительность стана [2]. К основным недостаткам способа следует отнести пониженное качество внутренней поверхности труб и значительную (до 50%) продольную и поперечную разностенность плакирующего слоя.

Прокатку на пилигримовом стане в горячем, теплом и холодном состоянии применяют для изготовления как товарных, так и передельных биметаллических труб диаметром 20-550 мм. При этом используют двухслойные или центробежнолитые биметаллические заготовки. Указанный способ применяется для производства биметаллических труб, слои которых имеют близкую пластичность или близкий коэффициент объемного расширения при высоких температурах. Основным недостатком пилигримовой прокатки является относительно низкое по сравнению с непрерывными станами качество выпускаемых труб и образование «закатов» при чрезмерных подачах. Применение максимальных подач при прокатке труб обусловлено энергетикой стана – быстро прокатанная труба теряет меньше тепла [9].

При производстве биметаллических труб также применяется термодиффузионная сварка, сущность которой заключается в сварке находящихся в контакте ювенильных поверхностей при их нагреве до температур интенсивного протекания диффузионных процессов. Сварка происходит под действием давлений, возникающих при соответствующей разнице коэффициентов линейного расширения слоев. Этим способом изготавливают передельные и товарные трубы из углеродистых, легированных и нержавеющей сталей, плакированных внутри медью, оловянофосфористой бронзой, низкоуглеродистой сталью, ниобием, а также тугоплавкими металлами. Исходной заготовкой являются монометаллические трубы из металла каждого слоя [2]. Наиболее перспективным методом термодиффузионной сварки является сварка при помощи раздачи парогазовыми смесями. В этом случае трубу с плакирующим слоем меньшего диаметра вставляют в основную трубу и прокатывают вместе волочением. Затем полученный полуфабрикат разогревается в печи, герметично закрывается и во

внутреннюю полость подают воздух и горючее. В результате повышенного давления при сгорании топлива происходит совместная пластическая деформация двух слоев. Преимуществом процесса является высокая прочность сварки при минимальной ширине диффузионного слоя, простой переход от размера к размеру, широкие возможности управления качеством. Главными недостатками данного способа являются: высокие затраты электроэнергии, сложность технологии, большая продолжительность процесса. Все перечисленные недостатки ведут к низкой производительности способа.

Перспективным является метод газодетонационной футеровки двухслойных труб [10]. Он используется в основном для создания длинномерных двухслойных труб (с соотношением длины к диаметру $L/D > 40$) с сочетанием слоев сталь+алюминиевый сплав. В результате газодетонационной футеровки получают готовые двухслойные трубы с внутренним слоем из алюминиевого сплава, которые применяются в авиационных конструкциях различного назначения и космических аппаратах.

Способ изготовления биметаллических труб путем электролитического осаждения металла плакирующего слоя на основной получил ограниченное применение. Основные недостатки этого способа заключаются в необходимости тщательной подготовки поверхности, обязательной дополнительной термической обработки металлических поверхностей после нанесения на них покрытия. Получить достаточно толстые беспористые покрытия на трубах большой длины [2] представляет определенные трудности.

Производство биметаллических труб с наружным покрытием проводится более традиционными способами: газотермическим и плазменным напылением, электродуговой наплавкой.

Одним из самых распространенных методов получения двухслойного проката является вертикальная и наклонная электрошлаковая наплавка (далее ЭШН). Бесшовные биметаллические коррозионностойкие трубы могут быть изготовлены из биметаллических заготовок сплошного сечения, полностью соответствующих требованиям к готовой трубе по химическому составу слоев,

соотношению толщин или масс слоев, по уровню загрязненности примесями, качеству поверхности. Биметаллическую заготовку сплошного сечения получают путем наплавления внутренней полости пустотелой гильзы методом вертикальной ЭШН. Труба получается из биметаллической заготовки путем прошивки центрального отверстия. Преимуществом данного способа является то, что он не требует специально сконструированных для наплавки установок и осуществим на серийных электрошлаковых печах, поверхность основного слоя подплавляется только теплом жидкой шлаковой ванны, при этом наплавленный слой формируется с неизменной по высоте и сечению толщиной. При этом, в качестве недостатка стоит отметить, что данным способом нельзя получать биметалл с малой толщиной плакирующего слоя (менее 15-20% от общей толщины заготовки). При наплавке металлов, возможны образования в зоне сварного шва нестабильных структур, что требует дальнейшей термообработки для получения необходимых свойств [11].

Важно отметить, что соединения таких материалов, как сталь-алюминий, сталь-жаропрочный сплав, сталь-титан, либо невозможно получить вышеперечисленными способами, либо прочность слоев и качество связи металлов на контактной поверхности оказываются на низком уровне. Образованием хрупких соединений, которые возникают при повышенных температурах в процессе твердофазной реакции, являются причиной недостаточной адгезионной связи на границе контакта. Образование трещин и пор, вследствие большой разницы в температурах плавления и механических свойствах составляющих слоев биметалла, является проблемой, без решения которой невозможно получить качественный материал. Поэтому вопрос о совершенствовании существующих способов получения биметаллических труб является актуальным, требующим создания новой перспективной технологии, позволяющей использовать энергию взрывчатых веществ для создания как готовых, так и переделных биметаллических труб, удовлетворяющих требованиям сегодняшнего дня.

1.2 Сварка взрывом изделий цилиндрической формы

Сварка взрывом – процесс получения прочного соединения двух или нескольких металлических тел, происходящий при их соударении. Ускорение соударяющихся тел до необходимой скорости осуществляется, как правило, под действием энергии взрыва, выделяющейся при детонации взрывчатых веществ (далее ВВ). Сварку взрывом используют для изготовления многослойных (чаще всего биметаллических) листов, полос, цилиндрических изделий, композиционных материалов волокнистого строения из разнообразных металлов и сплавов, в том числе из тех, сварка которых другими способами затруднена [12, 13].

В настоящее время накоплен большой экспериментальный и теоретический материал по вопросу формирования соединения при сварке взрывом, который обобщен в работах [12-15]. Физические явления, сопутствующие сварке взрывом, структура и свойства соединений в значительной степени зависят от основных параметров сварки, которые классифицируют на кинематические (скорость движения точки контакта V_k , угол соударения γ , скорость метания пластины v_0) и физические (давление, длительность соударения, температура в зоне соударения). Основные параметры определяют начальные (технологические) параметры процесса: скорость детонации D , безразмерный параметр r (отношение массы заряда взрывчатого вещества к массе метаемой пластины), сварочный зазор h , микрорельеф свариваемых поверхностей, температура свариваемых поверхностей [15].

Выдвинут ряд гипотез, объясняющих образование соединения с различных точек зрения [16-23]. Точного механизма, описывающего процесс образования соединения при сварке взрывом, еще нет. Высокие скорости пластической деформации, давления, большой градиент температур в узкой зоне, отсутствие данных по изменению свойств в таких экстремальных условиях не позволяют однозначно оценить роль в образовании соединения того или иного параметра.

Для сварки взрывом характерна локализация в узкой зоне пластической деформации и протекание процессов рекристаллизации и оплавления

свариваемых поверхностей [24-32]. При сварке взрывом используют взрывчатые вещества со скоростью детонации в зависимости от толщины заряда от 1500 до 4000 м/с [33, 34].

Сваркой взрывом можно соединить между собой практически все металлы или сплавы, используемые в промышленности, с высокой прочностью соединения слоев. Как правило, прочность зоны соединения превышает прочность менее прочного металла или сплава. Так получают не только плоские, но и цилиндрические изделия [35-38].

Сваркой взрывом можно получать как сплошные, так и полые биметаллические цилиндрические заготовки. В случае плакировки полого образца, в отличие от сплошного, необходимо предпринимать специальные меры по предотвращению чрезмерной деформации плакируемого компонента [39].

При изготовлении сплошной биметаллической цилиндрической заготовки трубу 2 (рисунок 1.1, *а*) устанавливают с зазором на стержень 1. Внутреннюю поверхность трубы и внешнюю поверхность стержня зачищают механическим способом и обезжиривают. На наружную поверхность трубы помещают заряд ВВ 4. Для центрирования трубы относительно стержня используют специальные элементы 3. В вершине сборки устанавливается детонатор для инициирования ВВ. Детонационная волна приводит в движение стенки наружной трубы, которые при ударе создают высокое давление и обеспечивают плотный контакт между стержнем и наружной трубы. Толщина плакирующей трубы может колебаться в довольно широких пределах (0,5-15,0 мм), диаметр ее теоретически не ограничивается [34]. Сварка взрывом обеспечивает прочное соединение элементов, что позволяет непосредственно использовать стержни в конструкциях, для получения биметаллических проволок, производить их волочение, а для получения труб проводить холодную или горячую деформацию (прокатка, прошивка и т.д.).

Для получения полых цилиндрических биметаллических заготовок используют схемы с наружным (рисунок 1.1, *б*) и внутренним расположением

заряда ВВ (рисунок 1.1, *б* и рисунок 2). При использовании схем, указанных на рисунке 1.1 (*б* и *в*) применяют специальный наполнитель 4(6), который может играть как роль подпорки для внутренней трубы при внешнем воздействии ВВ, так и может применяться в качестве передаточной среды при инициировании внутреннего заряда [39]. При этом для использования данной схемы необходимо применять дополнительную оснастку в виде толстостенной матрицы 2. Пространство между матрицей и наружной трубой заполняют различными защитными материалами. Данная схема является оптимальной для труб с малыми толщинами стенок.

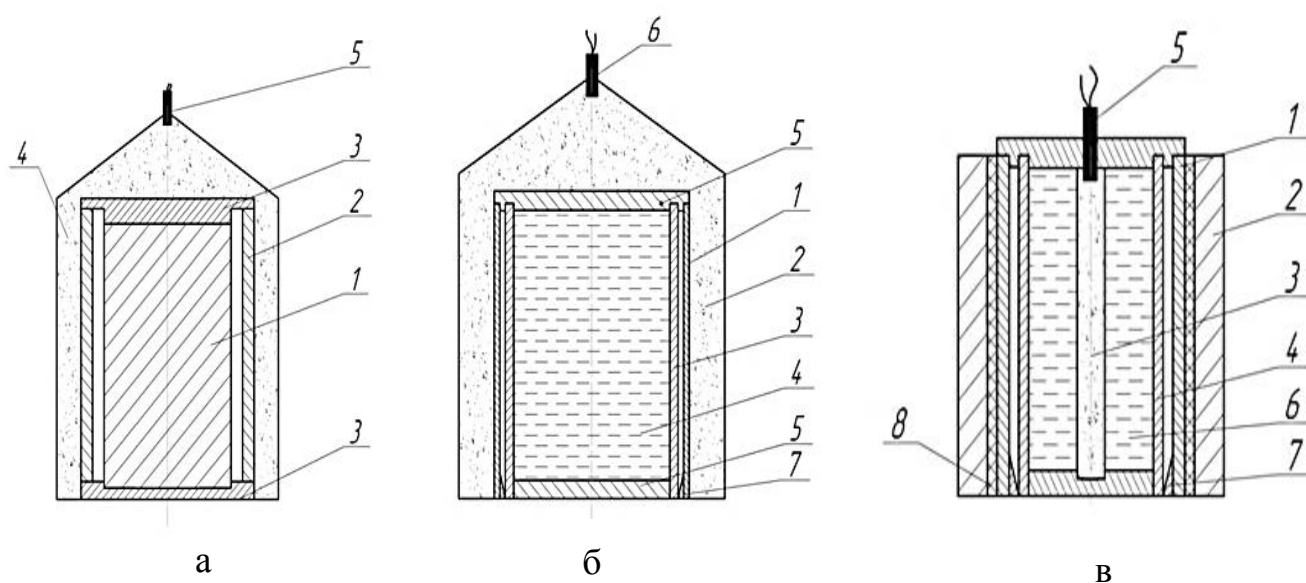


Рисунок 1.1 - Схемы плакирования взрывом труб и стержней: а – плакирование стержня (1 – стержень, 2 – наружная труба, 3 – центровочные крышки, 4 – ВВ, 5 – детонатор); б – плакирование труб наружным зарядом ВВ (1 – наружная труба, 2 – ВВ, 3 – внутренняя труба, 4 – наполнитель, 5 – центровочные крышки, 6 – детонатор, 7 – центровочное кольцо); в – плакирование с использованием передаточной среды (1 – наружная труба, 2 – матрица, 3 – детонационный шнур, 4 – внутренняя труба, 5 – детонатор, 6 – наполнитель, 7 – центровочное кольцо, 8 – демпфирующий слой).

Для получения полых биметаллических труб используют схемы, представленные на рисунке 1.2.

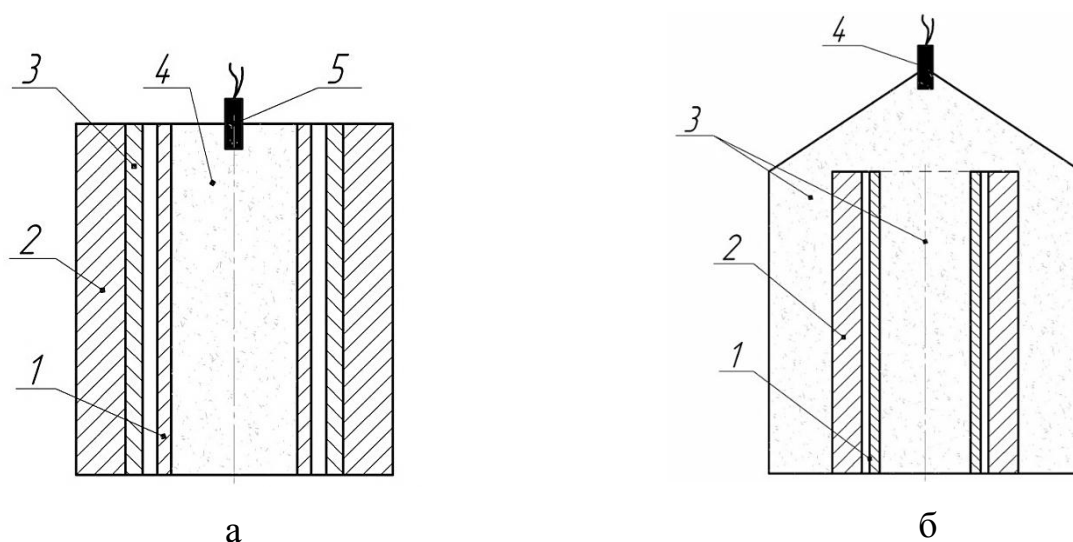


Рисунок 1.2 – Схемы внутреннего плакирования труб: а – плакирование внутренним зарядом ВВ (1 – внутренняя труба, 2 – матрица, 3 – наружная труба, 4 – ВВ, 5 – детонатор); б – плакирование двумя синхронно инициируемыми зарядами ВВ (1 – внутренняя труба, 2 – наружная труба, 3 – ВВ, 4 – детонатор)

Схема внутреннего плакирования взрывом, представленная на рисунке 1.2а применяется, в основном, для плакирования труб небольших размеров. Плакирующая труба 3 с помощью заряда ВВ 4 метается на плакируемую трубу 1.

При малой толщине трубы 1 необходимо применять специальную оправку (матрицу), воспринимающую часть нагрузки от взрыва заряда ВВ [34], с целью уменьшения деформации тонкостенной плакируемой заготовки. Использование матрицы имеет свои недостатки: 1. недолговечность конструкции матрицы (в зависимости от мощности заряда ВВ), 2. сложность извлечения трубы из матрицы после взрыва, 3. дополнительный расход материала на изготовление оправки.

Вместо матрицы при использовании схемы, указанной на рисунке 1.2б можно применять дополнительный заряд, расположенный на наружной поверхности плакируемой трубы. Основная сложность в реализации такой схемы заключается в обеспечении синхронности скоростей детонации внутреннего и внешнего зарядов. При разности скоростей детонации зарядов происходит потеря устойчивости процесса и, как следствие, изменение исходной формы заготовки или даже её разрушение [15].

Применение взрыва для получения биметаллических труб по схемам внутреннего плакирования впервые в СССР было осуществлено в 1961 году, независимо от работ, проводимых в США, относящихся к тому же периоду времени [40].

При плакировании длинномерных заготовок возникает проблема, которая заключается в снижении качества соединения материалов по мере удаления точки контакта от места инициирования [39-42]. На расстоянии около 10 диаметров трубы и более от точки инициирования детонации происходит снижение механических свойств сварного соединения и даже разрушения плакирующего слоя [41]. Зона неустойчивости сварки наблюдается как при плакировании сплошной заготовки, так и при получении полый биметаллической трубы. До конца причины потери устойчивости процесса сварки взрывом не ясны. В работе [39] высказано предположение, что область неустойчивости сварки вызывается возникновением кумулятивной струи, оплавливающей свариваемые поверхности и в ряде случаев вызывающий пробой плакирующей трубы. В работе [41] говорится, что в области потери устойчивости увеличивается размер вихревых зон («карманов») вплоть до образования сплошной прослойки оплавленного металла, при этом авторы считают причину возникновения неустойчивости комплексной, с воздействием нескольких факторов одновременно, основным из которых является так называемый «канальный эффект». «Канальный эффект» – это возникновение в зазоре движущегося со сверхдетонационной скоростью потока кумулятивных выбросов металла и заполняющего зазор газа. В отличие от своего аналога, давно и детально изученного детонационного «канального эффекта», сварочный «канальный эффект» изучен мало [41].

Другими причинами снижения качества соединений материалов могут являться экспериментально установленные несоосность и кривизна свариваемых элементов, неравномерная структура заряда взрывчатого вещества по толщине или плотности, неправильная установка детонатора, сопровождающаяся отклонением фронта распространения детонационной волны от перпендикулярного к оси свариваемых заготовок, что в свою очередь, приводит к

образованию складок на поверхности, а также завихрений и пустот в зоне сварки [2, 43].

Необходимо отметить, что на качество соединения влияет газ, находящийся в зазоре между свариваемыми трубами, который сжимается и движется впереди точки контакт с гиперзвуковой скоростью [44-48].

1.3 Особенности сварки взрывом цветных металлов и сплавов

Общеизвестно широкое применение цветных металлов и сплавов на их основе в различных областях производства. Так, алюминиевые, магниевые и титановые сплавы широко применяются в авиационной промышленности. В то же время изделия из легких сплавов используют в строительстве, транспортном машиностроении, приборостроении, судостроении и других отраслях промышленности. Например, медь благодаря высокой электрической проводимостью широко применяется в электротехнике; она также является основой многих важных промышленных сплавов (например, латуней, бронз и др.) [49].

В практике сварки взрывом получают соединения как из однородных материалов (титан+титан, медь+медь), так и разнородных (медь+титан, алюминий+медь). При сварке взрывом однородных металлов, как правило изучается влияние параметров процесса сварки и термической обработки на качество полученного соединения [15, 50, 51]. Наибольший интерес и широкое применение получили двухслойные материалы, полученные сваркой взрывом, компоненты которых являются разнородными металлами. В основном, такие биметаллы применяются в электротехнической отрасли промышленности. Биметаллические материалы на основе титан+медь, сталь+алюминий, медь+алюминий и др., находят широкое применение в электрохимии, например, в качестве токоведущих деталей [52, 53].

В данной работе будут рассмотрены особенности получения сваркой взрывом соединений титана с медью и сталью, как наиболее востребованные материалы для производства токоподводов и переходников.

Титан хорошо сваривается с небольшим количеством металлов (цирконий, гафний, ниобий, тантал и ванадий) в связи с их неограниченной растворимостью. Сварка титана и его сплавов с распространенными конструкционными материалами весьма затруднена в связи с большими различиями в кристаллохимических и физических свойствах, сопровождающимися химической неоднородностью и появлению хрупких промежуточных фаз и соединений [54].

Титан и медь обладают разными типами кристаллических решеток и значительно отличаются атомными радиусами. По диаграмме состояния системы Ti-Cu (рисунок 1.3) растворимость меди в α -титане невелика (2,1% при эвтектоидной температуре); при температуре 990°C ее растворимость в титане значительно повышается и достигает 17,7%. Согласно приведенной на рисунке 1.3 диаграммы состояния Ti-Cu интерметаллидные соединения между титаном и медью образуются при температуре свыше 800°C [55-56]. Следовательно, в процессе сварки взрывом на границе соединения может образовываться прослойка из интерметаллидов, а её размеры будут зависеть от режима сварки взрывом. Структура сформировавшихся при сварке взрывом участков оплавленного металла в большинстве случаев представляет собой механическую смесь меди и интерметаллидных включений [57]. Согласно диаграмме равновесного состояния, Ti-Fe растворимость железа в α -титане, крайне мала и при комнатной температуре составляет 0,05–0,1%. При концентрации железа более 0,1% в сплаве образуются интерметаллидные соединения TiFe и TiFe₂. Появление интерметаллидов в сплаве TiFe значительно повышает прочность, но резко снижает пластичность [54]. Например, твёрдость сплава титана с железом (0,14%) составляет 200 HV, а с 2,2% железа не менее 450HV. Удлинение при разрыве составляет соответственно 18,5% и 2,5% [34].

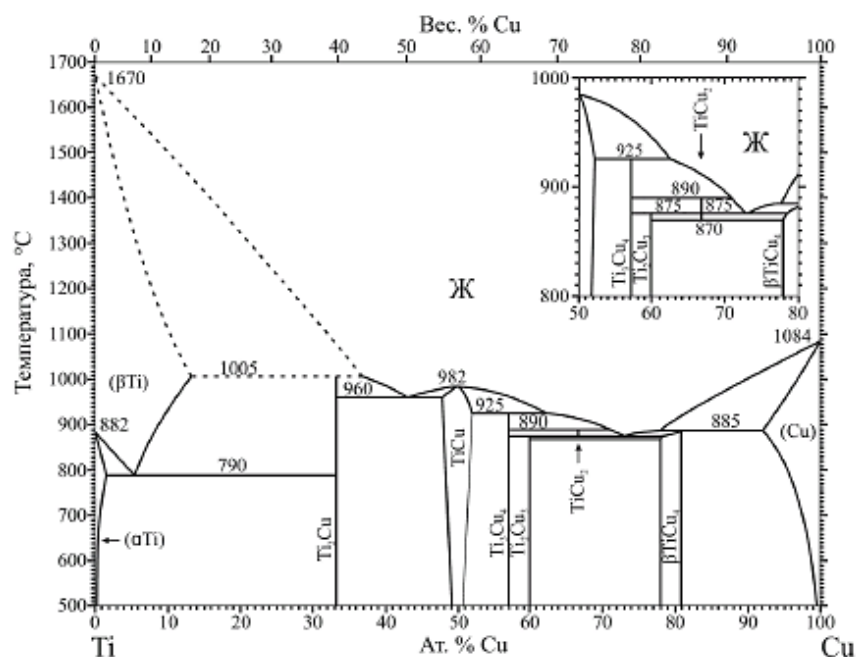


Рисунок 1.3 – Диаграмма состояния Ti-Cu [57]

Кислород, азот, водород и углерод образуют с титаном твердые растворы, что сильно снижает пластичность, а при достаточно высоком содержании их превращают его в хрупкий металл, непригодный для практического использования. Поэтому все высокотемпературные процессы в технологии титана должны осуществляться в атмосфере инертного газа или в вакууме [54].

Применение сварки взрывом наиболее перспективно в связи с преимуществами этой технологии: большая скорость и протекание процесса образования сварного соединения в твёрдой фазе без взаимной диффузии, не высокие требования к подготовке свариваемых поверхностей [58]. В работах [14, 15] было указано, что при сварке взрывом титана по мере удаления от начала процесса качество соединения стремительно падает из-за образования интерметаллидных соединений, оксидов и нитридов титана. Это создает дополнительные трудности при плакировании титаном длинномерных изделий. В околошовной зоне в титане наблюдаются множественные искажения структуры, вызванные фазовыми превращениями. В структуре сварного шва наблюдаются характерные специфические полосы, идущие от вершины волн на контактной поверхности в глубь металла параллельно друг другу под некоторым углом к

направлению сварки. В зависимости от режима соударения они могут иметь различную протяженность, наклон к границе раздела, ширину и иногда переходить в трещины.

В работах [59, 60] было показано, что на образование соединения, структуру и свойства влияет газ, который находится в сварочном зазоре. Показано [34], что при сварке взрывом газ в сварочном зазоре сжимается и нагревается до высоких температур, порядка 3000 К, одновременно нагревается и свариваемая поверхность титана. Титан обладает высокой химической активностью как в расплавленном, так и в твёрдом состоянии при повышенных температурах по отношению к кислороду и азоту. Активное поглощение этих газов (кислорода при $T=350^{\circ}\text{C}$ и азота при $T=550^{\circ}\text{C}$) приводит к резкому повышению прочности и снижению пластичности металла [61].

Таким образом, нестабильность свойств соединений титана со сталью является следствием влияния газа, находящегося в объёме между свариваемыми поверхностями. Такое влияние газа на процесс образования сварного соединения проявляется не только на значительном удалении от начала сварки, но и в любом месте сварного соединения. При сварке взрывом крупногабаритных листов титана со сталью качество соединения повышают путём заполнения сварочного зазора инертным газом.

1.4 Деформация цилиндрических изделий в процессе сварки взрывом

Прохождение детонационной волны в накладных зарядах создает высокое напряжение в свариваемых материалах, а сопровождающая детонацию волна разгрузки снижает напряжение до нуля. Поэтому для сварки взрывом характерно почти мгновенное возрастание импульсной нагрузки до очень высокого значения и последующего быстрого её снижения. Такой профиль давления, возникающий в точке контакта в момент соударения пластин, перемещается с дозвуковой скоростью вместе с точкой контакта. При этом в соединяемом материале создаются высокие концентрации напряжений и деформаций, в результате чего

могут возникнуть разрушения в какой-либо части тела независимо от того, что происходит в других его частях [39].

Поверхность цилиндра или трубы под действием высокого давления от детонации взрывчатого вещества, приобретает радиальное движение к центру сборки. В толстостенной полый трубе внутренняя поверхность приобретает движение к центру, начинается которое возникает в случае, когда материал имеет некоторую свободу движения [62]. В связи с истечением продуктов детонации и прохождением вслед за детонационной волной волны разгрузки различные сечения по длине трубы подвержены воздействию различных по форме и длительности импульсов. В результате этого, скорости движения различных сечений по длине трубы различны. Часть взрывной энергии расходуется на работу деформации трубы, величина которой зависит от геометрических размеров и прочностных свойств материала, что снижает скорость радиального перемещения трубы [63]. Для обеспечения равномерных условий осесимметричного нагружения, инициирование трубчатого заряда взрывчатого вещества, разгоняющего плакирующий слой, следует проводить на его оси [39].

Сварка взрывом цилиндрических изделий с наружным расположением заряда взрывчатого вещества может сопровождаться откольными явлениями, как результат интерференции волн разгрузки, источниками которых являются наружная поверхность метаемой трубы и внутренняя поверхность основной неподвижной трубчатой заготовки. С целью избежать разрушения необходимо использовать внутреннюю опору [64], которая препятствует образованию волн разгрузки на внутренней поверхности неподвижной трубы.

Выбор опорного наполнителя при сварке взрывом с использованием наружного заряда взрывчатого вещества трубных изделий является важным моментом при разработке схемы плакирования. Граничные условия изделия и опоры описываются уравнениями акустики, из рассмотрения которых видно, что слабые ударные волны, возникающие в изделии при плакировании, проходят в массив опоры без отражения лишь в случае совпадения акустических сопротивлений материалов изделия и опоры. Опора, с импедансом близким к

плакируемому материалу, действует как присоединенная масса, увеличивает инерционное сопротивление плакируемой заготовки и снижает степень её формоизменения [65].

Изделия в процессе взрывной обработки испытывают деформации, которые приводят к неисправимым изменениям геометрических размеров образцов [66]. Исследования, проведенные в работе [67] на основе экспериментальных данных и компьютерного моделирования деформационных процессов при сварке взрывом пластин, показали, что:

1. На характер деформационного процесса и на изменение геометрических размеров метаемой и основной пластины оказывают влияние исходные геометрические размеры пластин, характеристики физико-механических свойств материалов свариваемых пластин и взрывчатого вещества.

2. Остаточное удлинение пластин возникает на участках, равных 80% длины листа, но не равномерно. Максимальная величина остаточной деформации имеет место у торца противоположного местоположению точки инициирования.

3. Деформация растяжения основного листа под действием ударных нагрузок плакирующего листа идёт впереди точки контакта по всей толщине до образования соединения.

Таким образом задача по разработке экспериментальных схем для плакирования взрывом поверхностей длинномерных цилиндрических изделий должна учитывать влияние прочностных свойств свариваемых материалов, их размеров (толщина, диаметр), акустических свойств внутренней опоры, точности сборки и силу заряда взрывчатого вещества на формирование соединения в процессе сварки взрывом. Оптимальное сочетание всех участвующих в образовании сварного соединения факторов позволит получать биметаллические цилиндрические изделия заданных размеров с качественным сцеплением свариваемых слоев.

1.5 Способы и материалы, применяемые для защиты от коррозионного износа поверхностей цилиндрических изделий

Конструкционные материалы, находясь в различных условиях эксплуатации, подвергаются коррозионным разрушениям, в результате которых сокращается срок их службы [68-70]. Для того, чтобы повысить прочностные, антикоррозионные и другие эксплуатационные свойства конструкционных материалов применяют плакирование, т.е. нанесение различными технологическими способами слоя с особыми свойствами на рабочую поверхность изделия. Основной слой обеспечивает требуемую прочность, стойкость при ударных нагрузках конструкции в целом. Плакирующий слой обеспечивает защиту детали от быстрого выхода из строя вследствие разрушения материала под воздействием агрессивных сред [71-75].

В настоящее время остро стоит проблема износа ответственных деталей и узлов оборудования, работающего в нефтедобывающей отрасли. Воздействие агрессивных сред (парафины, смолы, сероводород и углекислый газ) и механические нагрузки приводят к частичному или полному разрушению изделий. Например, в условиях добычи нефти на месторождениях Западной Сибири, Поволжья, Коми, нефтедобывающее оборудование подвержено быстрой изнашиваемости. Причиной этому является наличие в добываемой нефти высокоминерализованной воды с растворенными газами CO_2 , H_2S и деятельность сульфатовосстанавливающих бактерий (далее СВБ), что характерно для скважин на завершающей стадии освоения [76, 77]. В наиболее тяжелые условия поставлена внутренняя поверхность насосно-компрессорных труб (далее НКТ) и нефтяных штанг. НКТ служат для извлечения жидкости и газа из скважин, нагнетания воды, сжатого воздуха (газа) и производства различных видов работ по текущему и капитальному ремонту скважин. В зависимости от сочетания таких факторов, как содержание сероводорода H_2S , углекислого газа CO_2 в добываемой нефти, степень её обводненности, активность СВБ, напряжения, возникающего в НКТ от собственного веса, в НКТ может протекать общая (равномерное утонение стенки) и язвенная коррозия (локальное образование язв), сульфидное

коррозионное растрескивание под напряжением. Как показывает практика, истощение эксплуатационного ресурса, вследствие язвенной коррозии (рисунок 1.4) составляет значительную долю [75, 76].



Рисунок 1.4 – Язвенные коррозионные поражения НКТ из стали 32Г2 [77]

Для условий эксплуатации НКТ, типичных для нефтяной промышленности, характерно одновременное воздействие на металл коррозионной среды и механических напряжений. В соответствии с насосным циклом колонна НКТ испытывает постоянные вибрационные нагрузки. При приложении механических нагрузок коррозия развивается интенсивнее. Совместное воздействие эрозии и коррозии ускоряет разрушение в десятки раз. Переменное растягивающее напряжение вызывает износ защитных пленок и коррозионное растрескивание. При этом происходит множество взаимосвязанных механохимических и механоэлектрохимических явлений [78].

В настоящее время существуют различные методы борьбы с коррозией НКТ (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Методы защиты НКТ от коррозии [79]

В основном, для защиты НКТ от коррозии и вредных отложений асфальтенов, смол и парафинов применяют различного рода покрытия - цинковые (имеет высокую адгезию к железу и низкую к парафинам), жидкое стекло, эпоксидные смолы и лаки, силикатно-эмалевые и полимерные покрытия.

Наибольшее распространение в качестве защитных материалов получили цинковые и полимерные покрытия.

Цинковые покрытия – традиционная защита черных металлов от коррозии. Более 50% мировой добычи цинка уходит на защиту от коррозии продукции черной металлургии. Отличительной чертой антикоррозионных цинковых покрытий является электрохимическая защита. Разница в электрохимических потенциалах железа и цинка приводит к тому, что при образовании железоцинковых гальванических пар цинк играет роль анода. В результате идет коррозия цинка, а коррозия железа в стали не начинается до тех пор, пока цинковое покрытие выдерживает воздействие агрессивной среды.

Полимерные покрытия. Для создания такого покрытия применяется два типа пластмасс: термопластичные (поливинилхлорид, полиэтилен, полипропилен,

фторопласт и т.д.) и термореактивные (фенопласты, эпоксидные, полиэфирные). Такие покрытия имеют высокую коррозионную стойкость (в том числе в высокоминерализованных средах) и длительный срок службы. Однако, данный вид покрытия имеет ряд эксплуатационных ограничений по рабочей температуре и давлению в системе, стойкости к химически агрессивным компонентам, наличию в добываемой продукции механических примесей.

Стеклопластиковая труба имеет ограничения по температуре (не ниже минус 30°C), что в зимний период часто делает невозможным проведения ремонтов на скважинах с стеклопластиковыми трубами. Также данный вид труб подвержен износу механическими примесями, требует особого хранения (без воздействия солнечного света) [80].

Перспективными на данный момент являются двухслойные трубы, полученные лейнированием с помощью технологии совместной раздачи труб на оправке [81].

Другой актуальной задачей для отечественного машиностроения, близкой к получению коррозионностойких материалов, является создание нового композиционного материала для изготовления из него стволов артиллерийских систем. Внутренний слой должен состоять из жаропрочного эрозионностойкого сплава (ниобиевый, никель-кобальтовый, танталовый и т.п.), а наружный из конструкционной высокопрочной оружейной стали.

В настоящее время те материалы, которые применяются для изготовления стволов артиллерийских систем не могут быть использованы при увеличении мощности применяемых энергетических конденсированных систем (метательные пороха). Поэтому перспективным направлением в плане увеличения живучести и боевых характеристик артиллерийского орудия является создание двухслойных стволов с внутренним защитным слоем из сплавов на основе тугоплавких элементов.

Износ стволов представляет собой весьма сложное явление, вызываемое многими причинами. Канал ствола в основном подвергается трем видам воздействия пороховых газов: термическое, механическое и химическое [82].

Термическое действие связано с высоким нагревом внутренней поверхности ствола пороховыми газами, имеющими температуру 2500-3500 °С. Нагрев ствола происходит также в силу трения между снарядом и поверхностью канала. Он вызывает резкие изменения механических свойств металла, а неравномерность нагрева сопровождается высокими температурными напряжениями. Расчеты и опытные данные показывают, что внутренние слои металла толщиной в несколько сотых миллиметра нагреваются до температуры 700-1000°С [83]. Механическое действие газов заключается в том, что частицы газов и пороховые зерна наносят сильные удары по поверхности канала ствола и разрушают металл. Химическое действие пороховых газов проявляется в том, что при высоких давлениях и температурах молекулы газа распадаются на атомы, которые активно соединяются с металлом и проникают в его поры.

Внутреннюю поверхность стволов артиллерийских орудий от износа защищают следующими способами: хромирование и специальное цементирование внутренней поверхности канала ствола, наклеп, сообщаемый поверхностному слою металла, а также поверхностная лазерная закалка. Для продления срока службы канала ствола используют лейнеры или свободные трубы. Для создания эрозионностойкого слоя на поверхности высокопрочной стали можно использовать наплавку или прессование с дальнейшей прокаткой.

Коррозионной защиты требуют изделия из меди, широко используемые в различных отраслях промышленности, в частности электрометаллургии. Например, при производстве чистого никеля используют медные токоподводы с нанесенным тонким слоем из титана, который защищает поверхность изделия от воздействия электролита.

Для промышленного электролиза применяют постоянный ток. Нарастиваемый металл снимается с катодов-матриц (алюминий, титан, нержавеющая сталь). Данные электроды должны быть стойкими в электролите, при этом, не обладая высоким сцеплением с осаждаемым металлом (как правило, покрыты пассивной оксидной пленкой) [84]. Постоянный электрический ток на электрод подается через токоподводы. На данный момент самым оптимальным

является применение двухслойного токоподвода. При этом полученные различными способами биметаллические токоподводы должны обеспечивать минимальное значение падения напряжения, в противном случае, расходы на электроэнергию будут значительными. В настоящее время двухслойные медно-титановые стержни в основном получают двумя способами – прессование и сварка взрывом. Получение цилиндрических медно-титановых токоподводов сопряжено с различными трудностями, связанными с различием свойств меди и титана [55-57]. Основными производителями медно-титановых анодов являются «Udo Plante GmbH» (Германия), «Shenzhen Jia Ping Titanium Industry Co., Ltd» (Китай), «U.S. Titanium Industry Inc.» (США), «Anomet Products» (США) и некоторые предприятия Финляндии.

1.6 Особенности прокатки биметаллических труб

При производстве биметаллических труб горячей деформацией применяют все способы производства бесшовных труб. Производство биметаллических и монометаллических труб различается лишь тем, что параметры технологических процессов должны обеспечить кроме обычных качественных показателей сохранение свойств каждого металла и прочное их сцепление. Важнейшими условиями производства таких труб является качественное изготовление заготовки и выбор способа нагрева, температурно-скоростных параметров, степени деформации, технологических смазок и калибровки технологического инструмента [3].

Производство горячекатаных бесшовных труб включает следующие основные технологические операции: нагрев заготовки, получение полрой гильзы, подогрев гильзы (при необходимости), получение трубы промежуточных размеров (раскатка гильзы в трубу), подогрев трубы (при необходимости), окончательную формовку трубы по диаметру и толщине стенки [86]. В качестве заготовок для горячей прокатки используют двухслойные цилиндрические сплошные или полые заготовки, полученные различными технологическими

способами: наплавкой, центробежным литьем, прессованием, сваркой взрывом и т.п.

При всех способах горячей деформации наблюдается повышенная разнотолщинность слоев. Например, на непрерывных, пилигримовых и автоматических станах прокатку труб ведут в валках, ручки которых имеют выпуски, что и приводит к повышенной разнотолщинности.

Биметаллические товарные трубы после раскатки и калибровки подвергают отделке и контролю качества. Практически все трубы подвергают контролю на сплющивание, раздачу и загиб. Годные трубы маркируют, консервируют, упаковывают и отправляют на склад готовой продукции [2].

Холодная прокатка труб представляет собой периодический процесс деформации, в результате которого получают трубы повышенной точности по диаметру и по толщине стенки, хорошую геометрию и качество поверхности, а также высокие прочностные свойства. Особенностью данного вида производства труб, является обеспечение чистой поверхности заготовок, которую перед прокаткой травят, промывают, просушивают и омедняют для улучшения условий деформации [85,86].

Станы холодной прокатки предназначены для изменения размеров (диаметра и стенки) и улучшения качества поверхности труб путем пластической деформации их валками или роликами, имеющими переменное сечение ручья, на конической или цилиндрической оправке. Оправка закрепляется вдоль оси трубы. Калибры, закрепленные на валах или роликах, совершают сложное движение вдоль оправки: возвратно-вращательное вокруг собственной оси и поступательное совместно с клетью, в которой они установлены на подшипниках качения. Наибольшее уменьшение поперечных сечений стальных труб достигает 88%, а уменьшение толщины стенки 70%, при этом допуск на диаметр обычно находится в пределах 0,5-0,8% от диаметра готовой трубы, а допуск на толщину стенки 0,5-10% от заданного ее готового значения [87].

Из известных способов холодной прокатки труб наибольшего внимания заслуживают способы прокатки труб на станах валковых, роликовых и

поперечной прокатки. На этих станах практически получают все трубы, необходимые для различных отраслей народного хозяйства [3].

Холоднодеформированные биметаллические трубы получают из биметаллической заготовки, изготовленной методами горячей деформации, деформации с использованием энергии взрыва и др. Данная технология основана на холодном сочленении труб требуемых размеров и металлов с последующей термодиффузионной обработкой и холодным переделом до готового размера. Трубы из металла наружного слоя после порезки и химической обработки подвергают термической обработке, трубы из металла внутреннего слоя в наклепанном состоянии подвергают подготовке контактных поверхностей. Затем трубы собирают в пары с зазором в 5-7 мм. Контакт свариваемых поверхностей достигается совместной пластической деформации волочением, в процессе которой создаются условия, способствующие интенсификации диффузионных процессов [2].

Как было отмечено выше, качество готовой товарной биметаллической трубы во многом зависит от исходных заготовок. Для особо ответственных конструкций необходимо использовать биметаллические трубы с прочным сцеплением слоев и равномерной толщиной составляющих элементов биметалла.

Таким образом, для получения качественной трубы после прокатки необходимо обеспечить сплошность соединения слоев в двухслойной заготовке и их прочное соединение.

Как показано в литературном обзоре биметаллические материалы имеют несомненное преимущество перед монометаллическими. Они позволяют расширить эксплуатационные характеристики изделий широкой номенклатуры, а также значительно снизить использование дорогостоящих сталей и сплавов. Сварка взрывом, в отличие от многих других способов изготовления биметаллических труб и стержней позволяет получать как готовые так переделные заготовки практически с любым сочетанием слоев и размеров при минимальных затратах электроэнергии. При этом, в процессе отработки технологии получения двухслойных изделий цилиндрической формы методом

импульсного нагружения зарядом взрывчатого вещества необходимо решать проблемы, связанные с сохранением целостности собранных деталей в процессе взрывного плакирования, достижением минимального уровня деформаций, а также обеспечением качественного и равнопрочного соединения свариваемых элементов на расстоянии более 10 диаметров трубы. На данный момент все эти проблемы решаются исследователями с переменным успехом, до сих пор вопросы получения качественных двухслойных длинномерных заготовок являются не до конца решенными.

Тяжелые условия работы приводят к тому, что скважинное оборудование выходит из строя спустя три-четыре месяца после монтажа, что влечет за собой необходимость проведения ремонтных работ, а это в свою очередь приводит к простою скважины и экономическим потерям. Поэтому плакированные нержавеющей сталью насосно-компрессорные трубы являются практически единственным способом повышения срока службы данного ответственного вида скважинного оборудования.

Разработанные в настоящем исследовании научно-технологические основы получения сваркой взрывом длинномерных изделий цилиндрической формы позволят решить вопрос по импортозамещению отдельных видов оборудования, работающего в нефтедобывающей отрасли, производстве цветных металлов методом электролиза, военно-промышленном комплексе, а также увеличить производительность и срок службы готовых изделий.

1.7 Цель и задачи исследования

Цель работы

Исследовать особенности формирования соединения слоев в процессе сварки взрывом изделий цилиндрической формы, разработать и внедрить технологические основы их производства в промышленную технологию изготовления биметаллических длинномерных стержней, а также изготовить опытные партии биметаллических труб и переходников.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Экспериментально исследовать особенности структуры и свойств соединений высокопрочной стали с жаропрочными сплавами, полученными сваркой взрывом применительно к плакированию артиллерийских стволов.

2. Исследовать влияние газа, находящегося в зазоре, на формирование соединения слоёв в процессе сварки взрывом цилиндрических изделий, в том числе длинномерных (отношение длины к диаметру $L/D > 10$).

3. Исследовать особенности формирования соединения слоёв при различных схемах процесса сварки взрывом, изучить закономерности влияния параметров процесса и схемы сварки на продольную и поперечную деформацию длинномерных труб и стержней путем исследования структуры, и механических свойств соединения.

4. Исследовать влияние наличия локальных несплошностей по длине медно-титанового токоподвода на падение напряжения при эксплуатационных режимах.

5. На основании результатов исследований разработать технологические основы производства сваркой взрывом длинномерных цилиндрических изделий функциональными покрытиями, обеспечивающие сплошность, прочность соединения и уровень деформаций в заданных параметрах.

6. Разработать и освоить промышленную технологию производства сваркой взрывом двухслойных длинномерных стержней титан+медь для токоподводов электролизёров, изготовить опытную партию двухслойных заготовок насосно-компрессорных труб марки 37Г2Ф+08Х18Н10Т и цилиндрических переходников сталь+титан.

Глава 2. Материалы и методики исследований

2.1 Характеристики используемых материалов

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

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

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

– для внутреннего опорного наполнителя использовались: литая стальная дробь, стержень из стали Ст.3, строительный песок и поваренная соль.

Химический состав и механические свойства металлических материалов представлены в таблицах 2.1, 2.2 и 2.3.

Таблица 2.1 – Химический состав плакирующих материалов

Наименование материала	Химические элементы (массовая доля), %											
	Nb	Mo	W	Zr	Ni	Co	Fe	Al	Cr	C	Mn	Ti
Н65В2МЦ	Осн	1,7 - 2,3	4,9- 5,5	0,9- 1,2	-	-	-	-	-	-	-	-
ЭК102	-	-	13- 16	-	Осн	26- 30	3,0	0,3- 0,7	20- 23	-	-	-
08Х18Н10Т	-	0,5	≤0,2	-	9-11	-	Осн	-	18	0,08	2	0,5
ВТ1-0	-	-	-	-	-	-	0,25	-	-	0,07	-	Осн
Титан ПТ-7М	-	-	-	2,0- 3,0	-	-	0,25	1,8- 2,5	-	0,1	-	Осн

Таблица 2.2 – Химический состав материалов основы

Наименование материала	Химические элементы (массовая доля), %								
	C	Si	Mn	Cr	V	Ni	Cu	S	P
ОХНЗМ	0,3-0,4	0,17-0,37	0,5-0,8	0,7-1,1	-	2,75-3,75	-	≤0,035	≤0,030
37Г2Ф	0,35	0,28	1,52	0,22	0,15	0,20	0,01	≤0,035	≤0,032
Медь М1	-	-	-	-	-	-	99,99	-	-
Сталь 20	0,17-0,24	0,17-0,37	0,35-0,65	до 0,25	-	до 0,3	до 0,3	до 0,04	до 0,035

Таблица 2.3 – Механические свойства исходных материалов

Наименование материала	Температура испытания Т, °С	Предел прочности σ _в , МПа	Предел текучести σ ₀₂ , МПа	Относительное удлинение δ, %	Относительное сужение ψ, %
Н65В2МЦ	20	440-470	350-400	25-28	-
	1250	120-140	80-110	40-45	
ЭК102	20	850-900	300-380	60-75	-
	1000	150-170	100-120	50-60	
08Х18Н10Т	20	610-640	275-295	41-44	63-65
	700	270-300	160-190	26-30	59-62
ВТ1-0	20	390-590	300-420	15-17	-
ОХНЗМ	20	950-980	800-840	-	40-45
37Г2Ф	20	705-715	650-680	16-20	60-64
Медь М1	20	280-300	-	6-8	-
ПТ-7М	20	500-650	450-600	28-30	-
Сталь 20	20	-	-	-	-

В качестве взрывчатых веществ использовали аммиачно-селитренные ВВ, представляющие собой смеси двух компонентов: микропористой аммиачной

селитры (ТУ 2143-036-002-3789-2003) и аммонита 6ЖВ (ГОСТ 21984-76) в различных соотношениях. Также в качестве ВВ был использован игданит – смесь микропористой аммиачной селитры с дизельным топливом (96:4). Характеристики используемых взрывчатых веществ представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Характеристики взрывчатых веществ

Наименование ВВ	Насыпная плотность, кг/м ³	Толщина слоя заряда, мм	Скорость детонации, м/с*
Смесь гранулированной микропористой аммиачной селитры с дизельным топливом (содержание 4%), забойка из песка	740	45-180	2200-3400
Аммонит 6ЖВ	1000	26-27	3600-3700
Смесь аммонита 6ЖВ с аммиачной селитрой 1:1,6	850-1000	15-17	2800-2900
Смесь аммонита 6ЖВ с аммиачной селитрой 1:3	850-900	22-26	2500-2600

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

2.1 Методы исследования

2.1.1 Разработка общей методики исследований

Для достижения конечной цели создания технологических основ двухслойных изделий цилиндрической формы и освоение промышленного изготовления двухслойных стержней цилиндрической формы комплекс исследований проводился по следующей методике в соответствии с задачами исследования:

1. На основании известных методик и расчетных формул проводилась теоретическая оценка влияния газа в сварочном зазоре на свариваемые поверхности с учетом состава и свойств свариваемых материалов. Затем экспериментально путем сварки взрывом по разработанным схемам и режимам

сваривали изделия цилиндрической формы. В процессе экспериментов по разработанной методике исследовались особенности деформации изделий в продольном и поперечном направлениях в процессе сварки взрывом.

2. Полученные образцы подвергались визуально-измерительному контролю, а затем проводились механические испытания и исследования микроструктуры соединения.

3. На основании результатов проведенного комплекса исследований разрабатывались технологические основы производства сваркой взрывом цилиндрических изделий функциональными покрытиями, обеспечивающие сплошность, прочность соединения и уровень деформаций в заданных параметрах.

4. В ООО «Битруб» осваивалось опытно-промышленное производство стержней, а в ООО «Битруб Интернэшнл» производство двухслойных труб.

Методика исследования включала в себя оптическую металлографию, электронную микроскопию, рентгенофазовый анализ, измерение микротвердости, измерение падения напряжения по длине проводника, испытание на прочность соединения (отрыв, сплющивание), ультразвуковой контроль сплошности соединения.

Металлографические исследования проводили с учетом особенностей и сложности при шлифовании, полировании, травлении и измерении микротвердости материалов с резко различающимися свойствами (титан+медь, титан+сталь) по технологии, принятой в ИСМАН.

2.2.2 Методика определения прочности соединения на срез и на отрыв

Для тонкого плакирующего слоя в биметалле испытания на отрыв потребовали разработки новой методики механических испытаний с использованием дополнительного технологического слоя поверх плакирующего, полученного сваркой взрывом. Таким образом испытанию подвергался триметалл, толщина которого позволяла изготовить образцы для испытаний по ТУ 27.32.09.010-2005 (рисунок 2.1).

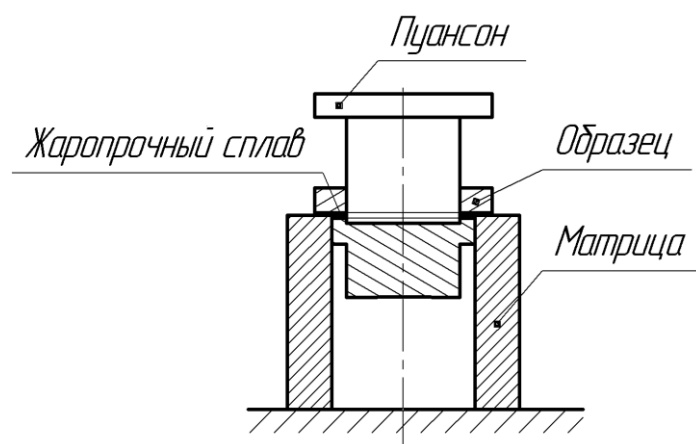


Рисунок 2.1 – Схема испытания триметаллического образца на отрыв плакирующего слоя

Напряжение сопротивления отрыву слоев рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{\text{отр}} = \frac{4P}{\pi(d_2^2 - d_1^2)}, \quad (2.1)$$

где P – прилагаемая нагрузка, кг;

d_1 и d_2 – внутренний и наружный диаметры рабочей части образца, замеренные с точностью до 0,05 мм.

Испытуемый образец считается сваренным, если прочность сварного соединения будет на уровне прочности более «слабого» металла из пары.

На рисунке 2.2 указана схема образца для испытания на срез плакирующего слоя (титан ВТ1-0). Испытания образцов проводилось на разрывной электромеханической машине Instron 1195 по схеме, указанной на рисунке 2.3.

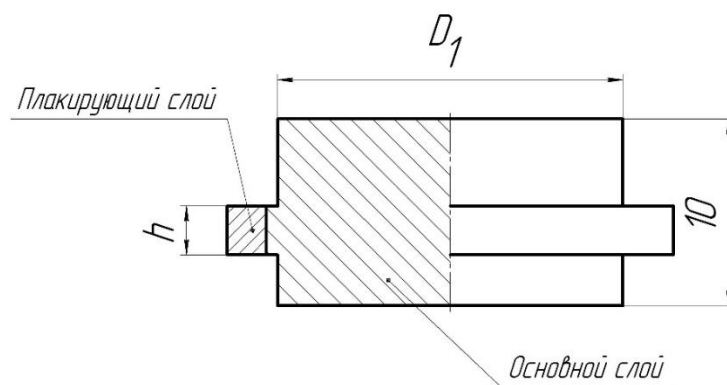


Рисунок 2.2 – Эскиз образца для испытания на срез плакирующего слоя

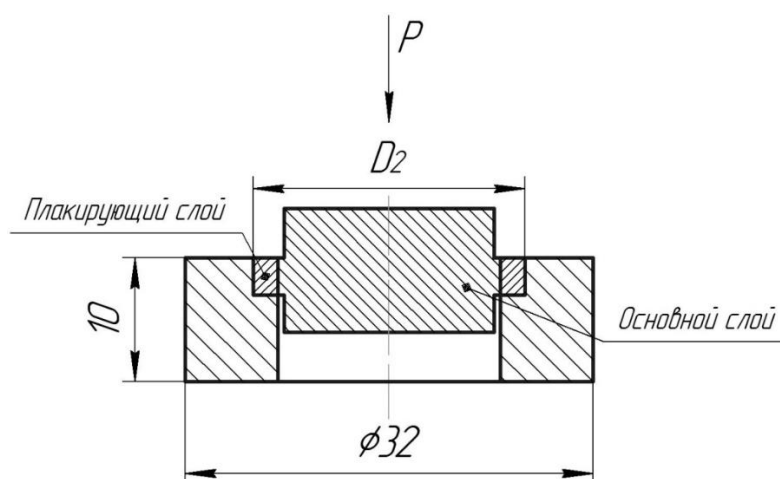


Рисунок 2.3 – Схема испытаний биметаллических стержней на срез плакирующего слоя

Напряжение сопротивления срезу слоев рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{\text{срез}} = \frac{P}{\pi \cdot D_1 \cdot h}, \quad (2.2)$$

где P – прилагаемая нагрузка, кг;

$D_1 = D_n - 0,5$ мм – наружный диаметр медного стержня, мм;

D_n – номинальный наружный диаметр медного стержня, мм;

h – ширина плакирующего слоя после проточки, мм.

2.2.3 Механические испытания на сплющивание

В работе для качественной оценки прочности сцепления слоев была использована известная методика испытанием на сплющивание биметаллического кольца, последний вырезался из тела биметаллической трубной заготовки. Испытания проводились с целью выявления трещин и расслоений в образце под действием нагрузки. Сплющивание кольца, вырезанного из титановой трубы, до соприкосновения поверхностей и их последующего визуального осмотра (ГОСТ 8695-75) позволял судить о пластичности образца.

2.2.4 Методика измерения продольной и поперечной деформации цилиндрических заготовок

Для оценки продольной остаточной деформации (удлинения) наружных трубных заготовок в биметаллических цилиндрических изделиях после сварки взрывом был использован метод реперных точек. Метод заключался в том, что на наружную поверхность труб до сварки взрывом наносились специальные метки по схеме, указанной на рисунке 2.4. На трубы длиной 2400 мм первые 21 метку наносили с шагом 100 мм, затем метки наносили с шагом 50 мм. Метки наносили ударным методом. Замер полученных баз производили с точностью 0,1 мм дважды: до и после сварки взрывом. Аналогичная методика применялась для исследования продольной деформации титановой трубы в биметаллическом стержне.

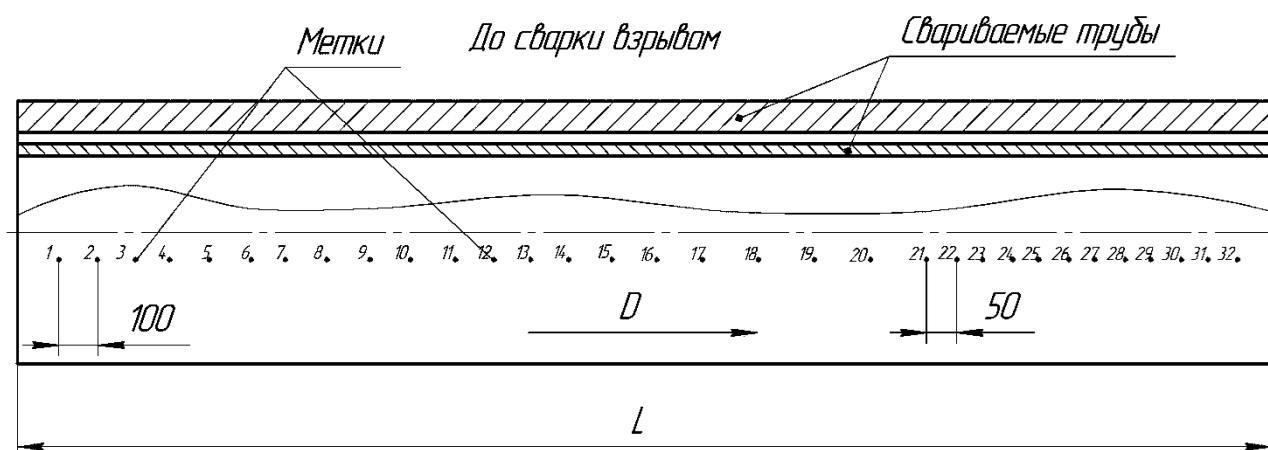


Рисунок 2.4 - Схема выявления продольной деформации биметаллической трубы

Для оценки поперечной деформации биметаллической трубы и стержня после сварки взрывом использовался метод измерения наружного диаметра трубы штангенциркулем ШЦ-1-150-0,05 ГОСТ 166-89 в двух перпендикулярных друг другу направлениях. Для труб длиной 1 метр расстояние между точками измерения составляло 50 мм, для труб длиной 2400 мм — 100 мм. Для построения графиков использовалось среднее арифметическое значение двух измерений.

2.2.5 Методика изготовления шлифов для металлографических исследований

Изготовление и подготовка образцов для металлографических исследований проводились в несколько стадий:

- вырезка образцов;
- предварительная грубая обработка поверхностей образцов;
- шлифование;
- полирование;
- травление (для изучения микроструктуры).

Вырезка образцов для дальнейшего изготовления из них шлифов проводилась механическим способом с помощью угловой шлифмашины (резка абразивными кругами), циркулярной дисковой пилы и токарного станка. Во всех случаях резка проводилась с использованием охлаждающей жидкости. Метод вырезки выбирался в зависимости от размера заготовки и технологических возможностей на момент изготовления образцов.

Предварительная обработка, если она требовалась, проводилась на шлифовальном станке.

Шлифование производилось на установке для приготовления металлографических шлифов ШЛИФ–1М/V. Эта установка имеет регулируемую рабочую скорость вращения диска и позволяет подавать воду на рабочую поверхность. Шлифование начиналось с наиболее зернистого материала для создания ровной поверхности и устранения негативных эффектов от вырезки. Каждая последующая операция шлифования сопровождалась уменьшением зернистости применяемого абразива.

Полировку металлографических шлифов проводили для устранения имеющихся после шлифования неровностей поверхности. Полировка шлифов начиналась на неворсистой ткани, а заканчивалась кратковременной доводкой на ворсистой ткани. Для полировки использовались алмазные порошки зернистостью от 3,1 до 0,5 мкм.

Для рассмотрения и изучения структуры металлов проводили травление выбранного участка поверхности зоны соединения, в котором за счет удаления поверхностного слоя и растворения границ зерен проявлялась топографически развитой поверхности локального участка.

Зерна в чистых металлах обнаруживаются благодаря различному цветовому контрасту, что объясняется различной ориентировкой кристаллов в пространстве. Травители для выявления микроструктуры металлов и сплавов, используемых в работе, приведены в таблице 2.5.

Объектами исследования являлись металлографические шлифы, и протравленные поверхности. Изучение микроструктуры начинали с рассмотрения «свежего» микрошлифа в чистом нетравленном виде, непосредственно после полирования, промывки спиртом и просушивания.

Таблица 2.5 – Реактивы для выявления микроструктуры [88]

№	Реактив	Примечание
1	50%-ный раствор соляной кислоты.	70-80 °С, до 1 ч. выявляет ликвацию, пористость, трещины; применяют для исследования качества сварки.
2	25%-ный раствор азотной кислоты.	Для улучшения качества травления реактив охлаждают.
3	10%-ный раствор персульфата аммония.	Протирание тампоном. Контрастное выявление зерен, выявление рекристаллизации в сварных соединениях
4	5–10%-ный спиртовой раствор азотной кислоты.	Травление до 0,5 ч. Выявляются трещины и ликвация углерода. Воспроизводимость результатов лучше, чем при использовании водных растворов кислот.
5	1 ч. азотной кислоты, 3 ч. соляной кислоты.	Для лучшего травления реактив оставить в прохладном месте на 2 часа

2.2.6 Метод растровой электронной микроскопии

Принцип растровой электронной микроскопии (РЭМ) заключается в сканировании участка исследуемого образца узкофокусированным электронным зондом и детектировании возникающих при этом сигналов. Изображение строится синхронно с разверткой зонда на образце таким образом, что каждому положению пучка на поверхности образца соответствует точка (пиксел) на мониторе микроскопа. При взаимодействии электронов пучка с образцом происходит ряд явлений: эмиссия вторичных, отраженных и Оже электронов, рентгеновское излучение, генерация электронно-дырочных пар и др.

Микроструктура образцов изучалась с помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) сверхвысокого разрешения ZeissUltraplus на базе Ultra 55 с приставкой рентгеновского микроанализа INCA 350 Oxford Instruments.

2.2.7 Метод оптической микроскопии

Металлографические исследования исходных заготовок и полученных из них биметаллических материалов были проведены на металлографическом инвертированном микроскопе МЕТАМ ЛВ-34, где съемка изображений с микроскопа осуществлялась камерой модели ТС-500.

Сущность металлографического исследования заключается в наблюдении структуры поверхности непрозрачных тел. Устройство микроскопа построено по схеме отраженного света, где находится специальный осветитель, установленный со стороны объектива. Система призм и зеркал направляет свет на объект, где он отражается от не прозрачного предмета и направляется обратно в объектив.

2.2.8 Метод рентгенофазового анализа

В основе рентгенофазового анализа лежит явление дифракции рентгеновских лучей кристаллами. Известно, что веществу в любом агрегатном состоянии свойственна та или иная степень упорядоченности. Наибольшей упорядоченностью обладают твердые кристаллические тела: они характеризуются

периодическим повторением в пространстве некоторой элементарной ячейки, узлами которой являются атомы, ионы или молекулы. Расстояния между узлами в элементарной ячейке (межатомные расстояния) составляют несколько ангстрем, т.е. имеют тот же порядок, что и длины волн рентгеновских лучей [89].

Рентгенограмма каждой фазы характеризуется своим набором межплоскостных расстояний d_{hkl} и интенсивностей I_{hkl} . При сочетании в материале нескольких фаз рентгенограмма представляет наложение рентгенограмм отдельных фаз. РФА проводился на дифрактометре ДРОН-3М в автоматическом режиме по программе MZAEM. Углы дифракции регистрировались в интервале от 20° до 80° .

2.2.9 Измерение микротвердости

Микротвердость определяли методом Виккерса (HV) при помощи микротвердомера ПМТ-3, предназначенного для измерения твёрдости металлов, сплавов, стекла, в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 и ГОСТ 9450-76.

При испытании на твердость методом Виккерса в поверхность материала вдавливается четырехгранная алмазная пирамидка с углом при вершине $\alpha = 136^\circ$. После снятия нагрузки измеряются диагонали отпечатка d_1 и d_2 . Число твердости по Виккерсу HV подсчитывается как отношение нагрузки P к площади поверхности пирамидального отпечатка F [90], либо с помощью специальных переводных таблиц (ГОСТ 9450-76):

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin 68^\circ}{d^2} = \frac{1,854P}{d^2}, \quad (2.1)$$

где P – прилагаемая нагрузка, г;

d – среднеарифметические длины обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мкм.

Продолжительность выдержки индентора под нагрузкой принимают для сталей 10-15 секунд.

2.2.10 Ультразвуковой контроль

Ультразвуковая технология испытания основана на способности высокочастотных колебаний (около 20 000 Гц) проникать в металл и отражаться от поверхности царапин, пустот и других неровностей. Искусственно созданная, направленная диагностическая волна проникает в проверяемое соединение и в случае обнаружения дефекта отклоняется от своего нормального распространения. Оператор ультразвукового дефектоскопа видит это отклонение на экранах приборов и по определенным показаниям данных может дать характеристику выявленному дефекту. Практически все приборы для диагностики методом ультразвуковых волн устроены по схожему принципу. Основным рабочим элементом является пластина пьезодатчика из кварца или титанита бария. Сам пьезодатчик прибора расположен в призматической искательной головке (в щупе). Щуп располагают вдоль швов и медленно перемещают, сообщая возвратно-поступательное движение. В это время к пластине подводится высокочастотный ток (0,8—2,5 МГц), вследствие чего она начинает излучать пучки ультразвуковых колебаний перпендикулярно своей длине. Отраженные волны воспринимаются такой же пластиной (другим принимающим щупом), которая преобразует их в переменный электрический ток, и он сразу отклоняет волну на экране осциллографа (возникает промежуточный пик). При УЗК датчик посылает переменные короткие импульсы упругих колебаний разной длительности (настраиваемая величина, мкс.) разделяя их более продолжительными паузами (1-5 мкс.). Это позволяет определить и наличие дефекта, и глубину его залегания [91].

Наибольшее развитие и популярность получил ультразвуковой контроль (УЗК) эхо-импульсным методом, в настоящей работе данный контроль плоских образцов проводился с использованием прибора УД2В-П45 с отдельно - совмещёнными преобразователями типа П112-2,5 и П112-5. Для проведения УЗК поверхности биметаллических цилиндрических заготовок были использованы специальные отдельно-совмещенные преобразователи DF150410 с частотой 5 МГц (рисунок 2.5).



а



б

Рисунок 2.5 – Ультразвуковые преобразователи: а – для контроля образцов с радиусом поверхности 16-30 мм; б – радиус поверхности 10-15 мм.

2.2.11 Методика измерения падения напряжения по длине биметаллического токоподвода

Условия работы токоподводов в анодных ячейках при электролизе цветных металлов не позволяют использовать элементы из меди без защитного покрытия. В качестве такого покрытия в промышленности используют титан, как стойкий материал к различным коррозионным средам. Электросопротивление титана более чем 30 раз выше электросопротивление меди, поэтому при производстве двухслойных стержней важно, чтобы падение напряжения по длине токоподвода были близким к падению напряжения в медном стержне. Падение напряжения в биметаллическом стержне в основном определяется электропроводностью контакта между стержнем и слоем титана. Так как толщина титана составляет 2 мм, то падение напряжения в титане при условии прочностью сцепления слоев не должно сказаться на общем падении. Для экспериментальной проверки этих высказанных положений была разработана методика измерения падения напряжения в биметаллическом стержне на экспериментальном стенде АО «Башкирская содовая компания» (г. Стерлитамак), который имитирует работу токоподвода в электролизере (рисунок 2.6).

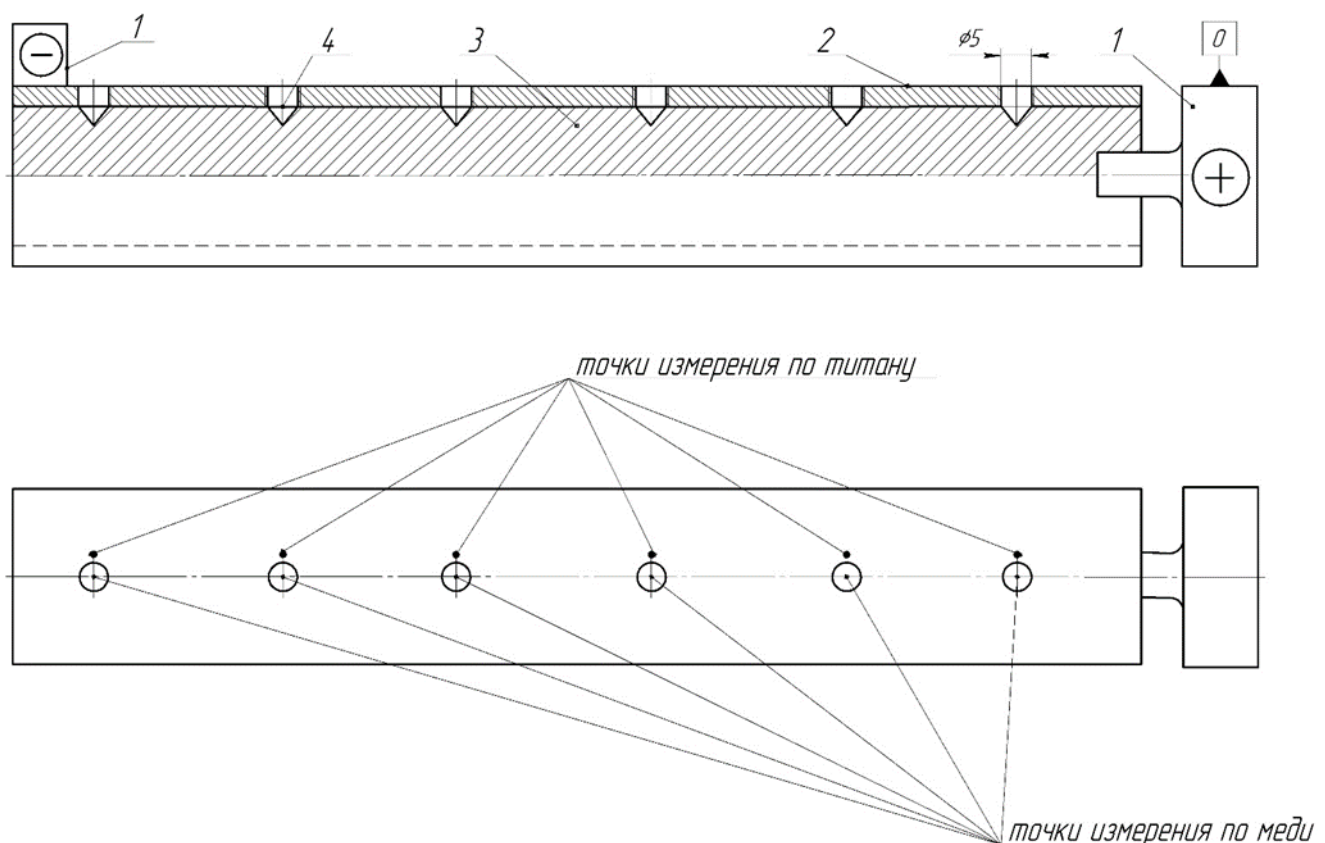


Рисунок 2.6 – Принципиальная схема измерения падения напряжения по длине токоподвода Cu+Ti: 1 – токоподвод, 2 – титановая труба, 3 – медный стержень, 4 – точки измерения

Экспериментальный стенд обеспечивал напряжение в 5В и ток в 500А, тем самым имитируя условия эксплуатации медно-титанового токоподвода.

Методика измерения предусматривала проведения замеров падения напряжения с помощью микровольтметра, подключенного к игольчатому контакту. Замеры производились на биметаллических стержнях с различной площадью контактного соединения медного сердечника с титановой трубой определяемой с помощью ультразвукового контроля (100 % сплошности и 50 %).

Для исследования влияния несплошностей в испытываемых стержнях были просверлены отверстия через каждый 190-200 мм в титановом покрытии с углублением в медный стержень.

Глава 3. Исследование особенностей получения сваркой взрывом двухслойных цилиндрических изделий

Современная техника должна удовлетворять требованиям, которые предъявляются к ней на данный момент, а также иметь определенный запас по свойствам и эксплуатационным характеристикам. Каждая отрасль нуждается в качественных материалах, способных работать в самых различных средах и выдерживать максимально возможные для конкретной конструкции напряжения. Этим требованиям удовлетворяют многослойные материалы, полученные разными способами (наплавка, прокатка, сварка и т.д.). Выбор составляющих биметалла осуществляется на основе анализа условий эксплуатации конструкции, а также особенностей образования прочного соединения слоёв при той или иной технологии получения. Как было отмечено ранее в главе 1, сварка взрывом является одним из самых оптимальных способов получения многослойных металлических материалов с различным сочетанием слоев. В основном, качество полученных соединений при сварке взрывом определяется свойствами исходных материалов и состоянием контактных поверхностей. Сваривание может возникать либо под действием высокого давления, при котором металл в области контакта находится в пластическом состоянии, либо при высокой температуре, достаточной для активации подвижности атомов кристаллической решетки, либо совместным действием давления и температуры [92]. В настоящей работе были исследованы особенности сварки взрывом жаропрочных сплавов с высокопрочной оружейной сталью на модельных плоских и трубчатых образцах.

Большое влияние на процесс образования соединения при сварке взрывом оказывают физические свойства газа, заполняющего объём между свариваемыми поверхностями. В первую очередь атмосфера в сварочном зазоре оказывает действие на формирование структуры сварного шва. Высокая температура газа в ударных волнах перед точкой контакта приводит к нагреву свариваемых поверхностей. Увеличение размеров вихревых зон и темпы их роста с удалением от начала процесса сварки свидетельствуют о повышении количества энергии, поглощаемой металлом в зоне образования сварного соединения. Причиной

увеличения поглощенной энергии с удалением от начала процесса сварки является протекание химических реакций между металлом свариваемых слоев и активными газами, кислородом и азотом. При сварке титана [58-60] имеет место возгорание частиц титана в зазоре.

При получении крупногабаритных изделий с плакировкой титановыми пластинами сварка взрывом проводится в среде инертного газа аргона, что значительно улучшает структуру сварного соединения, повышает его пластичность и стабилизирует качество сварного соединения [60]. В настоящей работе исследование влияния состава газа в сварочном зазоре на образование соединения цилиндрических изделий проведено на модельных трубных заготовках сталь+титан.

При небольших габаритах заготовок, получение сваркой взрывом двухслойных труб длиной до 500 мм не представляет сложной задачи с точки зрения сохранения целостности изделия, разработки технологических схем взрывного плакирования, обеспечения минимального уровня деформаций и возникновения дефектов сплошности. При увеличении длины соединяемых заготовок возникают проблемы, связанные со стабильностью детонации длинномерных зарядов взрывчатых веществ. Формирование соединения в длинномерных трубах и стержнях (длина более 10-20 диаметров) зависит от многих факторов, среди которых определяющими являются точность и соосность сборки, вид внутреннего опорного наполнителя, режимы сварки взрывом, влияние высокоскоростного ударно-сжатого газа,двигающегося впереди точки контакта с гиперзвуковой скоростью.

3.1 Особенности сварки взрывом жаропрочных сплавов с высокопрочной сталью по плоскопараллельной схеме плакирования

Жаропрочные стали и сплавы – это материалы, которые работают при высоких температурах в течение заданного периода времени в условиях сложнапряженного состояния [93].

В рамках диссертационного исследования были использованы жаропрочные сплавы: никель-кобальтовый сплав ЭК102, ниобиевый сплав Н65В2МЦ и оружейная высокопрочная сталь ОХНЗМ. Жаропрочный никель-кобальтовый сплав (сплав ЭК102) имеет высокую температуру плавления ($1370-1400^{\circ}\text{C}$), благодаря наличию в составе тугоплавкого металла вольфрама ($\approx 15\%$). Наличие оксидной пленки Cr_2O_3 на поверхности сплава позволяет защищать поверхность изделия от коррозии. Температура, при которой данный сплав может сохранять свои свойства достигает 1100°C , при этом предел длительной прочности при 100-часовой нагрузке равен 16 МПа [94].

Ниобиевый жаропрочный сплав Н65В2МЦ содержит в своем составе такие тугоплавкие металлы, как ниобий (основа $\approx 92\%$), цирконий, молибден и вольфрам. Данный сплав системы Nb-W-Mo-Zr относится к низколегированным жаропрочным сплавам ниобия с твердорастворным упрочнением. Благодаря оптимальному содержанию легирующих элементов он обладает уникальным комплексом физико-химических и технологических характеристик, оптимально сочетающих высокие показатели жаропрочности и низкотемпературной пластичности с хорошей технологичностью при механической обработке и сварке [95]. В силу своих физико-химических свойств, сплавы на основе ниобия склонны к интенсивному окислению при нагреве до $300-500^{\circ}\text{C}$. Поэтому все традиционные технологические операции по получению соединений данных сплавов с другими материалами необходимо проводить в защитных средах.

При сварке взрывом образование соединения происходит в результате высокоскоростной деформации, возникающей в соединяемых материалах соударения при кратковременном контактном взаимодействии. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования процесса столкновения свидетельствуют о том, что он гармонично вписывается в ряд твердофазных способов соединения металлов, протекающих в условиях термосилового воздействия по единой схеме трехстадийной топохимической реакции. Образование физического контакта между материалами сопровождается смятием

поверхностных микронеровностей, активацией контактных поверхностей, по-видимому, по дислокационному механизму [96].

Таким образом, для образования надежного соединения материалов необходимо экспериментально подобрать такие режимы, которые позволили бы активировать межатомные связи в поверхностном слое и очистить поверхности до начала схватывания свариваемых материалов. В литературе отсутствуют опубликованные данные по сварке в твёрдой фазе жаропрочных сплавов со высокопрочными сталями. Режимы сварки определяли, исходя из опыта промышленного производства биметаллических листов с плакирующим слоем из нержавеющей стали типа 12ХМ (таблица 3.1), оценке физико-механических свойств свариваемых сплавов и количественной оценке удельной кинетической энергии соударения свариваемых материалов. Степень пластической деформации металла в зоне соединения обуславливается кинетической энергией соударения свариваемых металлов [12,39,96-98].

Удельная кинетическая энергия метаемой пластины может быть выражена следующим образом [39]:

$$\omega = \frac{m_{пл} \cdot v_0^2}{2}, \quad (3.1)$$

где $m_{пл}$ – удельная масса метаемой пластины, кг/м²;

v_0 – скорость соударения метаемой пластины с поверхностью неподвижной пластины, м/с.

Удельная масса метаемой пластины определяется по формуле:

$$m = \rho \cdot \delta, \quad (3.2)$$

где ρ – плотность материала метаемой пластины, кг/м³;

δ – толщина метаемой пластины, м.

Параметры режимов сварки взрывом (таблица 3.1), таких как r , соотношение массы ВВ и массы метаемой пластины, и γ , угол столкновения пластин определены по общеизвестным формулам [15, 33].

Безразмерный параметр r определяется по формуле:

$$r = m_{ВВ} / m_{пл}, \quad (3.3)$$

где $m_{вв}$ – масса взрывчатого вещества, кг;

$m_{пл}$ – масса пластины, кг.

Скорость метания оценивают по формуле 3.2:

$$v_0 = 1,2D \frac{\sqrt{1+(32/27)r}-1}{\sqrt{1+(32/27)r+1}}, \quad (3.4)$$

где D – скорость детонации, м/с.

При параллельном расположении пластин угол соударения рассчитывается по формуле 3.3:

$$\gamma = 2\arcsin[v_0/(2D)], \quad (3.5)$$

Таблица 3.1 Сводная таблица параметров сварки взрывом и предела прочности на отрыв плакирующего слоя

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_v , 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»

Сварка взрывом сплавов Н65В2МЦ и ЭК102 со сталью ОХНЗМ производилась по плоскопараллельной схеме, представленной на рисунке 3.1 [99].

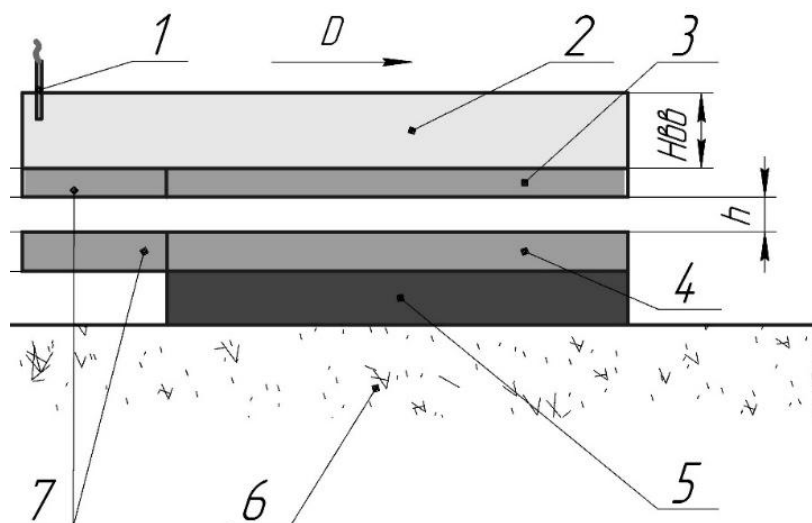


Рисунок 3.1. – Схема сборки: 1 – детонатор, 2 – заряд ВВ, 3 – метаемая пластина, 4 – основная пластина, 5 – подкладной лист, 6 – песчаная основа, 7 – технологический элемент; h – сварочный зазор, $H_{вв}$ – толщина взрывчатого вещества

Сборка под эксперимент проводилась по следующей технологии: на песчаную основу укладывалась подкладная стальная пластина 5 толщиной 15 мм. На данную пластину устанавливался лист 4 из стали ОХНЗМ толщиной 10 мм, а затем на него с зазором 1,5 мм устанавливалась пластина 3 из жаропрочного сплава ЭК102/Н65В2МЦ толщиной 1,5 мм. К плакируемым заготовкам приваривались технологические пластины 7 в виде полос из стали. Это необходимо для уменьшения зоны начального непровара [100].

В результате экспериментальной работы были получены образцы биметалла размером 11,5×100×300 мм (рисунок 3.2).

Толщина плакирующего слоя составляла 1,5 мм. Для изготовления образцов на отрыв плакирующего слоя и микрошлифов были вырезаны участки биметалла толщиной 6 мм, содержавшего нержавеющую сталь 12Х18Н10Т с верхнего технологического слоя. Результаты механических испытаний представлены в таблице 3.1.



Рисунок 3.2 – Полученные сваркой взрывом биметаллические пластины.

Анализ результатов экспериментов показал, что увеличение параметра r до значений 1,5-1,6 не обеспечивают равнопрочное соединение с ниобиевого сплава Нб5В2МЦ с высокопрочной сталью, а при сварке сплава ЭК102 соединение не образовалось. Увеличение скорости детонации в 1,2 раза и параметра r до 2,2 обеспечивало получение равнопрочное соединение сплава ЭК102 со сталью ОХНЗМ.

Для исследования микроструктуры зоны соединения были изготовлены микрошлифы из конечной области сваренного биметалла на расстоянии 50 мм от конца биметаллических пластин.

Металлографические исследования и энергодисперсионный анализ границы соединения Нб5В2МЦ+ОХНЗМ (рисунок 3.3, таблица 3.2) показали:

1. Граница соединения сформирована в виде неравномерной волнистой линии с локальными микроучастками литых включений расположенных на гребнях волн.

2. Литые включения имеют сложное строение. Литое ядро, содержащее преимущественно элементы сплава, окружено слоем со смешанным составом. Переходные зоны со смешанным составом (точки 3 и 5 на рисунке 3.3, б) имеют практически постоянное содержание элементов (таблица 3.2).

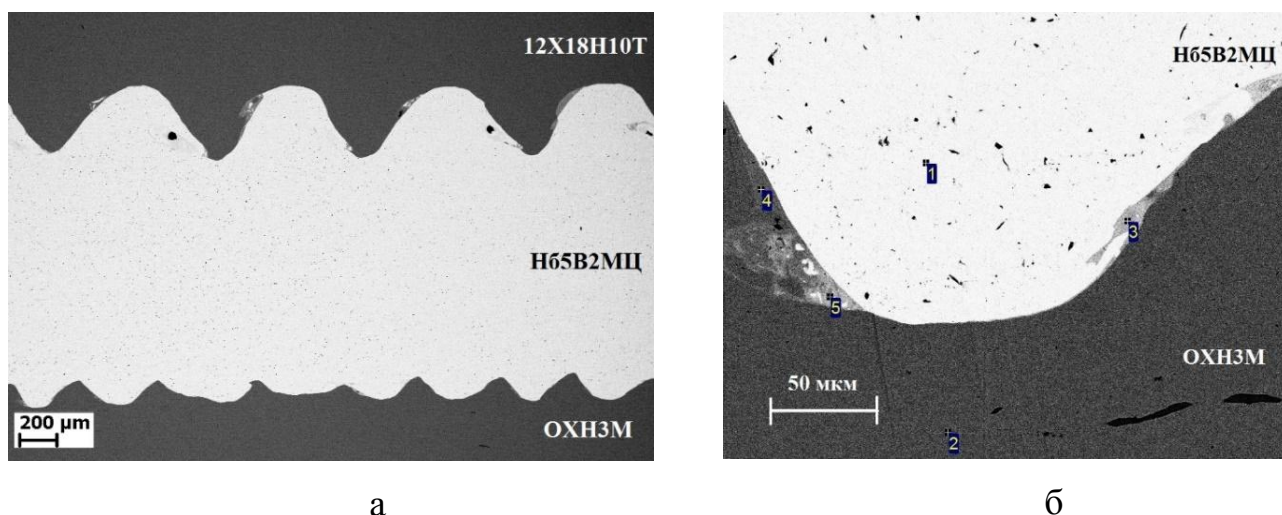


Рисунок 3.3 Граница соединения в продольном сечении: а – граница соединения в продольном направлении трёхслойного образца; б – определение химического состава литых включений.

Таблица 3.2. Результаты энергодисперсионного анализа (масс. %) зон соединения H65B2MЦ+ОХНЗМ

№ точки измерения	C	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb	W
1	4,47	3,08	0,51	-	-	-	-	-	88,06	3,88
2	3,21	-	0,78	0,41	1,39	0,75	89,84	3,62	-	-
3	1,90	-	0,57	-	1,17	-	63,78	1,86	30,72	-
4	4,40	-	0,75	-	1,44	-	85,95	3,32	4,15	-
5	2,46	-	0,65	-	1,10	-	61,30	2,43	29,81	2,25

Микроструктурные исследования зоны соединения ЭК102+ОХНЗМ (рисунок 3.4) показали:

1. Граница соединения представляет собой равномерную симметричную пологоволнистую линию с длиной волны 900-950 мкм и высотой 200-250 мкм.
2. В пограничном слое имеются локализованные микроучастки литых включений с переходным составом из исходных элементов (таблица 3.3).

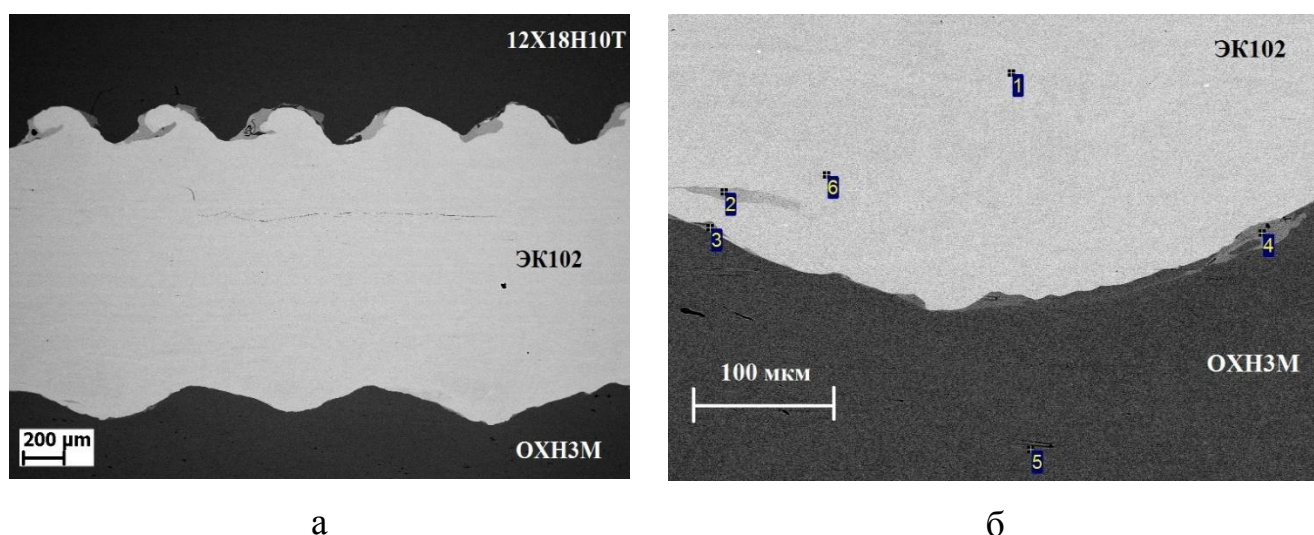


Рисунок 3.4 Граница соединения в продольном сечении: а – граница соединения трёхслойного образца; б –определение химического состава в околошовной зоне.

Таблица 3.3. Результаты энергодисперсионного анализа химического состава (масс. %) зоны соединения ЭК102+ОХНЗМ

№ точки измерения	C	Al	Si	S	V	Cr	Fe	Co	Ni	La	W
1	1,54	1,28	-	-	-	20,76	-	27,20	35,20	-	14,02
2	2,08	1,10	-	-	-	13,38	28,03	18,98	26,75	-	9,67
3	2,01	0,98	-	-	-	7,29	64,16	8,24	12,76	-	4,57
4	2,40	0,82	-	-	-	6,45	68,04	7,26	11,53	-	3,49
5	3,77	0,69	0,30	-	0,56	1,48	90,08	-	3,12	-	-
6	2,07	1,32	-	0,65	-	19,85	0,56	26,23	33,99	1,89	13,45

На основании металлографических исследований плоских образцов установлено, что структура границы соединения волнообразная с микроучастками литых включений переходного состава, не содержит микротрещин, пор и несплошностей. Трудности сварки взрывом сплава ЭК102 с высокопрочной сталью, связанные с наличием стойкой оксидной пленки из оксида хрома на поверхности сплава и его труднодеформируемостью, были преодолены усилением режимов сварки. Эксперименты и механические испытания показали, 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 успешной сварки

никель-кобальтового сплава путем повышения скорости детонации. Прочность соединения слоёв для биметалла, содержащего ниобиевый сплав, составляет 250-300 МПа, а для биметалла, содержащего сплав ЭК102, достигает 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 путем повышения высоты заряда $H_{вв}$, 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.

3.2 Получение сваркой взрывом опытных биметаллических трубных заготовок с внутренним жаропрочным слоем

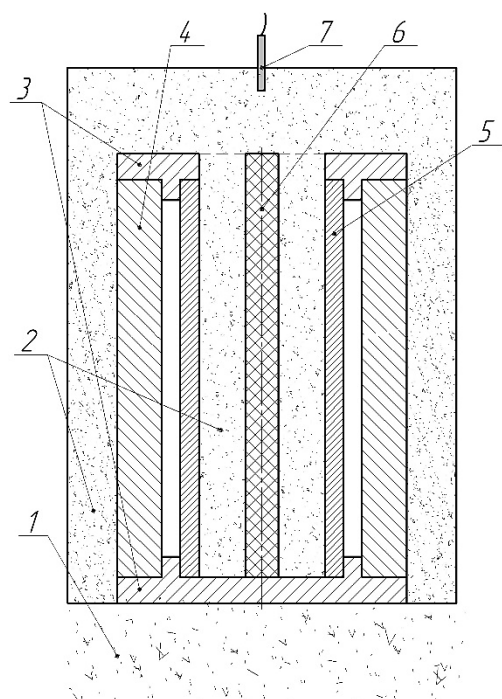
После экспериментальной отработки режимов сварки взрывом жаропрочных сплавов с высокопрочной сталью, которая показала возможность получения соединения жаропрочных сплавов, решалась задача получения биметаллических трубных заготовок с тем же сочетанием слоев, что и в плоском варианте. Параметры сварки взрывом указаны в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Параметры сварки взрывом трубных образцов

Материал	Скорость детонации D , м/с	Параметр r	Скорость метания V_0 , м/с	Удельная кинетическая энергия, МДж/м ²
Метаемая труба				
Н65В2МЦ/ЭК102	3700	1,2	959	10,5
ОХНЗМ	3700	0,4	413	6,025

В качестве исходных материалов использовались трубы длиной 200 мм – из жаропрочных сплавов ЭК102/Н65В2МЦ (32×2,5 мм) и стали ОХНЗМ (55×9 мм). Согласно разработанной схеме (рисунок 3.5, а) внутрь цилиндрической заготовки 8 из стали ОХНЗМ устанавливается труба 7 из жаропрочного сплава. Для обеспечения требуемого зазора между заготовками и во избежание попадания в него продуктов детонации взрывчатого вещества использовалась специальная крышка 6. Собранные таким образом трубы устанавливались на металлическую

пластину 2, затем вся сборка помещалась на песчаную основу 1. Для уменьшения разлета взрывчатого вещества использовалась забойка из песка 3 (рисунок 3.5, б).



а



б

Рисунок 3.5 – Сборка исходных элементов для сварки взрывом: а – схема сборки: 1 – песчаная основа, 2 – заряд 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.

После сварки взрывом были получены биметаллические трубные заготовки длиной 200 мм (рисунок 3.6, а). Для исследований микроструктуры и механических свойств из биметаллической трубы изготавливались кольцевые образцы (рисунок 3.6, б).

Зона соединения Н65В2МЦ+ОХНЗМ представляет практически сплошную прослойку литых включений толщиной 250-300 мкм, в состав которой входят компоненты свариваемых слоев. Состав литого включения состоит практически из ниобия и железа (таблица 3.5). Микротвердость составляет 1200 НВ.



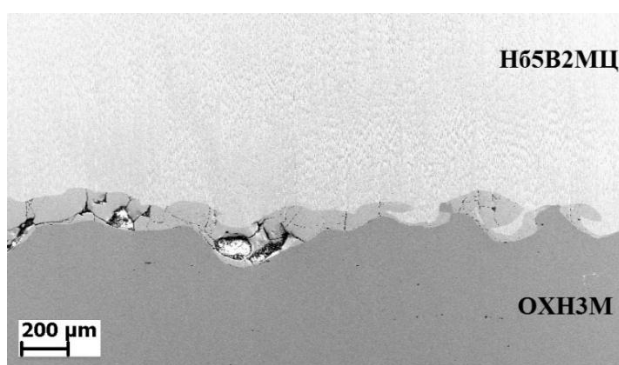
а



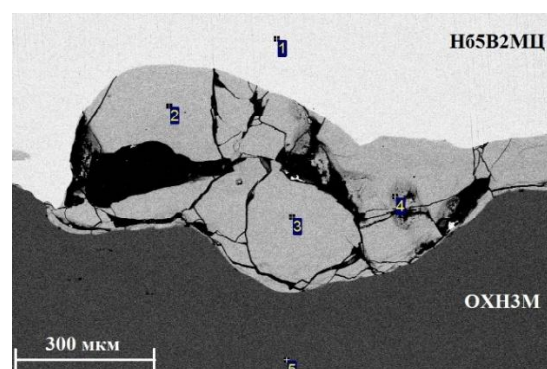
б

Рисунок 3.6 – Биметаллические трубные заготовки: а – после ультразвукового контроля; б – кольцевые биметаллические образцы (внутренний слой – жаропрочный сплав, наружный – сталь ОХНЗМ)

На рисунке 3.7 представлена граница соединения ниобиевого Н65В2МЦ со сталью ОХНЗМ в продольном направлении.



а



б

Рисунок 3.7 –Граница соединения сплава Н65В2МЦ и стали ОХНЗМ

Таблица 3.5. Результаты микрорентгеноспектрального анализа химического состава (масс. %) зоны соединения Н65В2МЦ+ОХНЗМ

№ точки измерения	Al	Si	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo	W
1	0,80	-	-	-	-	93,87	0,94	4,38
2	1,10	-	-	45,52	1,10	48,50	1,29	2,49
3	0,93	-	0,61	45,81	1,10	47,42	1,44	2,69
4	0,78	-	0,76	51,19	0,96	43,56	0,80	1,94
5	1,06	0,54	0,91	95,11	2,38	-	-	-

Зона сварного соединения содержит дефекты кристаллизационного характера, такие как микротрещины и поры, не выходящие за пределы прослойки (рисунок 3.8, *а* и *б*) [101].

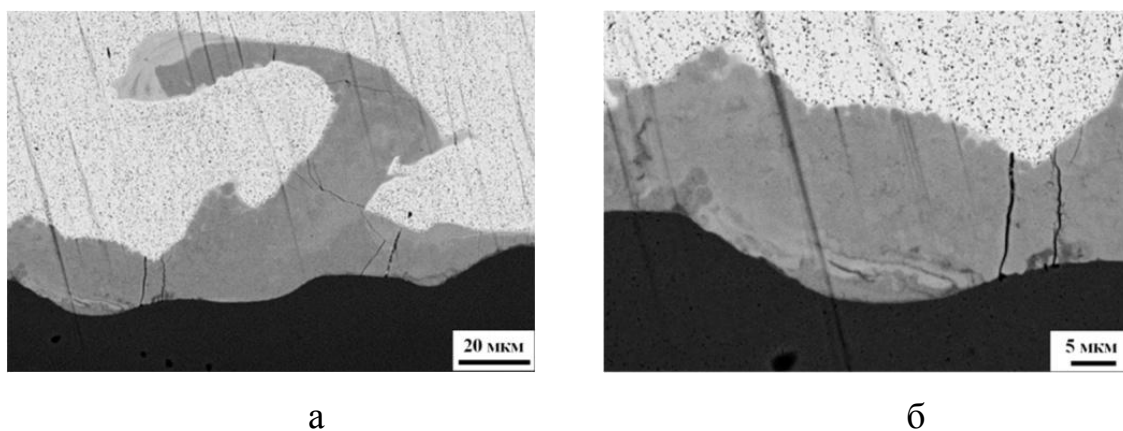
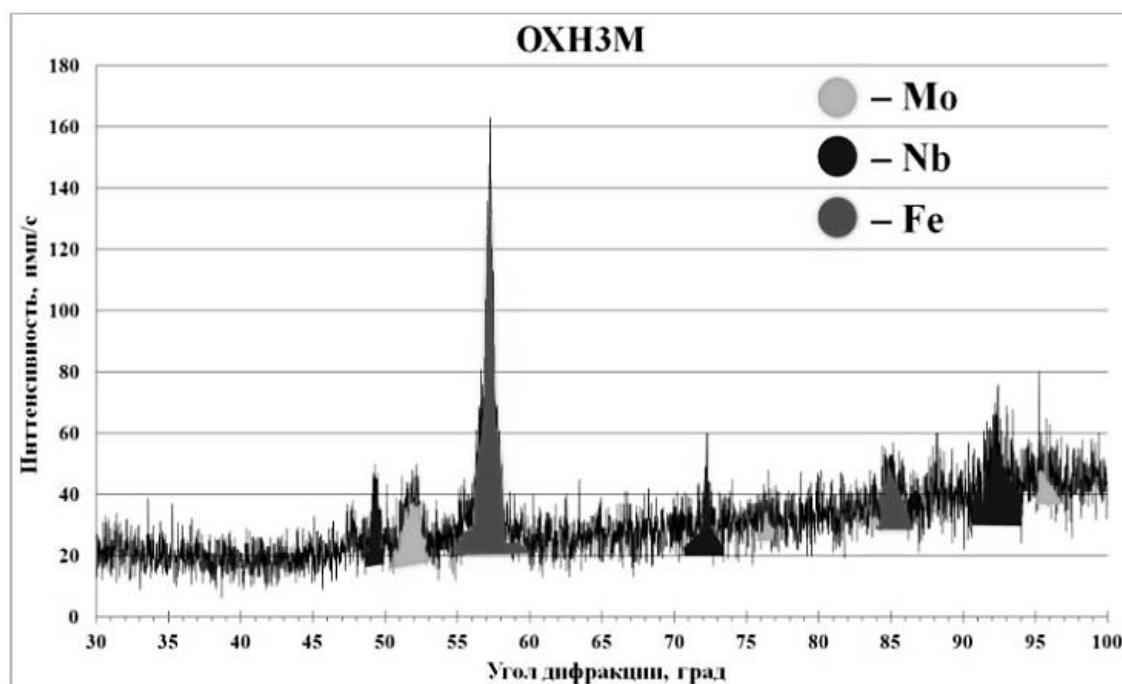
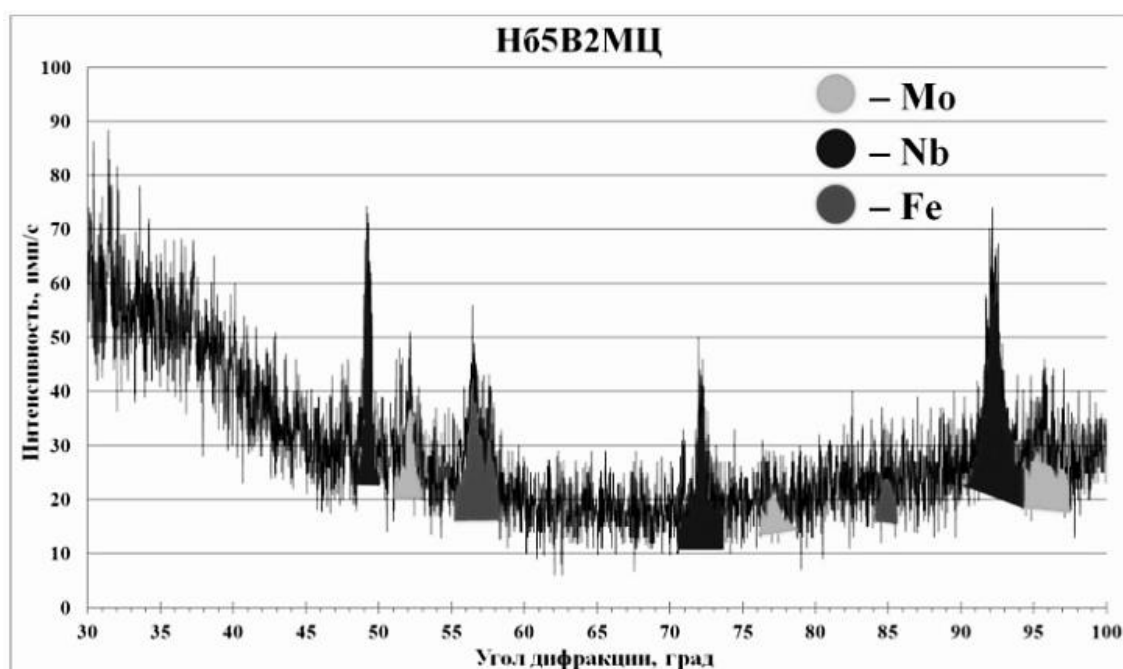


Рисунок 3.8 – Зоны расплава в околошовной области биметаллической трубы ОХНЗМ+Н65В2МЦ (продольное сечение)

Результаты рентгенофазового анализа (рисунок 3.9) и анализа диаграммы состояния двойных сплавов системы Fe-Nb [102] показали, что на границе соединения образуется слой литых включений, состоящий в основном из интерметаллидов ниобия и железа типа FeNb и Fe₂Nb.



а



б

Рисунок 3.9 – Рентгенограмма переходной зоны биметалла ОХНЗМ+Н65В2МЦ после сварки взрывом: а) граница соединения со стороны стали ОХНЗМ; б) граница соединения со стороны ниобиевого сплава Н65В2МЦ

На рисунке 3.10 показаны результаты измерения микротвердости в зоне сварного соединения для цилиндрических биметаллических образцов ОХНЗМ+Н65В2МЦ. Как видно, характер распределения микротвёрдости в зоне соединения Н65В2МЦ+ОХНЗМ типичный для сварки взрывом. Наблюдается упрочнение слоёв в контактной зоне, микротвердость стали ОХНЗМ меняется от 450HV до 510HV, а в сплаве Н65В2МЦ имеет место резкое повышение микротвердости в зоне, прилегающей к границе соединения с 280HV до 480HV.

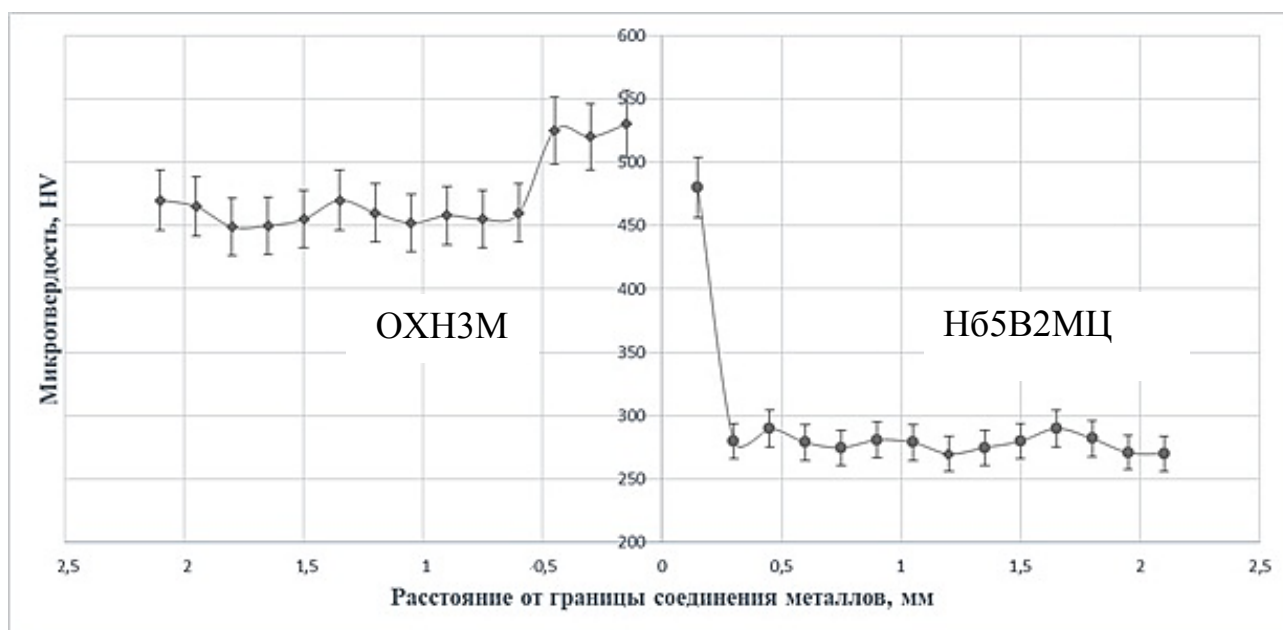


Рисунок 3.10 – Распределение микротвердости HV в околошовной зоне по толщине сваренного взрывом соединения Н65В2МЦ+ОХНЗМ

Граница раздела в биметалле ЭК102+ОХНЗМ представляет собой линию с нерегулярным профилем (рисунок 3.11). По всей длине соединения присутствуют локализованные участки с литыми включениями, имеющие усадочные пустоты. При этом, стоит отметить, что данные области не перерастают в сплошную прослойку, а, следовательно, имея небольшие линейные размеры, качественно не влияют на сцепление слоев в макромасштабе. Литые включения образовались в результате перемешивания элементов свариваемых материалов и быстрой кристаллизации расплава в замкнутом микрообъеме [103].

Литые включения в переходных зонах неоднородны, их состав, состоящий преимущественно из элементов исходных материалов, меняется по длине сварного соединения (таблица 3.6).

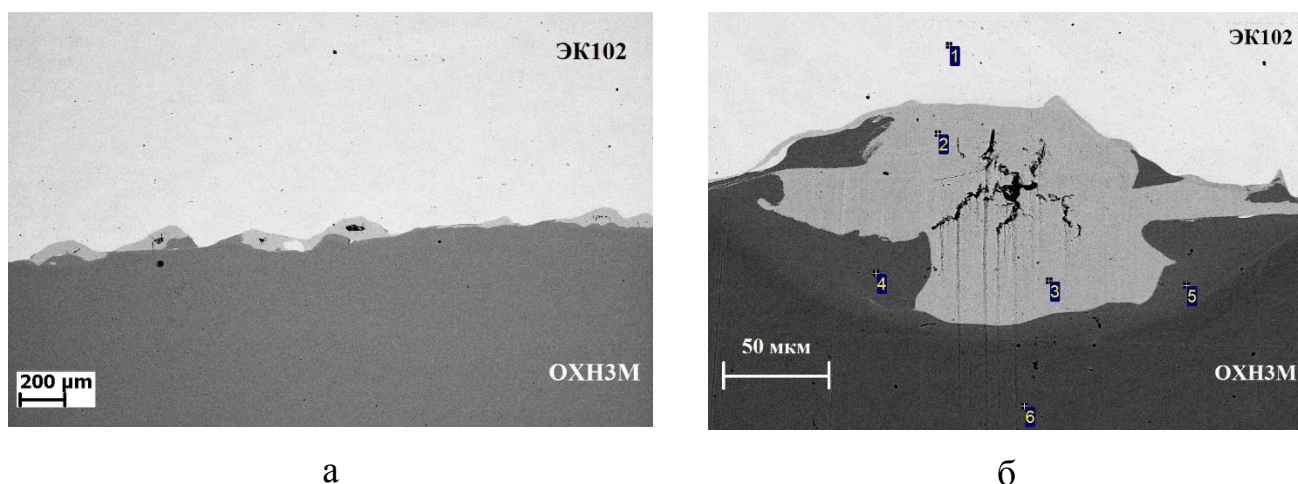


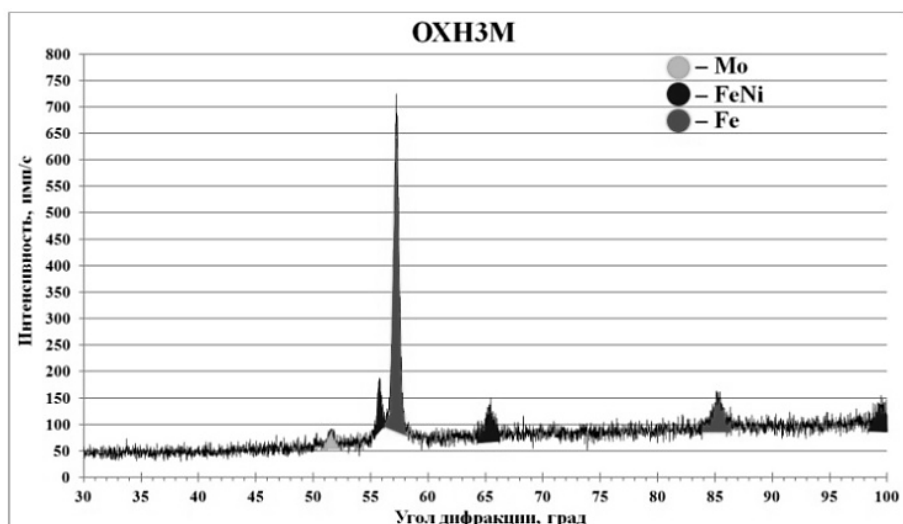
Рисунок 3.11 – Граница соединения сплава ЭК102 и стали ОХНЗМ

В состав литого включения, которое имеет строгие границы, входят наряду с железом элементы жаропрочного сплава (хром, никель, кобальт и вольфрам). За пределами включения со стороны стали находится зона (5 и 6), окружающая литое включение. Элементный состав этой зоны соответствует составу стали ОХНЗМ.

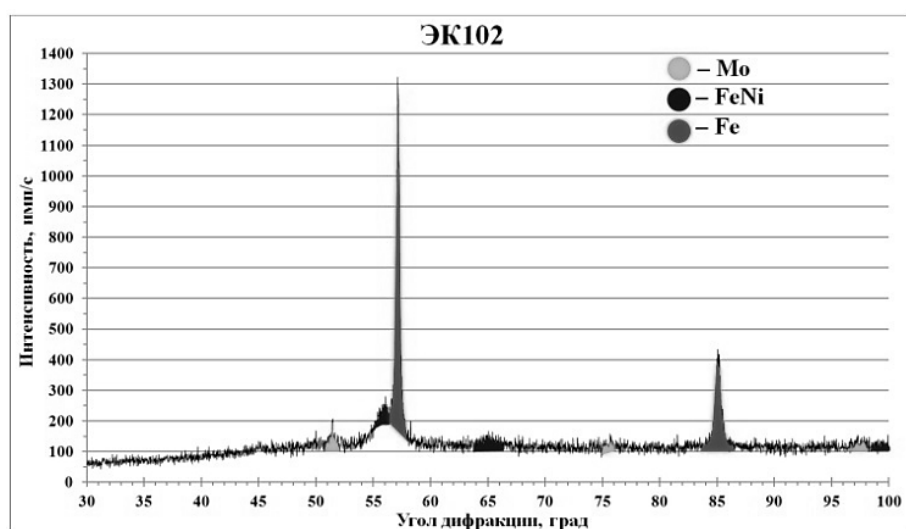
Таблица 3.6 – Результаты энергодисперсионного анализа химического состава (масс. %) зоны соединения ОХНЗМ+ЭК102

№ точки измерения	Al	Cr	Fe	Co	Ni	W
1	1,28	21,88	0,98	26,75	34,52	14,60
2	1,23	13,97	38,72	15,78	21,64	8,65
3	0,97	14,26	37,82	16,21	21,58	9,17
4	0,89	0,99	96,14	-	1,98	-
5	0,90	1,03	95,86	-	2,21	-
6	0,93	1,00	95,73	-	2,35	-

Рентгенофазовый анализ поверхностей после механического отделения плакирующего слоя от основного (рисунок 3.12, а и б) с учетом диаграммы состояния двойной системы Ni-Fe [101] показал, что на границе соединения при кристаллизации локальных участков расплавов образовался твердый раствор железа с никелем легированный молибденом, вольфрамом, хромом и кобальтом.



а



б

Рисунок 3.12 – Рентгенограмма переходной зоны биметалла ОХНЗМ+ЭК102 после сварки взрывом: а) граница соединения со стороны стали ОХНЗМ; б) граница соединения со стороны никель-кобальтового сплава ЭК102

Для биметаллической трубы ОХНЗМ+ЭК102 графики распределения микротвердости (рисунок 3.13) обнаруживают повышенную микротвердость в контактной зоне: в стали ОХНЗМ выявлено резкое увеличение значения микротвердости с 460HV до 630-650HV. В слое из жаропрочного сплава ЭК102 микротвердость увеличивается плавно, достигая своего максимального значения на границе с литым включением.

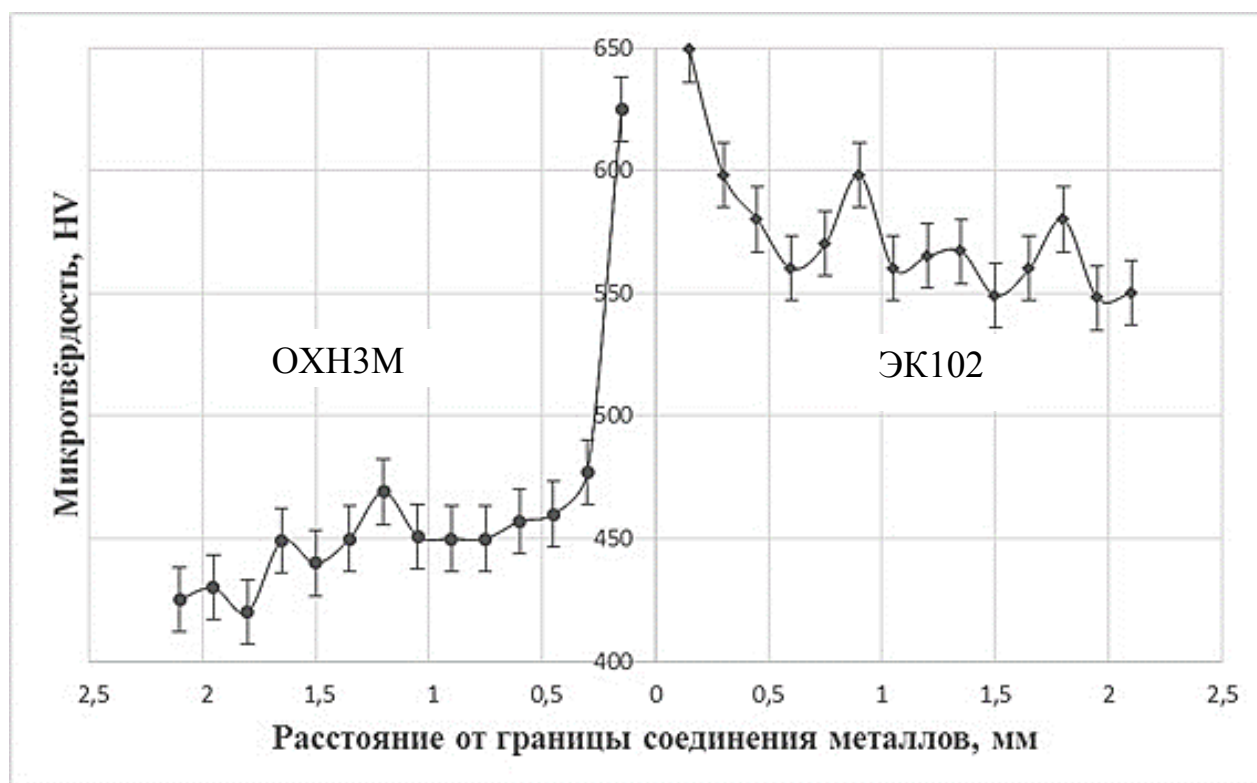


Рисунок 3.13 – Распределение микротвердости HV в околошовной зоне по толщине сваренного взрывом соединения ОХНЗМ+ЭК102

В работе была использована методика качественного определения прочности сцепления слоев, испытанием на сплющивание биметаллического кольца по ГОСТ 8695-75 «Трубы. Метод испытания на сплющивание», вырезанного из середины цилиндрического образца ОХНЗМ+ЭК102, полученного сваркой взрывом (рисунок 3.14) на разрывной машине Instron 1195.

Проведенные испытания цилиндрических образцов биметалла показали отсутствие участков расслоения и трещин на образцах, что свидетельствует о прочном соединении составляющих слоев.

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 Нб5В2МЦ

необходима корректировка режимов в сторону уменьшения скорости детонации, что позволит не допустить появления сплошных прослоек расплавов.



а



б

Рисунок 3.14 – Образцы на радиальное сжатие (внутренний слой – ЭК102, внешний слой – ОХНЗМ): а – образец перед испытанием; б – после испытания

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 при сварке плоских образцов.

3.3 Исследование влияния состава газа в сварочном зазоре на процесс образования соединения при сварке взрывом модельных трубных заготовок сталь 20+титан ПТ7-М

Сварка взрывом титана со сталью, особенно крупногабаритных изделий, проводится с заполнением зазора между свариваемыми поверхностями (сварочный зазор) инертными газами, либо с созданием разрежения воздуха (вакуумирование зазора) [47,51,59-60]. Данные меры позволяют исключать насыщение титана кислородом и азотом, тем самым предотвращать

дополнительное выделение тепла в зоне контакта [59]. Известно, что на границах соединений пластин титана и стали, сваренных взрывом нередко наличие вихревых зон, внутри которых присутствуют микротрещины, обусловленные возникновением хрупких интерметаллидов [105]. Для устранения описанных выше дефектов перспективна технология с применением тонких барьерных вставок, введенных между заготовками [106,107].

Согласно работам [44-48] соударение пластин при сварке взрывом сопровождается образованием ударно-сжатого газа (далее УСГ) в зазоре, который распространяется со гиперзвуковой скоростью (свыше 5М). При этом происходит нагрев ударно-сжатого газа, возрастает его плотность и давление. УСГ нагревает поверхности свариваемых пластин до их соударения, что может повлиять на качество соединения. В случае сварки взрывом цилиндрических изделий истечение газа отсутствует. По мере прохождения УСГ по зазору имеет место его постоянное накопление по массе. Линейное увеличение массы УСГ по длине свариваемых поверхностей влияет на процесс соединения: происходит более раннее образование сплошных прослоек литого металла, чем при сварке взрывом листов.

Рассмотрим тепловое воздействие ударно-сжатого газа на расстоянии L от начала соударения труб. Тепловой поток из газа на поверхность пластины определяется уравнением [46]:

$$q = St \cdot \rho_{\Gamma} \cdot u \cdot C_p \cdot (T_{\text{в}} - T_0), \quad (3.6)$$

где q – тепловой поток из газа на поверхность пластин, Дж/м²·с;

St – число Стентона;

C_p – теплоёмкость газа в сварочном зазоре, Дж/кг·К;

ρ_{Γ} – плотность газа в сварочном зазоре, кг/м³;

u – массовая скорость газа за фронтом ударной волны, м/с;

$T_{\text{в}}$ – температура восстановления, °К;

T_0 – начальная температура стенки металла (293°К).

Число Стентона существенно зависит от характера обтекания поверхностей газовым потоком. При турбулентном обтекании пластин газовым потоком число Стентона определяется:

$$St_r = \frac{1}{8(2 \lg \frac{a_p}{k} + 1,74)^2}, \quad (3.7)$$

где a_p – расстояние между пластинами, мм;

k – средний размер шероховатости поверхностей, мм.

При торможении потока в пограничном слое кинетическая энергия газа превращается в тепло, и температура повышается. Если бы поток тормозился полностью, то температура увеличивалась бы до определённого значения. В случае, когда число Маха M больше единицы, то температура торможения близка к температуре восстановления и определяется по формуле: [108]:

$$T_v = T_+ \cdot \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M^2\right), \quad (3.8)$$

где T_+ – термодинамическая температура газа, °К;

M – число Маха;

γ – показатель адиабаты (для воздуха – 1,44, для гелия – 1,61).

Термодинамическая температура при сварке взрывом равна температуре ударно-сжатого газа, которая определяется уравнениями ударной адиабаты, приведенными в [109].

В предположение постоянного теплового потока из газа в металл поверхность нагревается по закону [46]:

$$T_c = \frac{q}{2\lambda} \cdot \sqrt{6at} + T_0, \quad (3.9)$$

где λ – теплопроводность свариваемых поверхностей, Вт/м·К;

a – температуропроводность материала свариваемых поверхностей, м²/с;

t – время воздействия теплового потока на поверхности, с.

T_c – это максимальная температура, до которой может нагреться поверхность металла в зависимости от скорости точки контакта и условия на бесконечности.

Глубина ξ , на которую может расплавиться металл, определяется по формуле [46]:

$$\xi = \frac{q \cdot t}{\rho_{Me} \cdot r_{Mi}}, \quad (3.10)$$

где q – тепловой поток из газа в металл, Дж/м²·с;

ρ_{Me} – плотность металла, кг/м³;

r_{Mi} – теплота плавления металла, Дж/кг.

Глубина расплавленного слоя металла ξ определяется по формуле [46]:

$$\xi = \xi_{пл} + \xi_{осн}, \quad (3.11)$$

где $\xi_{пл}$ – глубина проплавления плакирующего материала, мкм;

$\xi_{осн}$ – глубина проплавления основного слоя, мкм.

Для расчёта глубины проплавления пары титан+сталь выполняется условие $\xi_{пл} \neq \xi_{осн}$, так как теплофизические свойства свариваемых материалов различны и глубина проплавления их различна. Таким образом глубина проплавления при сварке взрывом титан+сталь будет рассчитываться:

$$\xi_{Ti+Cm} = \xi_{Ti} + \xi_{Cm}, \quad (3.12)$$

где ξ_{Ti} – половина глубины проплавления при сварке титан+титан, равная:

$$\xi_{Ti} = \frac{\xi_{Ti+Ti}}{2}, \quad (3.13)$$

ξ_{Cm} – половина глубины проплавления при сварке сталь+сталь, равная

$$\xi_{Cm} = \frac{\xi_{Cm+Cm}}{2}, \quad (3.14)$$

Расчёт толщины проплавления по формулам 3.10-3.14 производился для скорости точки контакта 2600 м/с при заполнении сварочного зазора воздухом, аргоном и созданием в сварочном зазоре разрежения (форвакуум) 16-20 кПа.

Расчёты показывают, что при создании разрежения 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 [47]. Однако принятая методика расчёта не учитывает отсутствие нагрева при горении титана. Следовательно, толщина прогрева, полученная расчетным путем должна быть выше, чем полученная путем замеров площадей литых включений, что и было подтверждено в ходе металлографических исследований. На рисунке 3.15 представлены графики зависимостей расчетной глубины проплавления по длине трубной заготовки от вида газовой атмосферы в зазоре с указанием экспериментальных данных, полученных в результате измерений площадей литых включений.

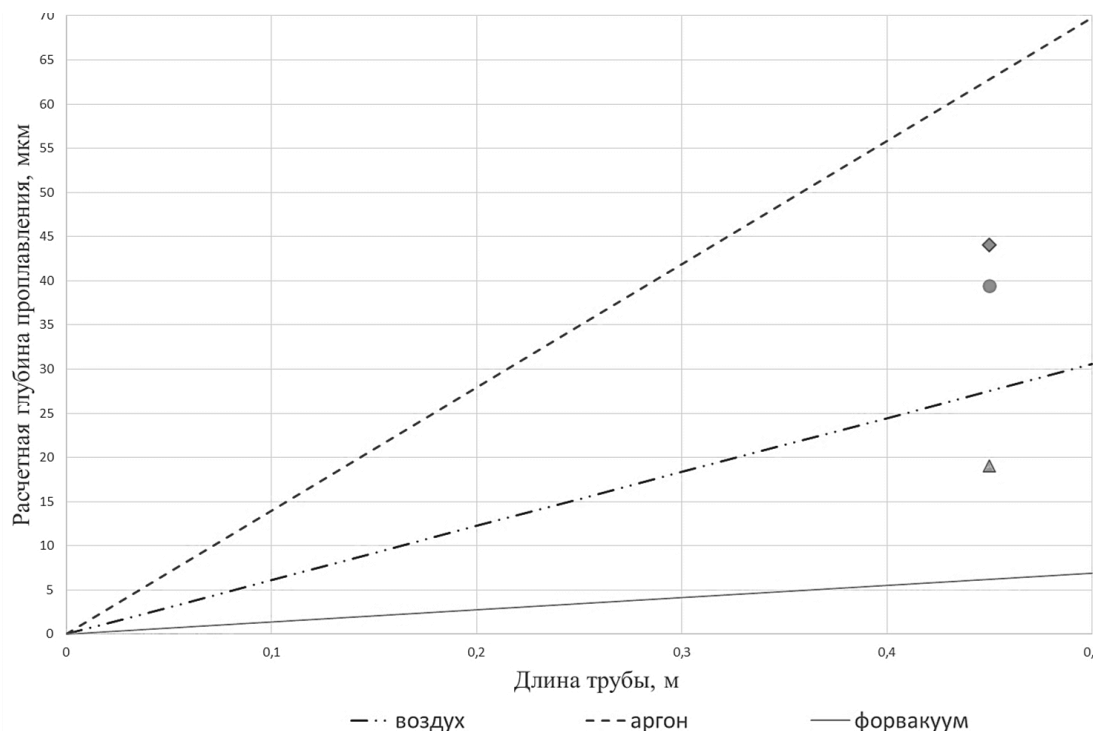


Рисунок 3.15– График зависимости теоретической глубины проплавления от вида атмосферы в зазоре: экспериментальные данные

◆ – в среде аргона; ● – воздух; ▲ – форвакуум

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных показал, что, литые включения не образуют сплошной прослойки и их толщина меньше расчётной в случае заполнения сварочного зазора инертным газом аргоном, при этом количество литых включений максимальное в сравнении с другими атмосферами, это указывает на то, что аргон минимизировал влияние горения частиц титана в зазоре, однако вследствие большей плотности в ударно-сжатом состоянии он прогревает большую площадь поверхности, чем при использовании воздушной атмосферы. При заполнении зазора атмосферным воздухом литые включения образуют сплошную прослойку на границе соединения, а их замеренная толщина оказалась выше расчетной, что доказывает факт дополнительного нагрева за счет возгорания частиц титана в процессе сварки взрывом.

Применение форвакуума минимизировало количество литых включений за счет уменьшения плотности воздуха. Для обеспечения минимального количества литых включений целесообразно применять в качестве защитной атмосферы разреженный аргон.

С учётом результатов расчёта влияния газов в сварочном зазоре на процесс образования соединения и опыта изготовления цилиндрических заготовок эксперименты проводили в трёх вариантах с заполнением сварочного зазора воздухом, разреженным воздухом (16-20 кПа) и аргоном.

Исходные заготовки:

- наружный слой – труба из стали 20 размерами: диаметр 57 мм, толщина стенки 6 мм, длина 500 мм;
- внутренний слой – труба титановая ПТ-7М размерами: диаметр 42 мм, толщина стенки 6 мм, длина 500 мм.

Все заготовки были получены по одному режиму (в качестве взрывчатого вещества использована смесь микропористой гранулированной аммиачной селитры с дизельным топливом в соотношении 90:4). После сварки взрывом проводился ультразвуковой контроль сплошности соединения (рисунок 3.16).



Рисунок 3.16 – Внешний вид заготовки после сварки взрывом (белым отмечена зона несплошности в начале и конце заготовки).

На рисунке 3.17 представлены двухслойные цилиндрические заготовки после обрезки концевых частей (рисунок 3.17, а) и отбора кольцевых образцов для металлографических исследований (рисунок 3.17, б).



а



б

Рисунок 3.17 – Внешний вид заготовок после обработки их торцов: а – после обрезки концевых непроваров; б – после изготовления цилиндрических образцов

Для исследования структуры соединения слоёв изготавливали кольцевые макрошлифы (рисунок 3.18).



Рисунок 3.18 – Кольцевые биметаллические макрошлифы для исследования микроструктуры в поперечном направлении

На макрошлифах определяли локализацию участков максимальных по толщине оплавов. На основании данных исследований определяли участки для дальнейшего изучения микроструктуры границы раздела в продольном направлении (вдоль осевой линии трубных заготовок). Кольцевые образцы разделялись на две части и изготавливались шлифы для исследования структуры (рисунок 3.19).



Рисунок 3.19 – Микршлифы для исследования структуры соединения в биметаллической трубе сталь 20+ титан ПТ-7М в продольном направлении

Исследования структуры соединения проводили с двух противоположных сторон биметаллической заготовки. Форму и состав литых включений, замеры площадей оплавов проводили методами оптической и электронной микроскопии. Результат изучения микроструктуры соединения во всех трубных образцах на границе соединения сталь 20+титан ПТ-7М обнаружил следующие особенности (рисунок 3.20):

Микроструктура соединения во всех трубных образцах на границе соединения сталь 20+титан ПТ-7М в целом имеет следующие особенности (рисунок 3.20):

1. Со стороны стали вблизи зоны контакта наблюдается интенсивная пластическая деформация зерен с вытяжением их вдоль границы соединения (рисунок 3.20а).

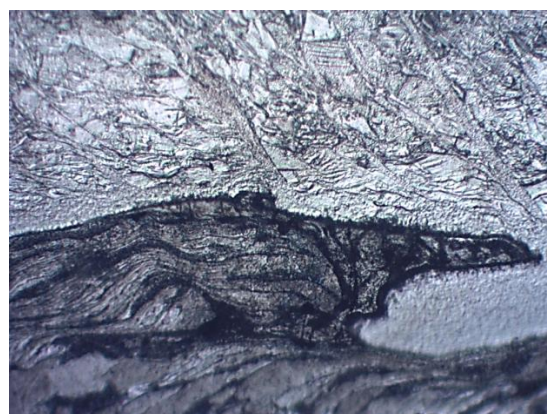
2. Со стороны титана вдоль зоны контакта наблюдается зона динамической рекристаллизации, выраженная в формировании микрокристаллической

структуры. За зоной динамической рекристаллизации в титане наблюдаются полосы локализованного сдвига, расположенные под углом ≈ 45 градусов к границе раздела (рисунок 3.20, *а*). Полосы также имеют микрозернистую кристаллическую структуру, соответствующую процессу динамической рекристаллизации (рисунок 3.20, *б*). Трещин в полосах локализации и в зоне контакта обнаружено не было. Между полосами локализованного сдвига наблюдается двойникование зерен по одной из систем скольжения (рис 3.20, *б* и *в*). Описанная структура соответствует структуре титана, подвергнутого ударно-волновому нагружению.

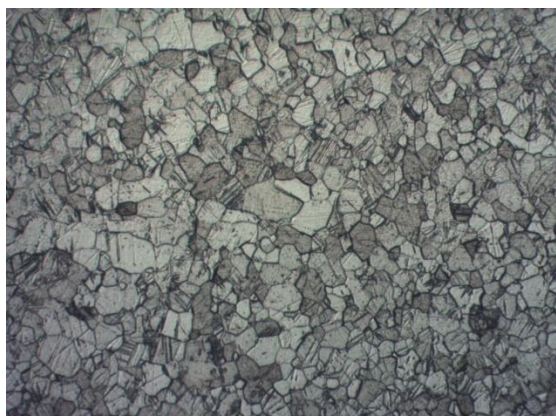
3. В гребнях волн имеются литые включения (рисунок 3.20, *г*). Их размер зависит от газовой среды в сварочном зазоре и меняется в зависимости расстояния от точки инициирования процесса.



а (x200)



б (x400)



в (x200)



г (x100)

Рисунок 3.20 – Структура сварного соединения сталь 20 + титан ПТ-7М.

Таким образом, атмосфера в сварочном зазоре влияет на количество и расположение литых включений вдоль границы соединения.

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 3.21, *а*) вплоть до появления сплошной полосы литых включений на границе соединения (рисунок 3.21, *б*).

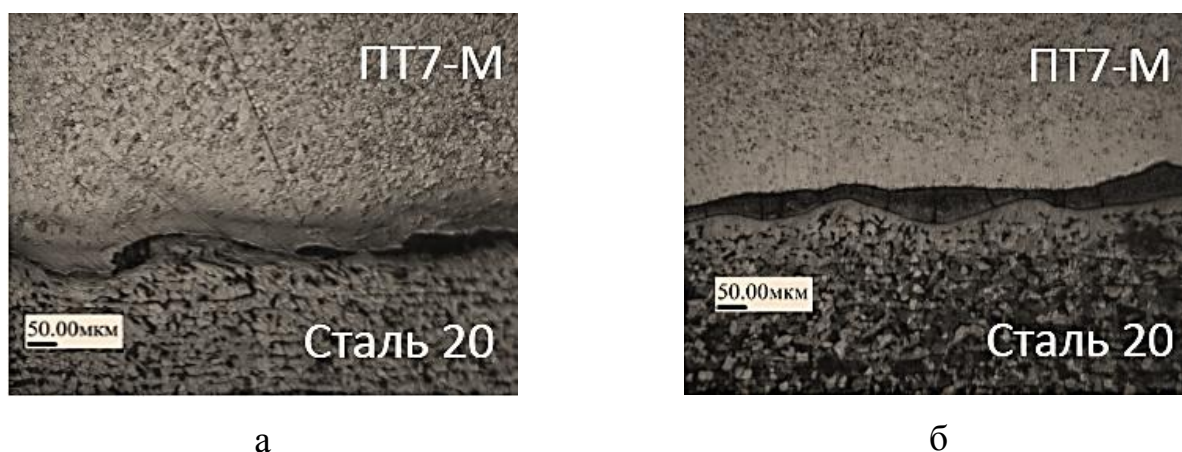


Рисунок 3.21 – Контактная граница соединения сталь+титан, полученная сваркой взрывом (в зазоре атмосферный воздух): а – начальный участок; б – конечный участок

В образцах, сваренных с заполнением сварочного зазора аргоном в начальной части образцов литых включений практически не наблюдается (рисунок 3.22, *а*). К конечной части образцов имеются дискретно расположенные литые включения (рисунок 3.22, *б*) с усадочными раковинами и трещинами, не выходящими за пределы литой прослойки.

На рисунке 3.23 показана микроструктура границы соединения, полученного при создании в сварочном зазоре разреженного воздуха. Литые включения расположены локально на гребнях волн и имеют минимальные размеры.



Рисунок 3.22 – Граница соединения сталь+титан, полученная сваркой взрывом (в зазоре аргон): а – начальный участок; б – конечный участок

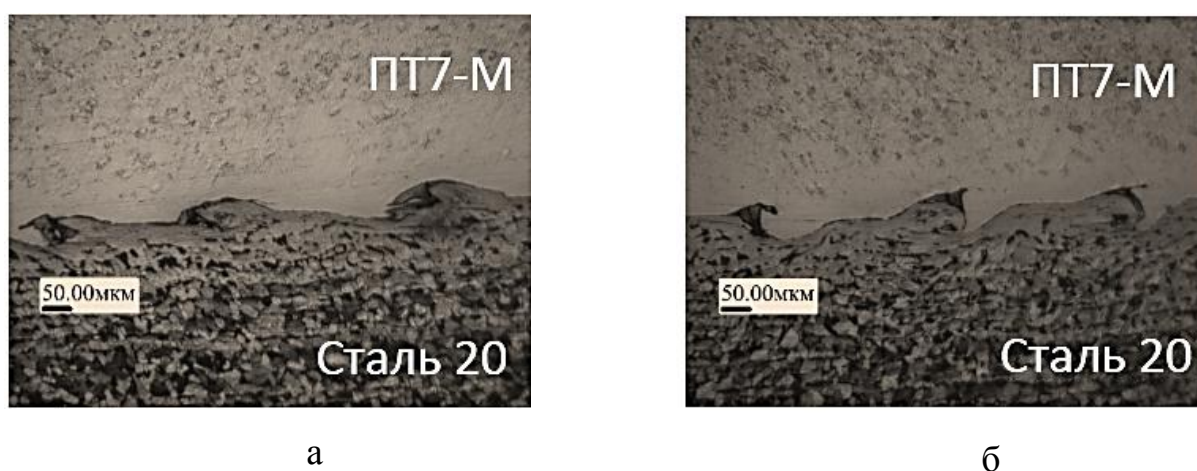


Рисунок 3.23 – Контактная граница соединения сталь+титан, полученная сваркой взрывом в разреженном воздухе: а – начальный участок; б – конечный участок

Результаты построения рентгеновских карт распределения элементов (рисунок 3.24) свидетельствуют о наличии в литой прослойке титана и железа.

Таким образом, проведенные металлографические исследования и энергодисперсионный анализ соединения цилиндрических заготовок сталь 20+титан ПТ-7М показали, что его структура на всех заготовках имеет протяжённые участки с характерной для сварки взрывом выраженной или слабовыраженной волновой структурой с литыми включениями (интерметаллидами типа $TiFe$, $TiFe_2$, Ti_2Fe).

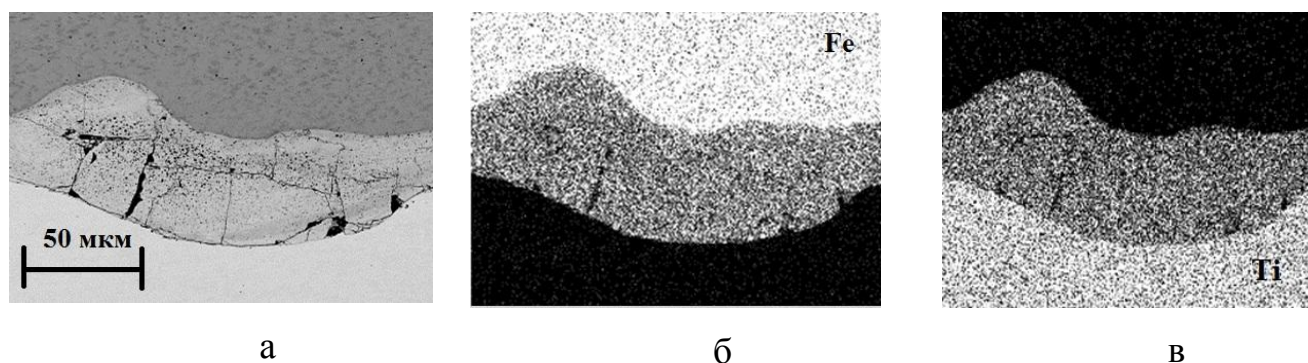


Рисунок 3.24 – Рентгеновская карта распределения элементов в литом включении в образце, сваренном на воздухе: б – железо; в – титан.

Выявлено, что количество литых включений и их расположение в соединении зависит от атмосферы в сварочном зазоре. При сварке на воздухе в конечных зонах заготовки выявлены участки сплошной полосы интерметаллида толщиной до 100 мкм. При разрежении воздуха до 16 кПа в структуре соединения наблюдаются локальные участки интерметаллидов. При сварке в аргоне размеры этих участков возрастают, но при этом сплошного слоя не образуется.

3.4 Выводы к Главе 3

1. Экспериментально установлено, что при сварке взрывом плоских образцов «высокопрочная сталь+жаропрочный сплав» для обеспечения границы соединения волнообразной формы с локальными микроучастками литых включений переходного состава без микротрещин, пор, несплошностей и прочностью соединения слоёв для ниобиевого сплава 250-300 МПа, а для сплава ЭК102 составляет 950-1000 МПа, 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. Металлографические исследования зоны соединения в модельных трубных заготовках с сочетанием слоев «сталь+жаропрочный сплав» позволили обнаружить следующие особенности структурообразования:

- в образцах с плакирующим слоем из ниобиевого сплава Нб5В2МЦ на конечных участках зона соединения представляет практически сплошную прослойку литого включения толщиной до 250-300 мкм, состоящая из интерметаллида ниобия и железа типа FeNb и Fe₂Nb с микротвердостью 1100-1200 HV. В литом включении имеются дефекты кристаллизационного характера, такие как микротрещины и поры, не выходящие за его пределы.
- граница соединения в биметалле с плакирующим слоем из никель-кобальтового сплава ЭК102 представляет собой линию с нерегулярным профилем с наличием локальных литых включений, не образующих сплошную прослойку.
- анализ результатов исследований зоны соединения биметаллических модельных трубных заготовок позволил сделать вывод, что при близких режимах сварки взрывом плоских и цилиндрических изделий в последних количество литых включений значительно увеличено, что в данной работе связывается с воздействием на свариваемые поверхности ударно-сжатого газа, движущегося с гиперзвуковой (свыше 5М) в сварочном зазоре при отсутствии бокового истечения газа.

3. Механические испытания на сплющивание биметаллических кольцевых образцов показали, что получены прочные двухслойные изделия цилиндрической формы с заданным сочетанием слоев «жаропрочный сплав ЭК102 и высокопрочная сталь ОХНЗМ».

4. Металлографические исследования полученных сваркой взрывом трубных образцов «сталь 20+титан ПТ-7М» показали, что микроструктура соединения во всех трубных образцах на границе соединения имеет следующие особенности:

- со стороны титана вдоль зоны контакта наблюдается зона динамической рекристаллизации, за которой в титане наблюдаются полосы локализованного сдвига, расположенные под углом ≈ 45 градусов к зоне контакта.

- трещин в полосах локализации и в зоне соединения обнаружено не было. Литые включения состоят из интерметаллида типа TiFe, имеющего высокую твердость 1100-1290 HV.

6. По результатам экспериментов с заполнением сварочного зазора воздухом, аргоном и с созданием разряжения 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.

Глава 4. Разработка технологических основ производства сваркой взрывом двухслойных длинномерных цилиндрических изделий

К современному производству биметаллов сваркой взрывом предъявляются широкие требования к качеству полученных многослойных материалов. Оно должно быть подтверждено сертификатами и соответствовать государственным стандартам, техническим требованиям и условиям.

При разработке технологических основ сварки взрывом особое внимание уделяется комплексному решению всех вопросов от подготовки исходных материалов до определения параметров взрывного нагружения и контроля качества, при этом должны быть 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 максимально 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.

4.1 Разработка экспериментальных схем сварки взрывом и исследование особенностей образования соединения в длинномерных цилиндрических образцах

К полученным сваркой взрывом двухслойным заготовкам предъявляются следующие требования:

1. Обеспечение равнопрочного соединения по всей длине заготовок.
2. Сохранение заданных физико-механических и эксплуатационных свойств исходных материалов после сварки взрывом.
3. Сохранение после сварки соотношения толщин слоев.

4. Отсутствие дефектов на поверхностях (наружной и внутренней) биметаллических заготовок.

Таким образом, для решения поставленных задач и обеспечения всех требований к биметаллическим трубам и стержням необходимо разработать технологические схемы плакирования, экспериментально определить наиболее оптимальные из них с точки зрения влияния режимов сварки взрывом и вида опорного наполнителя на структуру границы соединения свариваемых материалов, которая в конечном итоге влияет на сплошность и прочность полученных изделий.

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 – 1000 и 2400 мм.

2. Плакирующий слой – труба из стали 08Х18Н10Т толщиной 2,5 мм и наружным диаметром 80 мм. Длины – 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. Длина – 1000 мм.

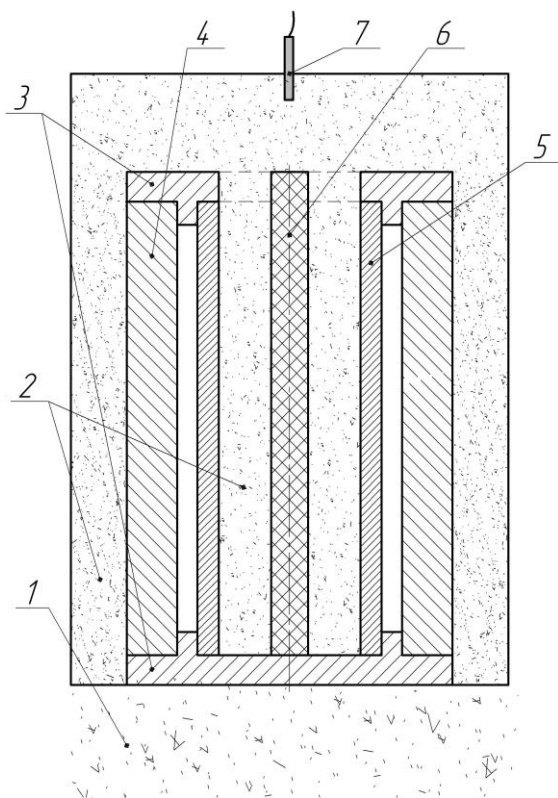
Для сварки взрывом медного стержня с титановой трубой использовались следующие материалы:

1. Основной слой – стержни из меди М1 диаметрами 16 и 28 мм. Длина – 1500 мм.

2. Плакирующий слой – трубы из технического титана ВТ1-0 толщиной 2 мм и наружным диаметром 22 и 35 мм. Длина – 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 противозарядов (рисунок 4.1). 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; 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.



а

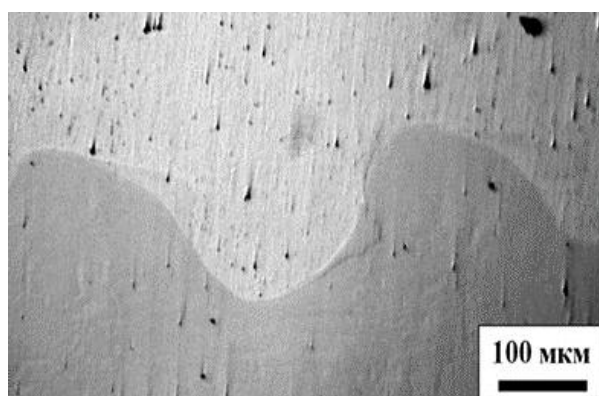


б

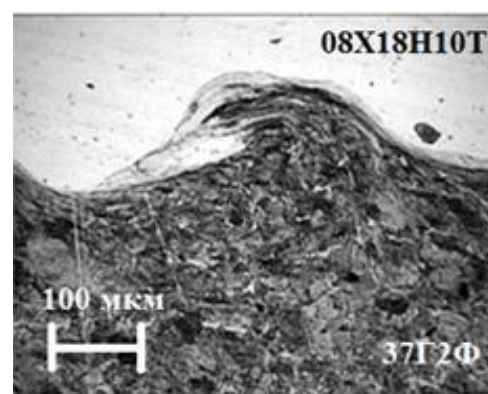
Рисунок 4.1 – Схема сварки взрывом с применением синхронного инициирования двух противозарядов: 1 – песчаная основа; 2 – наружный и внутренний заряды ВВ; 3 – центрирующие крышки; 4 – наружная труба; 5 – внутренняя труба; 6 – центральный элемент, ограничивающий толщину внутреннего заряда; 7 – детонатор; б – сборка на полигоне

В процессе сварки взрывом по схеме, использующей два заряда ВВ, как указано на рисунке 4.1, а заготовка разрушилась. На месте эксперимента были обнаружены фрагменты трубы с участками, частично соединёнными между собой слоями. Для исследования микроструктуры границы соединения были изготовлены микрошлифы. В результате металлографических исследований было выявлено, что:

1. Граница соединения нержавеющей стали 08X18H10Т и стали 37Г2Ф имеет волнообразный профиль со средней амплитудой волн 150-170 мкм и длиной 400-450 мкм (рисунок 4.2, а).



а



б

Рисунок 4.2 – Граница соединения фрагмента биметаллической трубы 37Г2Ф+08X18H10Т: а – в нетравленном виде; б – после травления

2. После травления образцов в 2 % спиртовом растворе HNO_3 (рисунок 4.2, б) была исследована микроструктура зоны соединения. Выявлено, что параметры сварки взрывом обеспечили получение соединения с ярко выраженным волновым профилем с наличием вихревых зон, в основном находящихся у их основания. В возникших в результате кристаллизации расплава зонах не было обнаружено усадочных трещин, рыхлостей, пор и пустот. Вихревые зоны образуются преимущественно из металлов, входящих в состав нержавеющей стали 08X18H10Т (рисунок 4.3 и таблица 4.1).

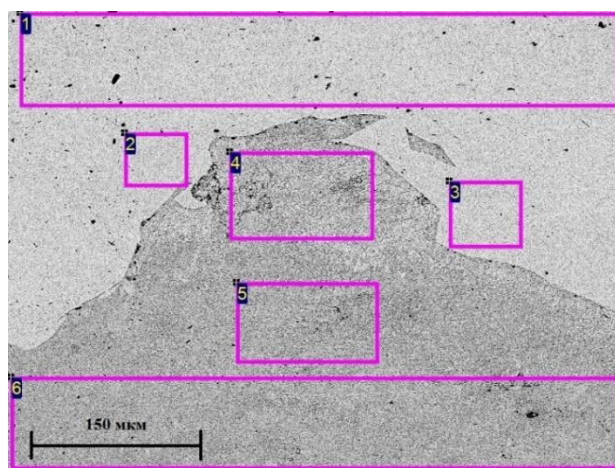


Рисунок 4.3 – Области определения химического состава в околошовной зоне

Таблица 4.1 – Результаты энергодисперсионного анализа (масс. %) зоны соединения 37Г2Ф+08Х18Н10Т

№ области измерения	C	O	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
1	0,9	0,7	0,8	0,5	0,6	18,1	1,5	67,0	9,8
2	2,1	0,7	1,0	0,5	0,4	12,2	1,4	75,0	6,9
3	2,1	1,0	0,8	0,5	0,3	10,2	1,5	78,0	5,5
4	3,2	1,5	0,9	0,4	-	-	1,7	92,3	-
5	3,2	1,2	0,9	0,4	-	-	1,6	92,8	-
6	3,0	1,2	0,8	0,5	-	-	1,7	92,8	-

Таким образом, исходя из полученных данных по проведенным экспериментам и металлографическим исследованиям образцов, полученных по схеме с синхронным инициированием противоположно установленных зарядов, можно сделать следующие выводы:

1. Схему эксперимента с использованием двух противозарядов ВВ с синхронным инициированием сложно реализовать практически для получения длинномерных биметаллических труб.

2. Требуется достаточная точность сборки свариваемых элементов по представленной схеме, что может существенно затруднить промышленное применение данной схемы.

3. 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. Из анализа следует, что дальнейшие исследования в данном направлении являются перспективными, как с точки зрения фундаментальной науки так и практического применения, но требуют дополнительной теоретической и экспериментальной работы.

Как уже было сказано в главе 1, схемы сварки взрывом цилиндрических изделий делятся на два основных вида: с наружным и внутренним плакированием. При наружном плакировании заряд взрывчатого вещества располагают снаружи

на поверхность метаемой трубы. Схема позволяет осуществлять плакирование стержней и труб. При получении двухслойного стержня, особых проблем не возникает, т.к. стержень сам выступает как опора, и остаточные деформации в материале при этом минимальные. При плакировании наружным зарядом трубной заготовки необходимо обеспечить сохранность заготовки, которая деформируется под действием продуктов детонации и ударных волн [53]. Необходимым элементом сборки при наружном плакировании полых цилиндрических изделий является внутренний наполнитель, который выступает в качестве опоры и при правильном его выборе обеспечивает минимальную деформацию и сохранность внутреннего тонкостенного плакирующего слоя. Выбор материала для внутреннего наполнителя является основным вопросом при разработке технологии плакирования взрывом изделий трубной формы.

Экспериментальная схема плакирования с зарядом взрывчатого вещества на наружной поверхности метаемой толстостенной трубы (толщина 12 мм, из стали 37Г2Ф), называется «обратной» схемой сварки взрывом [110, 111]. Метание толстостенной заготовки на трубчатый элемент с толщиной стенки в несколько раз меньше предъявляет к наполнителю определенные требования. Главными требованиями, в особенности при массовом производстве, являются долговечность, легкость извлечения наполнителя после сварки и минимальные остаточные деформации изделия [15]. При этом материал опорного наполнителя должен иметь акустическое сопротивление близкое к импедансу плакирующему элементу, что позволит предотвратить множественные отражения импульсов сжатия на границе элемента и опорного наполнителя [62]. Известно применение металлической дробы в качестве опоры для плакирования лопаток турбин [53].

В качестве внутреннего опорного наполнителя, удовлетворяющего необходимым требованиям, были исследованы две схемы:

1. Дисперсный твердо-жидкий наполнитель в виде стальной дробы и воды.
2. Стальной стержень с изолирующим слоем из поваренной соли NaCl.

Заполнение дисперсным твёрдо-жидким наполнителем внутренней полости сборки обеспечивает:

1. Максимальную площадь контакта наполнителя с внутренней трубой.

2. Предотвращение смятия тонкостенной трубы. За счёт близости акустических свойств материалов дробы и плакирующей трубы ударная волна в процессе сварки взрывом проходит «беспрепятственно» границу раздела «наполнитель - плакирующая заготовка», а вода позволяет извлекать дробь после сварки взрывом и заполнять пространство между дробинками, тем самым обеспечивается отвод ударных волн и максимальная площадь соприкосновения с плакирующей трубой.

Стальной стержень благодаря своей жесткости и прочности позволяет в процессе сварки взрывом сохранить форму заготовки. Используемая в схеме сварки в качестве изолирующего слоя соль легко вымывается водой, что позволяет извлекать наполнитель после сварки взрывом. Недостатком использования изолирующего слоя соли является различие по акустическим свойствам соли и плакирующей трубы из нержавеющей стали, что может привести к изменениям условий на границе контакта, а, следовательно, к увеличению деформации тонкой заготовки и дополнительному энерговложению в зону соединения.

Были разработаны и экспериментально опробованы две «обратные» схемы плакирования стальной трубы тонким слоем из нержавеющей стали (рисунок 4.4) [111].

Сборка под сварку взрывом по схеме «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 поваренной солью 8. Зазор между трубами 5 и 6 составлял 2 мм. По схеме «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.

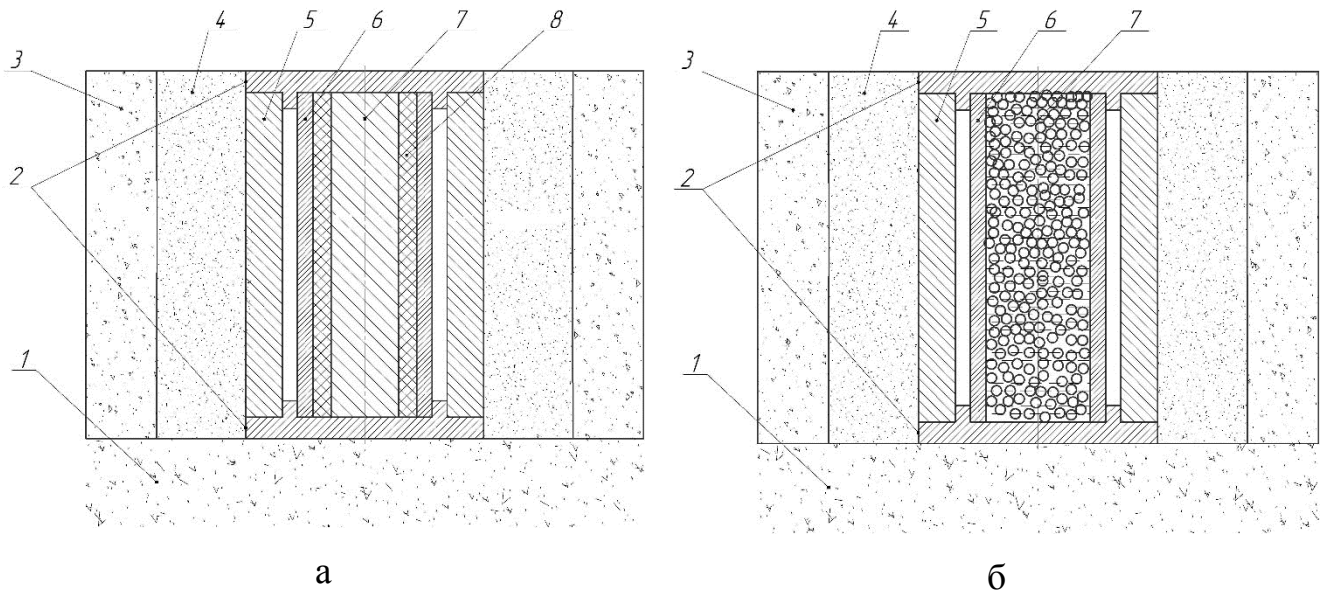


Рисунок 4.4 – Экспериментальные схемы сборок двухслойных трубных заготовок с применением внутренних опорных наполнителей: а – стальной стержень; б – стальная дробь+вода: 1 – песчаная опора, 2 – верхние и нижние крышки, 3 – забойка из песка, 4 – заряд ВВ, 5 – наружная труба, 6 – внутренняя труба, 7 – внутренний наполнитель, 8 – изолирующий слой

Согласно представленным схемам заряд взрывчатого вещества (смесь аммиачной селитры с дизельным топливом) помещался на наружную поверхность толстостенной трубы из стали 37Г2Ф и ограничивался опалубкой соответствующего диаметра (рисунок 4.5, а). Для уменьшения потери энергии в процессе детонации заряда и обеспечения более полного протекания реакции взрыва была использована забойка из песка (рисунок 4.5, б).

Ультразвуковой контроль (далее УЗК) сплошности соединения показал наличие дефектов сплошности в двухслойной трубе по схеме (рисунок 4.4, а) на начальном и конечном участках длиной 50-60 мм. В трубе по схеме указанной на рисунке 4.4, б выявлены дефекты сплошности на начальном участке длиной до 40 мм и конечном до 30 мм. Также были обнаружены незначительные зоны непровара по длине образующей трубы. Краевые дефекты обусловлены схемой центрирования и обеспечения жесткими кольцами сварочного зазора между заготовками. Помимо этого, непровары в конечной области связаны с потерей

устойчивости сварки по длине [43], а также с наличием оплавлений по которым происходит расслоение [108].



а



б

Рисунок 4.5 – Общий вид смонтированного заряда на полигоне: а – заряд без забойки, б – заряд с забойкой из песка

Необходимо отметить, что внутренняя поверхность полученных сваркой взрывом трубных заготовок в случае использования схемы с дисперсным твердо-жидким наполнителем имеет множественные углубления чашеобразной формы, возникшие в результате соударения стальных дробинки о стенку плакирующей трубы (рисунок 4.6, а). Глубина залегания данных отпечатков не превышает 0,26-0,32 мм. При этом, внутренняя поверхность заготовки, полученной по схеме с использованием стального стержня имеет гладкую форму без замятий, складок и т.п. (рисунок 4.6, б).

Для дальнейших исследований из двухслойных труб были изготовлены кольцевые образцы для изучения макро- и микроструктуры границы соединения и продольные/поперечные темплеты.

Образцы отбирались из биметаллической трубы на расстоянии 100 мм от её начала и 100 мм от конца (рисунок 4.7, а).



а



б

Рисунок 4.6 – Внешний вид внутренних поверхностей полученных трубных заготовок: а – кольцевой образец с отпечатками от дроби; б – биметаллический фрагмент трубы, полученной с использованием стального стержня

Затем кольцевые образцы делились на 4 части (рисунок 4.7, б), изготавливались шлифы и исследовалась граница соединения в каждом образце. Это было сделано для определения локализации участков расплавов в околошовной области по диаметру трубной заготовки.



а

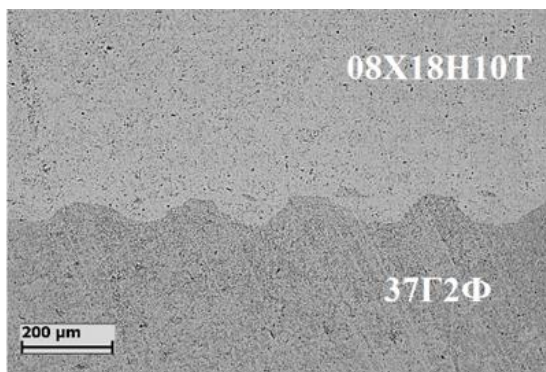


б

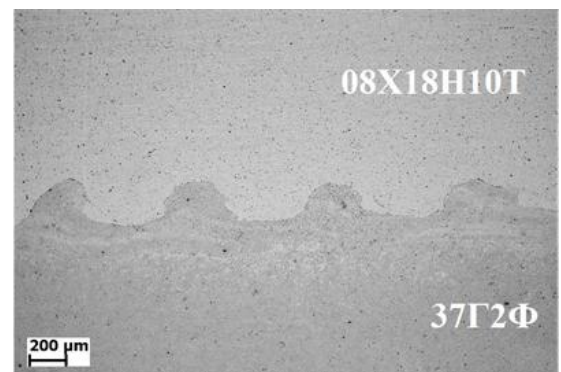
Рисунок 4.7 – Кольцевые биметаллические темплеты (внутренний слой – сталь 08X18H10T; наружный – сталь 37Г2Ф): а – образец после воронения; б – кольцевой образец, разрезанный на 4 части.

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

- 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 4.8, *а*);
- 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 (рисунок 4.8, *б*), а по двум другим – сплошная прослойка литого металла толщиной от 50 (рисунок 4.9, *а*) до 300-350 мкм (рисунок 4.9, *б*).



а

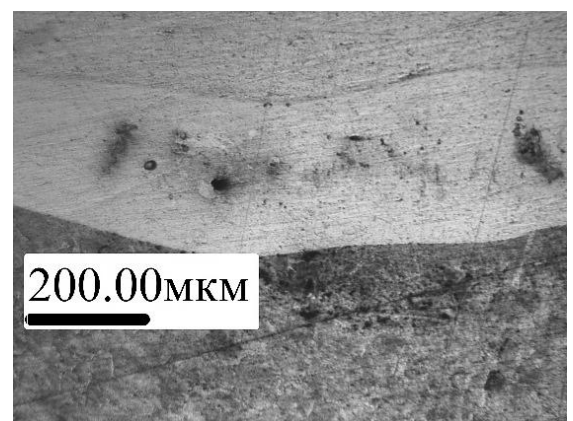


б

Рисунок 4.8 – Макроструктура зоны соединения слоёв биметаллической трубы 37Г2Ф+08X18H10Т, полученной по схеме со стальным стержнем: а – начальный участок, б – конечный участок



а



б

Рисунок 4.9 – Микроструктура зоны соединения в первом и третьем квадрантах со сплошной прослойкой в биметаллической трубе 37Г2Ф+08X18H10Т на конечном участке, полученной по схеме со стальным стержнем и солью

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+08Х18Н10Т имеет безволновой профиль с наличием локальных участков с литыми включениями толщиной от 2 до 10 мкм (рисунок 4.10, а) при более низкой скорости точки контакта и толщиной 10-20 мкм (рисунок 4.10, б) при скорости точки контакта на 400 м/с выше. 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 с применением стального стержня [112].

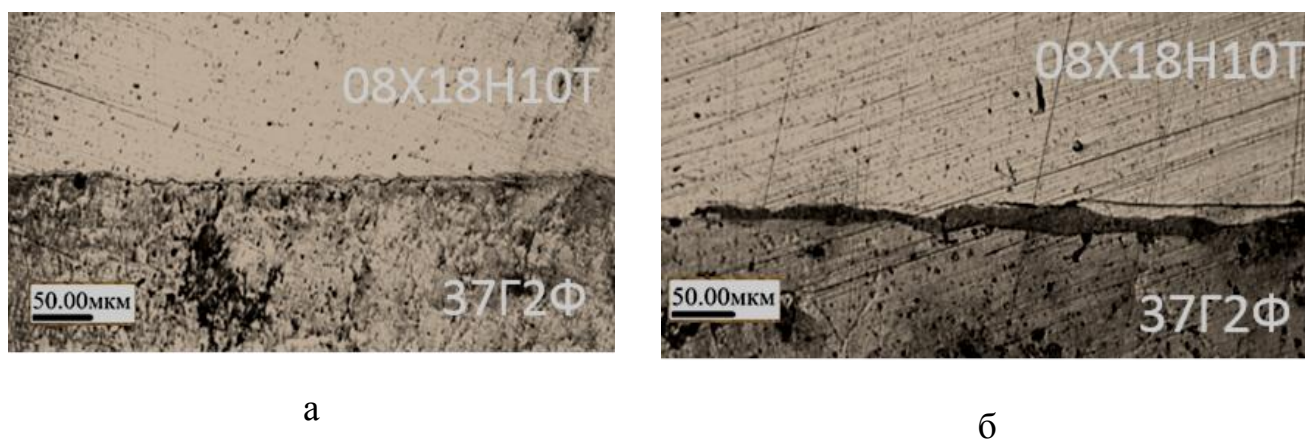


Рисунок 4.10 – Граница соединения на начальных участках двух трубных образцов: а – скорость точки контакта 2900 м/с; б – 3300 м/с

Исследования микроструктуры границы соединения каждой части поделенного на 4 участка кольцевого темплета из конечных зон заготовок показали, что распределение расплавов по диаметру трубной заготовки в продольном направлении как в трубе №1 так и в трубе №2 имеет неравномерный характер. В различных квадрантах толщина прослойки разная (рисунок 4.11).

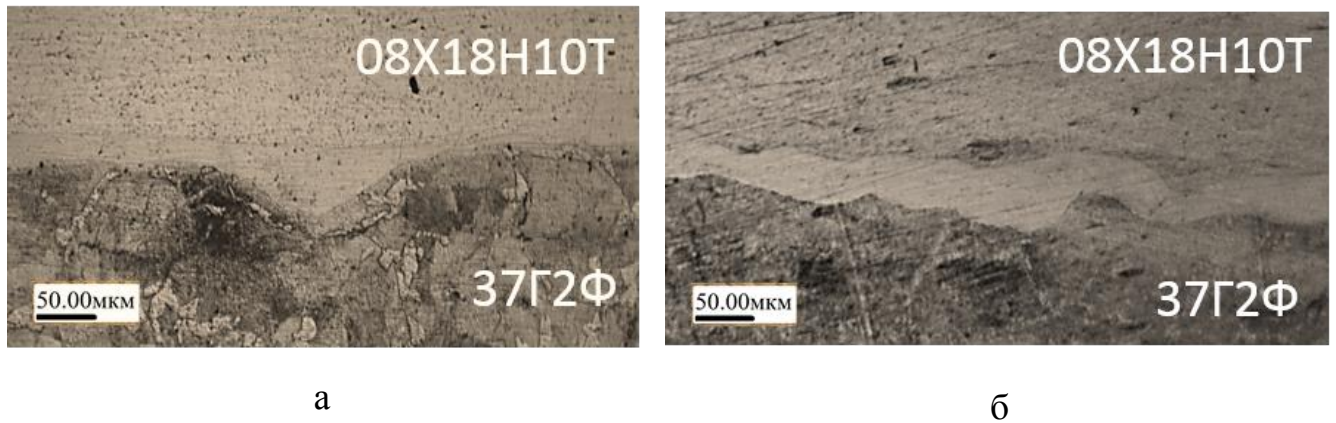


Рисунок 4.11 – Сплошная прослойка на границе соединения в конечной зоне: а – скорость точки контакта 2900 м/с; б – скорость точки контакта 3300 м/с

Энергодисперсионный анализ границы соединения 37Г2Ф+08X18H10Т во всех полученных экспериментальных образцах показал, что состав литых включений не меняется по толщине и состоит из в основном из элементов нержавеющей стали 08X18H10Т (рисунок 4.12 и таблица 4.2).

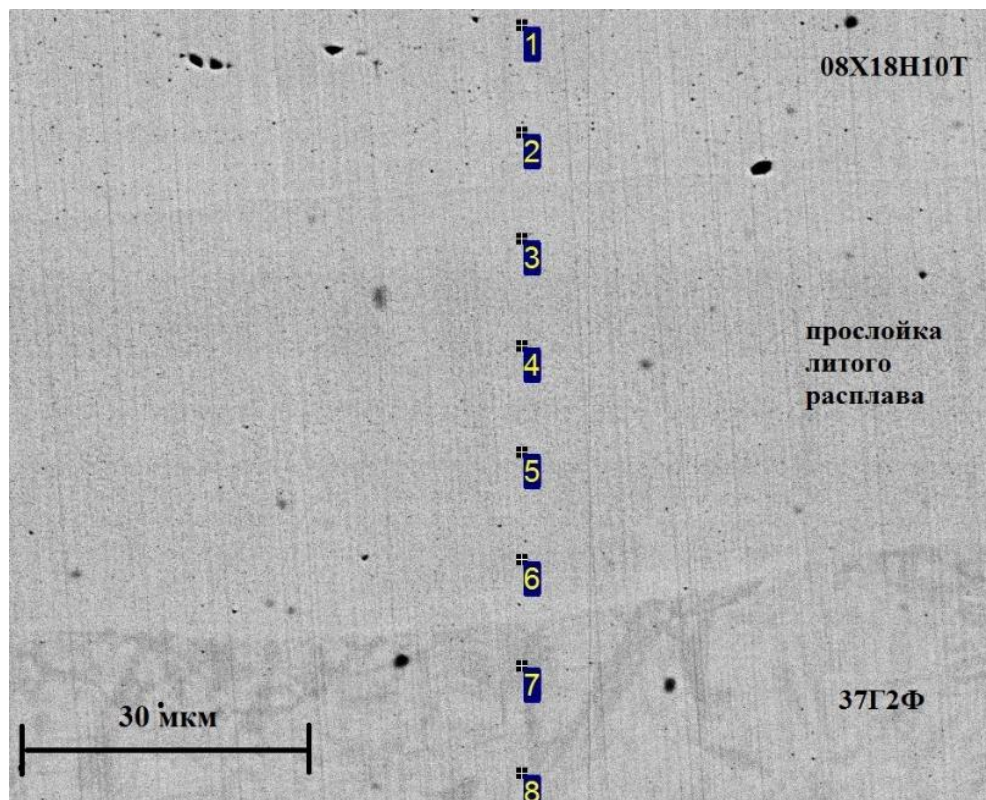


Рисунок 4.12 – Граница соединения 37Г2Ф+08X18H10Т

Таблица 4.2 – Результат энергодисперсионного анализа границы соединения (масс.%) 37Г2Ф+08Х18Н10Т

№ точки измерения	Cr	Mn	Fe	Ni
1	17,6	1,4	66,1	9,5
2	17,6	1,4	66,8	8,8
3	9,9	1,6	78,3	5,1
4	9,1	1,7	78,9	4,9
5	9,8	1,5	78,3	4,7
6	9,4	1,5	78,4	5,1
7	0,3	1,5	91,6	-
8	-	1,6	92,8	-

Для того чтобы количественно оценить разность в толщинах литых включений в трубных образцах, полученных на двух режимах с твёрдо-жидким внутренним наполнителем (трубы №1 и №2), а также с использованием стального стержня с изолирующим слоем (труба №3) по методике, изложенной в работе [48] были измерены и усреднены толшины расплавов в каждом из квадрантов в концевых образцах (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Усреднённая толщина расплавов в трубных заготовках

№ трубы	№ квадранта	Усредненная толщина расплавов, мкм
№1 (Дисперсный твёрдо-жидкий наполнитель) $V_K=2900$ м/с	1	20
	2	27
	3	31
	4	26
№2 (Дисперсный твёрдо-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

Измерения усредненной толщины металла литых включений показали, что на одном и том же кольцевом образце по разным образующим линиям имеются сплошные прослойки различной толщины. Результаты, представленные в таблице 4.3 указывают на то, что незначительное увеличение режимов сварки взрывом приводит к некоторому увеличению толщины прослойки в конце трубной заготовки. Дальнейшее увеличение режимов приведет к еще большему росту толщины переходной зоны.

В работе [48] показано, что на расстоянии до 8 м от начала процесса обеспечивается образование соединения со стабильными параметрами волн по длине и высоте с локализованными литыми включениями. Свыше 8 м волнообразование нарушается, в соединении образуется сплошная полоса литого металла и возможно образование дефектов сплошности. В случае сварки взрывом цилиндрических изделий на сопоставимых с режимами плоских изделий параметрах, как показывают результаты настоящего исследования, образование сплошной прослойки (в отдельных зонах) происходит на расстоянии менее 1 метра.

На основе анализа опубликованных данных по сварке взрывом крупногабаритных листов, проведенных измерений толщин расплавов в конечных участках биметаллических труб и металлографических исследований был предложен механизм образования дефектов при сварке взрывом длинномерных цилиндрических изделий при метании наружной трубы зарядом взрывчатого вещества. Механизм заключается в следующем: исходное 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. Таким образом для исключения появления дефектов и понижения прочностных свойств в биметаллических трубах необходимо соблюдать максимальную точность сборки

и предварительно механически обрабатывать поверхности исходных труб для обеспечения равномерного зазора. Однако, исходя из габаритов сборки технологически сложно соблюсти все вышеперечисленные требования.

На основе полученных результатов по сварке взрывом труб длиной 1000 мм была проведена экспериментальная работа по плакированию взрывом заготовок из тех же материалов длиной 2400 мм [113].

Нержавеющая труба устанавливалась во внутрь толстостенной наружной трубы с зазором 2 мм. Сборка из двух труб помещалась на плоскую стальную основу. Непосредственно на полигоне собранные таким образом трубы помещались на заранее подготовленную площадку. После установки, внутреннюю полость сборки заполняли дисперсным твердо-жидким наполнителем (металлическая дробь + вода) и устанавливалась опалубка для взрывчатого вещества (рисунок 4.13, а) и забойка из песка (рисунок 4.13, б).



а



б

Рисунок 4.13 – Внешний вид сборки: а – перед монтажом взрывчатого вещества и забойки; б – после монтажа

При заданной толщине заряда взрывчатого вещества скорость точки контакта составляла 2900-3000 м/с. После проведения экспериментальной работы по разработанной схеме были получены двухслойные трубные заготовки длиной 2,4 метра (рисунок 4.14).

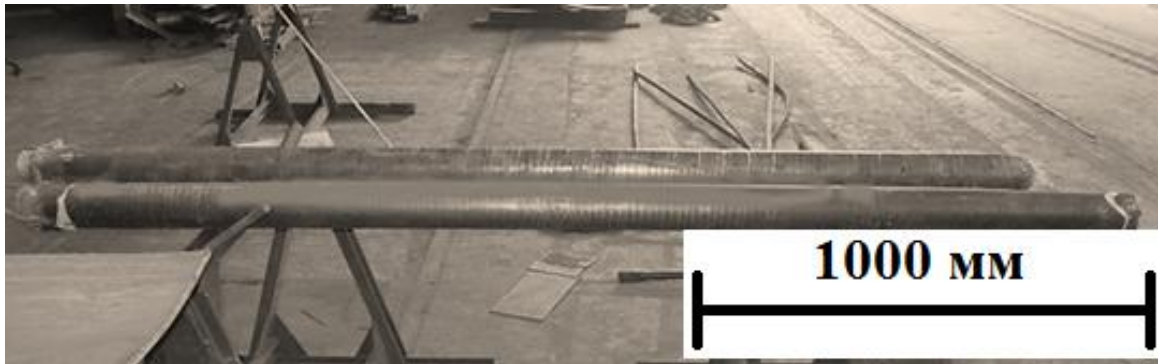


Рисунок 4.14 – Биметаллические трубные заготовки 37Г2Ф+08Х18Н10Т
после сварки взрывом

Металлографические исследования проводили по той же методике, что и для труб длиной 1 метр. На расстоянии 100 мм от начала и конца труб отбирались кольцевые образцы и затем делили их на 4 части. После изготавливались микрошлифы и исследовалась граница соединения в каждом образце.

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 (рисунок 4.15, *а*). В конечных зонах были обнаружены сплошные прослойки расплавов (рисунок 4.15, *б*). 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.

Энергодисперсионный анализ зоны соединения показал, что состав промежуточных литых прослоек в основном состоит из железа (~80%), хрома (~10%) и никеля (~6%). Микротвердость переходной зоны составила 650-700 HV, при 470-480 HV и 380-400 HV для слоев из нержавеющей и конструкционной стали соответственно [113].

Результаты металлографических исследований и замеров усреднённых толщин расплавов на границе соединения в конечных участках биметаллических труб длиной 2400 мм с сочетанием слоев сталь 37Г2Ф+сталь 08Х18Н10Т

показали, что с увеличением расстояния от точки инициирования детонации ВВ происходит двукратное увеличение толщины расплавов.



а

б

Рисунок 4.15 – Структура границы соединения 37Г2Ф+08Х18Н10Т: а – начальный участок; б – конечный участок

Полученные данные подтверждают влияние неравномерности зазора на процессы, протекающие в нём по ходу продвижения точки контакта. При увеличении длины цилиндрических заготовок сложнее соблюсти точность сборки и равномерность зазора, при этом, за счет отсутствия бокового истечения, происходит линейное увеличение термодинамических параметров, движущегося с гиперзвуковой скоростью ударно-сжатого газа. Всё это приводит к интенсификации процесса расплавления контактных поверхностей и увеличению толщины прослойки литого расплава на конечных участках биметаллических труб.

Для определения относительного радиального сужения наружной трубы по длине заготовки и оценки возможной потери цилиндричности после сварки взрывом по разработанным схемам были проведены замеры в двух перпендикулярных плоскостях наружного диаметра исходных труб и построены графики изменения относительного сужения наружной трубы по длине заготовки (рисунок 4.16).

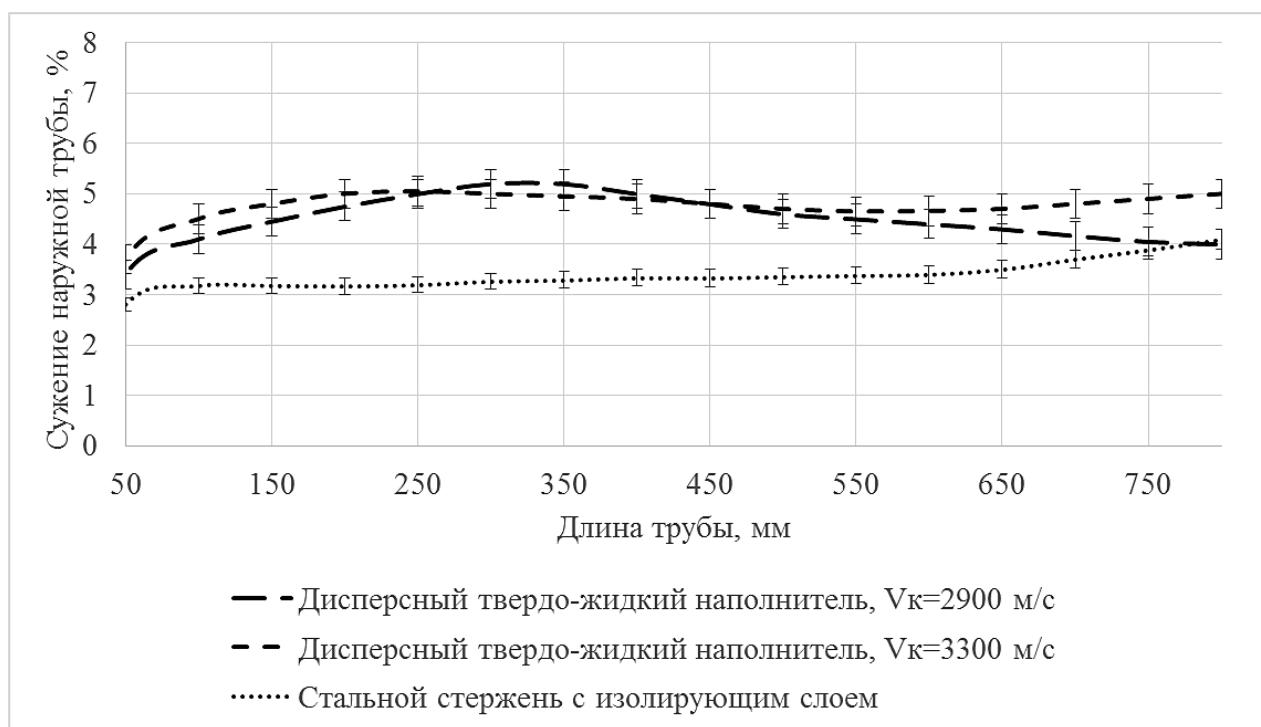


Рисунок 4.16 – Графики изменения относительного сужения наружной трубы по длине заготовок (до 1000 мм)

Результаты замеров сужения и овальности формы наружной трубы в биметаллических заготовках, полученных по двум режимам и с использованием двух разных внутренних 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.

2. Поперечная остаточная деформация трубной заготовки благодаря жесткости опоры (стальной стержень) распределяется равномерно, постепенно увеличиваясь к концу заготовки.

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

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

Также по такой же методике была измерена поперечная остаточная деформация наружной трубы в биметаллических трубных заготовках длиной 2,4 метра (рисунок 4.17).

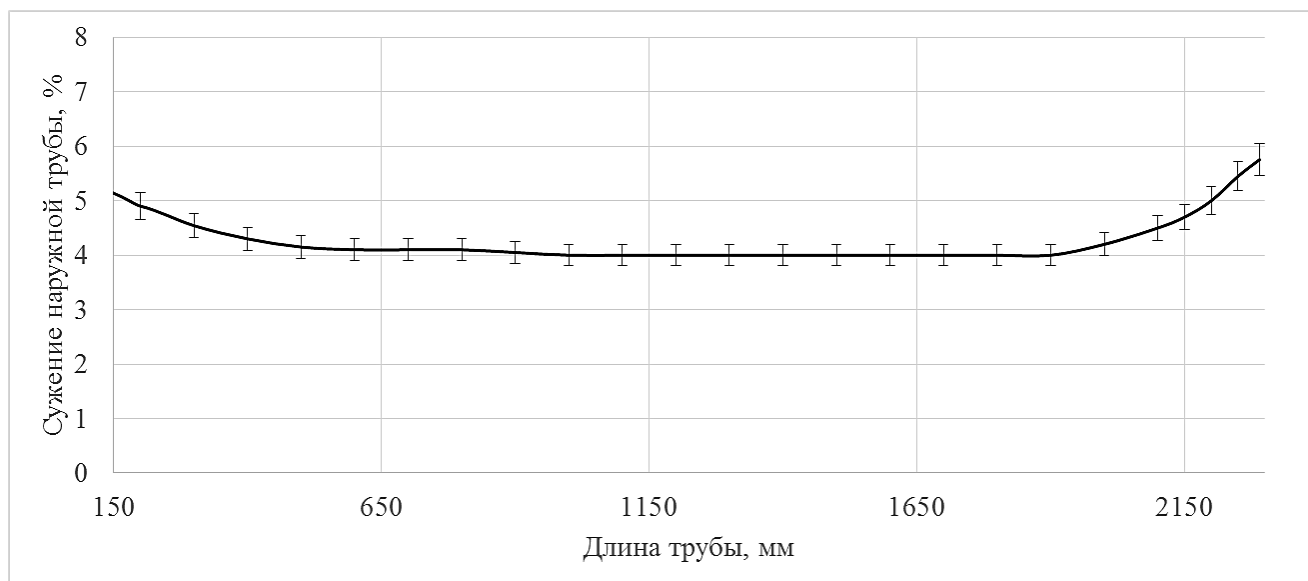


Рисунок 4.17 – Графики изменения относительного сужения наружной трубы по длине заготовок (до 2400 мм)

На рисунке 4.18 представлены результаты замеров наружных диаметров 4 биметаллических трубных заготовок длиной до 2400 мм, полученных сваркой взрывом на отработанном режиме $V_k=2900$ м/с при заполнении внутренней полости сборки дисперсным твердо-жидким наполнителем. В целом, разработанные режим и внутренний наполнитель позволили обеспечить относительное сужение по длине трубы в пределах 4,0-5,0% и овальность 0,1-0,3%.

4.2 Особенности получения сваркой взрывом биметаллических медно-титановых стержней

Известен опыт получения медно-титановых токоподводов сваркой взрывом длиной 1000 миллиметров [114]. Для обеспечения стабильности механических свойств соединения и исключения горения титана, воздух в зазоре был замещен на инертный защитный газ аргон. Равномерное обжатие трубы обеспечивалось за счет увеличения времени действия нагрузки и повышения стабильности

детонации была применена забойка из песка. Скорость детонации составляла 2000 м/с.

В условиях крупносерийного производства использование защитного газа, забойки из песка ведет к усложнению технологии, а также к увеличению себестоимости продукции. Поэтому, была поставлена задача разработки технологии производства двухслойных стержней без использования защитного газа и забойки по следующей методике:

1. Разработка схемы сборки стержня с трубой, обеспечивающей заданный минимальный сварочный зазор при сборке и транспортировке на взрывную площадку.
2. Метода защиты поверхности титановой трубы от действия продуктов детонации взрывчатых веществ.
3. Разработка режимов сварки и схемы монтажа заряда.
4. Проведение экспериментов по сварке взрывом стержней натуральных размеров.
5. Исследование микроструктуры границы соединения медь+титан после сварки взрывом и термической обработки.
6. Исследование деформации стержней в процессе сварки взрывом.
7. Контроль качества сварки: визуально-измерительный контроль, ультразвуковой контроль, механические испытания.
8. Экспериментальное исследование падения напряжения по длине двухслойного стержня.

В качестве исходных элементов для проведения экспериментов использовались: трубы из титана марки ВТ1-0 диаметрами 22 и 35 мм, толщина стенки составляла 2 мм и медные стержни марки М1 диаметрами 16 и 28 мм. Длина исходных цилиндрических элементов составляла 1500 мм.

Разработка режимов сварки взрывом и технологической схемы сборки исходных заготовок велась с учетом требований к крупносерийному круглогодичному производству. Технологическая схема сварки взрывом (рисунок 4.19, а) двухслойных стержней должна позволять в наиболее краткие сроки

производить сборку исходных элементов и её монтаж на полигоне. Для обеспечения равномерности детонации заряда использовалась опалубка из пластиковой трубы (рисунок 4.18, б).

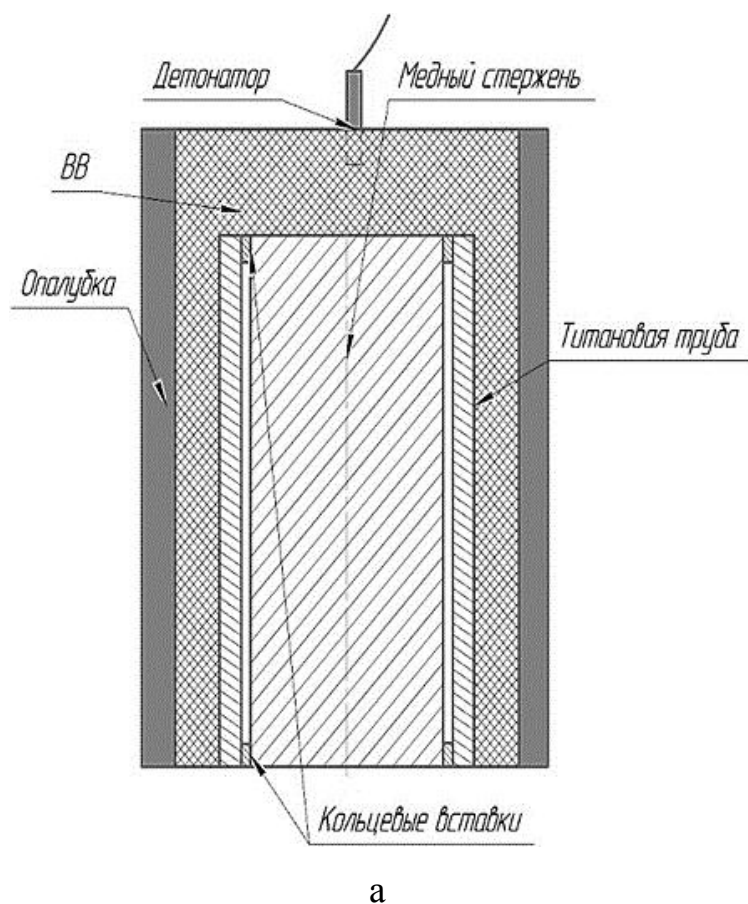


Рисунок 4.18 – Схема сборки под сварку взрывом медного стержня с титановой трубой: а – схема сборки; б – сборка на полигоне

Для защиты наружной поверхности титановой трубы от воздействия продуктов детонации, а также для обеспечения сохранности собранной конструкции при транспортировке от сборочного участка до взрывного полигона использовалась термоусадочная трубка, которая обжималась вокруг титановой трубы с помощью промышленного фена (рисунок 4.19). Данная мера позволяла не только защищать поверхность титановой трубы, но и обеспечивать целостность сборки при транспортировке её на взрывной полигон.



Рисунок 4.19 – Обжatie термоусадочной трубки промышленным феном

В результате проведения экспериментов были получены опытные двухслойные стержни (рисунок 4.20). После сварки взрывом они имели криволинейную форму.



Рисунок 4.20 – Полученный сваркой взрывом биметаллический стержень

Сварка взрывом осуществлялась на трёх режимах, при которых скорости точек контакта V_k составляли 1500 м/с, 2000 м/с и 3500 м/с соответственно. 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 (рисунок 4.21).

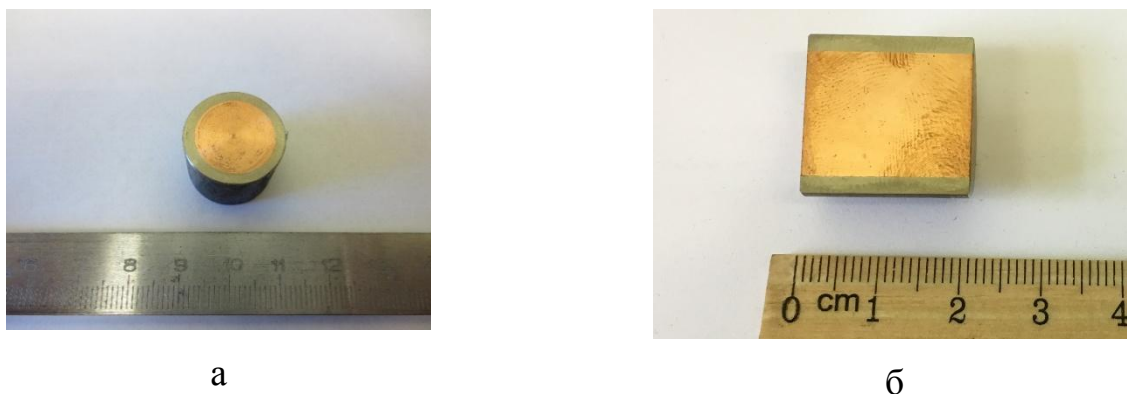


Рисунок 4.21 – Микрошлифы титан+медь: а – поперечный микрошлиф; б – продольный

В процессе сварки взрывом на границе соединения может образовываться прослойка из интерметаллидов, а её размеры будут зависеть от режима сварки взрывом. Структура сформировавшихся при сварке взрывом участков оплавленного металла представляет собой механическую смесь меди и интерметаллидных включений [57].

Проведенный металлографический анализ границы соединения позволил выявить следующие особенности границы соединения в медно-титановых стержнях:

1. На начальных участках (100 мм от начала) граница соединения меди М1 и титана ВТ1-0 в образцах, полученных на трёх разных режимах представляет собой практически плоскую линию без наличия литых включений (рисунок 4.22).
2. На конечных участках (100 мм от конца заготовки) были обнаружены сплошные прослойки интерметаллида на границе соединения различной толщины (рисунок 4.23, а). Максимальная толщина прослойки наблюдается при использовании скорости точки контакта 3500 м/с, причем данная сплошная зона наблюдается по одной направляющей микрошлифа (рисунок 4.23, б).

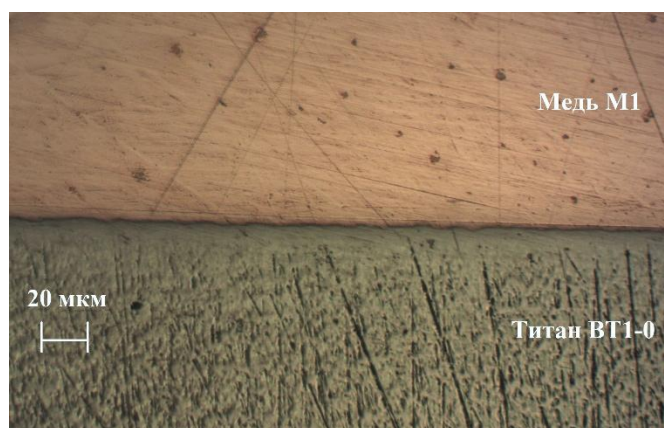
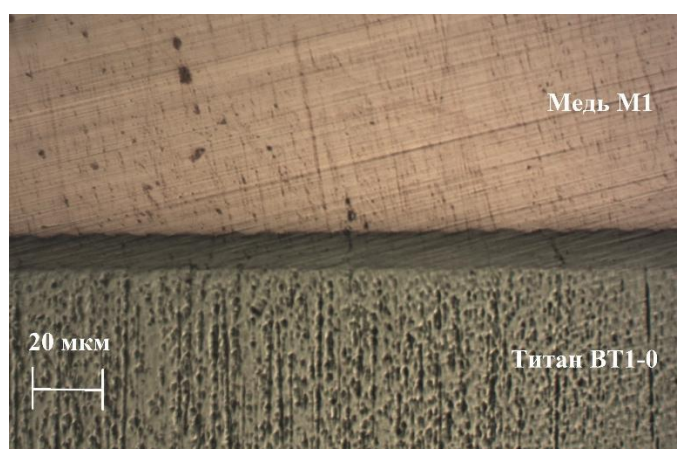
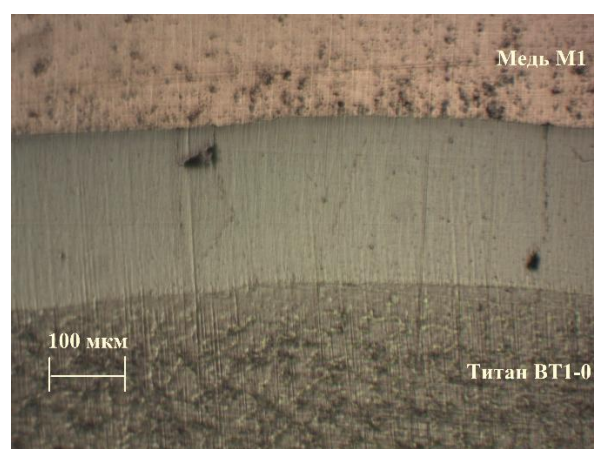


Рисунок 4.22 – Граница соединения меди М1 и титана ВТ1-0 на начальных участках



а



б

Рисунок 4.23 – Граница соединения в медно-титановых стержнях, полученных сваркой взрывом: а – микроструктура при режимах 1500 и 2000 м/с; б – микроструктура при режиме 3500 м/с

Наличие сплошной прослойки может привести к появлению дефектов, которые негативно повлияют на сплошность соединения, что, в свою очередь может понизить эксплуатационные свойства всего изделия в целом. Поэтому, для качественной сварки взрывом медно-титановых стержней установленных размеров следует использовать толщины зарядов взрывчатого вещества, обеспечивающие скорость детонации в пределах 1500-2000 м/с.

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.

После проведения ультразвукового контроля опытные образцы были подвергнуты термической обработке идентичной по режимам той, которую проводят на предприятии изготовителе катодов-матриц. Термическая обработка двухслойных стержней необходима для нанесения специального покрытия на основе оксида иттрия на поверхность собранной титановой ячейки. Исследование заключалось в циклической обработке, заключающейся в нагреве соединений в муфельной печи до температуры 500°C и последующем охлаждении на воздухе, продолжительность составляла 25 циклов. После проведения подобной обработки образец был разрезан в продольном направлении и на плоскости реза был изготовлен микрошлиф (рисунок 4.24), который был подвергнут металлографическому анализу на оптическом микроскопе.



Рисунок 4.24 – Внешний вид образцов после термической обработки

Анализ микроструктуры показал, что с одной стороны микрошлифа в месте соединения медь-титан образовалась прослойка серого цвета, по которой проходит трещина. С противоположной стороны нарушений сплошности соединения обнаружено не было.

Для определения химического состава прослойки серого цвета был проведён микрорентгеноспектральный анализ. Результаты анализа приведены на рисунке 4.25 и в таблице 4.4.

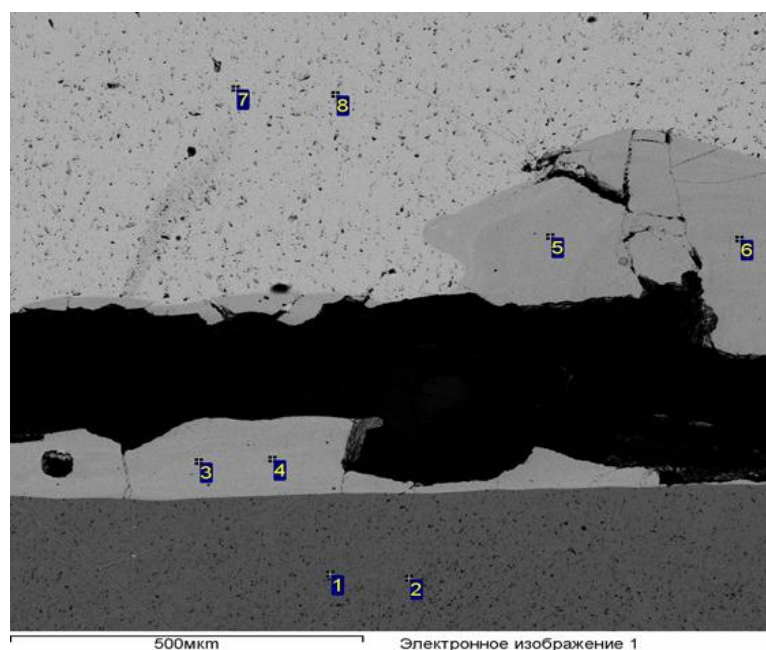


Рисунок 4.25 – Расслоение на границе соединения после термической обработки медно-титановых стержней

Таблица 4.4 – Результаты энергодисперсионного анализа (масс. %) зоны соединения медь М1+титан ВТ1-0

№ точки измерения	O	Al	Si	Ti	Cu
1	5.63	0.42	0.25	93.70	0.00
2	10.67	0.39	0.19	88.30	0.44
3	2.60	0.17	0.17	36.84	60.22
4	1.46	0.20	0.13	37.51	60.70
5	1.62	0.20	0.24	39.06	58.87
6	1.55	0.18	0.21	42.92	55.15
7	0.76	0.00	0.26	0.08	98.90
8	0.91	0.00	0.49	0.12	98.48

Химический состав точек 1 и 2 соответствует титану, точки 7, 8 меди, а химический состав прослойки представляет собой смесь меди и титана. При таких соотношениях данных элементов образуется фаза Ti_3Cu_4 [57].

Исходя из результатов металлографических исследований образцов, полученных сваркой взрывом и образцов после термической обработки следует вывод, что при температуре 500°C на границе соединения не образуется интерметаллидной прослойки при условии их отсутствия после сварки взрывом, если же в результате сварки взрывом на границе соединения образуются сплошные прослойки интерметаллида, то в результате термической обработки происходит их рост и образование трещин.

Наличие трещин по границе соединения после термической обработки объясняется многоцикловым режимом при котором происходит нагрев и охлаждение биметаллических стержней. Из-за разницы в коэффициентах температуропроводности и теплового линейного расширения медный стержень при охлаждении на воздухе принимая исходный размер тянет за собой хрупкий интерметаллид в результате чего образуются трещины, приводящие к несплошностям в биметаллическом стержне. Важной характеристикой работы биметаллического токоподвода постоянного тока является значение падения напряжения по длине проводника. Падение напряжения – это постепенное уменьшение напряжения вдоль проводника, по которому течёт электрический ток, обусловленное тем, что проводник обладает активным сопротивлением. При повышении значения падения напряжения по закону Ома возрастает сила тока, что ведет к увеличению затрат энергии и падению мощности.

Падение напряжения на проводе:

$$U = ((\rho l) / S) \cdot I, \quad (4.1)$$

где : U – величина падения напряжения, мВ;

ρ – удельное сопротивление провода из меди – 0,01724...0,018, из титана – 0,5562...0,7837, Ом·мм²/м;

l – длина проводника, м;

S – площадь поперечного сечения, м²;

I – сила тока, А.

Расчетные и замеренные на экспериментальном стенде АО «Башкирская содовая компания» (г. Стерлитамак) падения напряжения на медно-титановых стержнях через каждые 200 мм при силе тока 500 А указаны в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Расчётное падение напряжения по длине в медном стержне

Расстояние, мм	Падение напряжения U , мВ					
	Расчётное значение		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	67,2	62,1	61,9

Результаты измерения падения напряжения в биметаллических стержнях показали, что покрытие из титана практически не влияет на падение напряжения в токоподводе и в первую очередь зависит от сопротивления меди. Сварка взрывом обеспечивает соединение меди с титаном без наличия переходного сопротивления, следовательно, в процессе работы токоподвода поверхность контакта меди с титаном нагреваться не будет [115].

Для исследования особенностей распределения продольных остаточных деформаций титановой трубы по длине биметаллического медно-титанового стержня и установления влияния скорости детонации взрывчатого вещества на их величину была использована методика реперных точек, которые наносились на поверхность титановой трубы перед сваркой взрывом. В дальнейшем, после проведения экспериментов на трёх режимах при которых скорости точек контакта V_k составляли 1500 м/с, 2000 м/с и 3500 м/с соответственно, оценивали величину продольных остаточных деформаций по уравнению [116]:

$$\delta_i = \frac{l'_i - l_i}{l_i} \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

где δ_i – величина продольной остаточной деформации;

l_i и l'_i – размеры i -базы соответственно до и после сварки, мм.

На режиме 1500 м/с также проводили измерение удлинения на биметаллическом стержне с откольным элементом в виде стального стержня диаметром 22 и длиной 150 мм. На рисунке 4.26 показаны графики зависимости относительного удлинения по длине двухслойного стержня от скорости детонации.

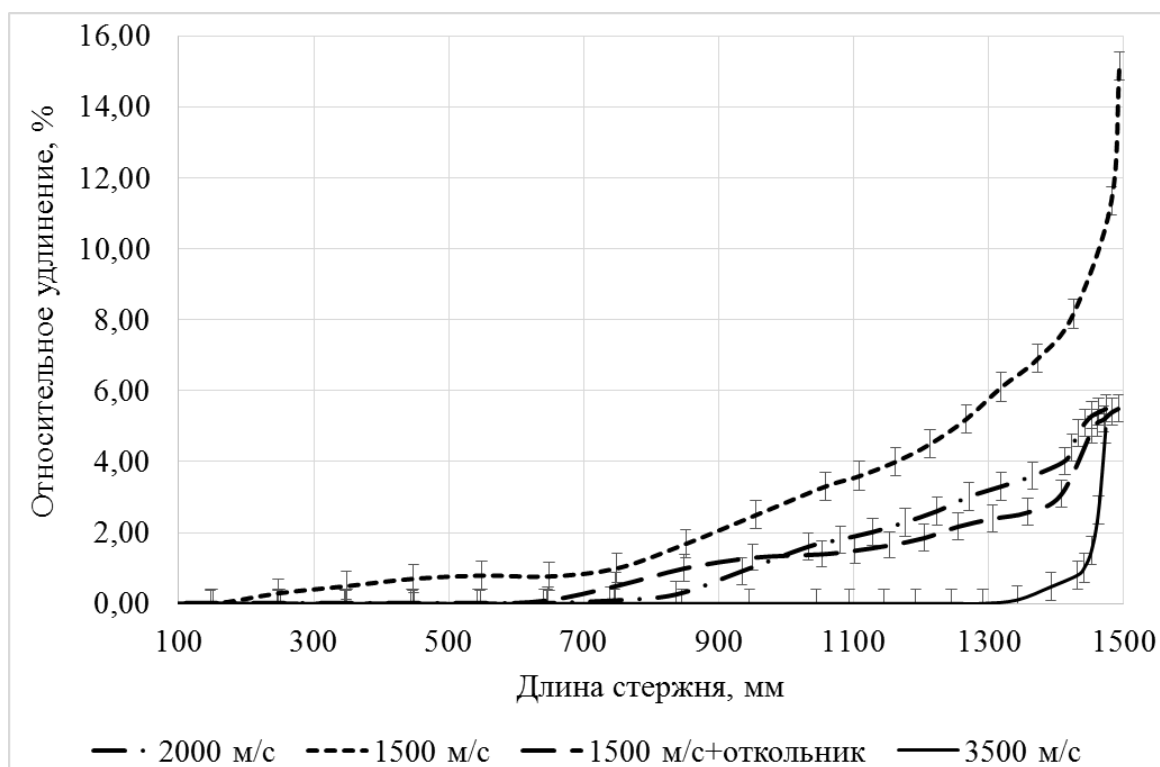


Рисунок 4.26 – Графики зависимости относительного удлинения по длине двухслойного стержня от скорости детонации

Удлинение титановой трубы объясняется тем, что в зоне соударения в металле возникают напряжения растяжения, величина которых растет по мере продвижения точки контакта [31]. При подходе интенсивной волны сжатия к торцу происходит лавинообразное течение металла в сторону свободной поверхности и чем ниже скорость детонации, тем больше волн сжатия успеет прийти к концевому торцу образца. После сварки взрыва длина титановых труб увеличивалась на 30-40 мм. Реальное удлинение согласно результатам замеров во

всех стержнях, кроме ($V_k=3500$ м/с) с учётом погрешности измерения начинается с 800-900 мм и постепенно увеличивается к концу образца. На режиме 3500 м/с удлинения не было зафиксировано, что связано с высокой скоростью прохождения волны сжатия по титановой трубе [116]. Использование откольного элемента позволило значительно сократить относительное удлинение за счёт перевода части волн сжатия в тело стального стержня.

Выводы к Главе 4

1. Установлено, что для получения сваркой взрывом качественных цилиндрических изделий по «обратной» схеме необходимо использовать дисперсный твердо-жидкий наполнитель, который:

- Обеспечивает отвод энергии ударных волн от зоны соединения за счёт близости акустических сопротивлений трубы и дробы. Ударные волны переходят в наполнитель, а его дисперсность приводит к многократному их отражению и диссипации энергии.
- Сохраняет остаточную деформацию биметаллической трубной заготовки заданном уровне (4-5%) за счет заполнения внутренней полости сборки.

2. Исследовано влияние свойств опорного наполнителя, заключенного в полость трубы плакирующего слоя, на процесс образования соединения трубной заготовки в процессе сварки взрывом и установлено:

- Неравномерность распределения толщины расплавов в конечных участках биметаллических трубных заготовок, что указывает на прохождение в сварочном зазоре впереди точки контакта турбулентных течений ударно-сжатого газа как в осевом так в радиальных направлениях, которые приводят, вследствие разного сварочного зазора по диаметру и длине трубных заготовок, к неравномерному аэродинамическому прогреву свариваемых поверхностей.
- Усредненная толщина расплавов на границе соединения в конечных участках биметаллических трубных образцов с применением 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.

3. Разработана опытно-промышленная технология сварки взрывом длинномерных трубных заготовок с использованием «обратной» схемы и с заполнением внутренней полости сборки дисперсным твердо-жидким наполнителем в виде стальной дробы и воды, которая применена при изготовлении опытно-промышленной партии двухслойных трубных заготовок.

4. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований структуры и свойств опытных образцов разработаны технологические основы производства длинномерных биметаллических материалов цилиндрической формы методом сварки взрывом, которые включают разработку экспериментальных схем и технологической оснастки, позволяющие обеспечивать:

- минимальные колебания зазора между наружной и внутренней трубой или стержнем по длине и диаметру;
- равномерную детонацию взрывчатого вещества по длине цилиндрического образца;
- защиту наружной поверхности трубы от воздействия продуктов детонации;
- инициирование большого числа зарядов.

5. Разработана технология плакирования взрывом медного стержня из меди М1 слоем титана ВТ1-0, обеспечивающая заданный сварочный зазор между стержнем и наружной титановой трубой и защиту поверхности биметаллического стержня от механического воздействия продуктов детонации.

6. Экспериментально установлена методом реперных точек зависимость удлинения наружной титановой трубы от скорости детонации взрывчатого вещества. Было показано, что с увеличением скорости детонации ВВ снижается удлинение титановой трубы в процессе сварки взрывом, а на режиме 3500 м/с удлинение практически отсутствует. Однако, в этом случае на границе соединения обнаружены сплошные прослойки интерметаллида типа TiCu

толщиной от 200 до 500 мкм, что может заметно влиять на прочностные свойства соединения и ухудшать эксплуатационные свойства готового изделия при проведении многоциклового термической обработки.

7. Разработана методика исследования падения напряжения по длине полученного сваркой взрывом биметаллического медно-титанового токоподвода на опытном стенде АО «Башкирская содовая компания» и установлено, что наличие локальных непроваров и интерметаллидной прослойки между титановой трубой и медным стержнем не оказывает заметного влияния на падение напряжения по длине. При сплошности соединения равной 50 % от общей площади контакта сваренных поверхностей падение напряжения на биметаллическом стержне соответствует падению на стержне из меди М1.

Глава 5. Разработка опытных технологий изготовления двухслойных трубных изделий и промышленной технологии производства стержней титан+медь для токоподводов

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

Применение двухслойных материалов в различных отраслях машиностроения позволяет значительно расширить ассортимент изделий, увеличить срок службы конструкций и сэкономить на дорогостоящих металлах и сплавах. В большинстве случаев плакирование применяют для защиты поверхностей от воздействия агрессивных сред. В зависимости от условий эксплуатации используется тот или иной плакирующий материал. Применительно к производству двухслойных коррозионностойких насосно-компрессорных труб сварка взрывом позволяет плакировать внутреннюю поверхность стальных труб различной длины слоем из нержавеющей стали. Проведенные эксперименты показали, что сваркой взрывом можно получать биметаллические трубные заготовки с характеристиками, удовлетворяющие требованиям, предъявляемые к заготовкам под дальнейшую прокатку. Трубные заготовки, полученные сваркой взрывом после всех этапов контроля, подвергаются технологическому переделу (прокатке), в результате на выходе получают двухслойные насосно-компрессорные трубы длиной от 6 до 10 м. На основе результатов исследований разработана комплексная технология получения двухслойных материалов трубчатой формы (рисунок 5.1), сочетающая сварку и прокатку. Данная технология применяется для получения труб длиной 1000 мм и 2400 мм.

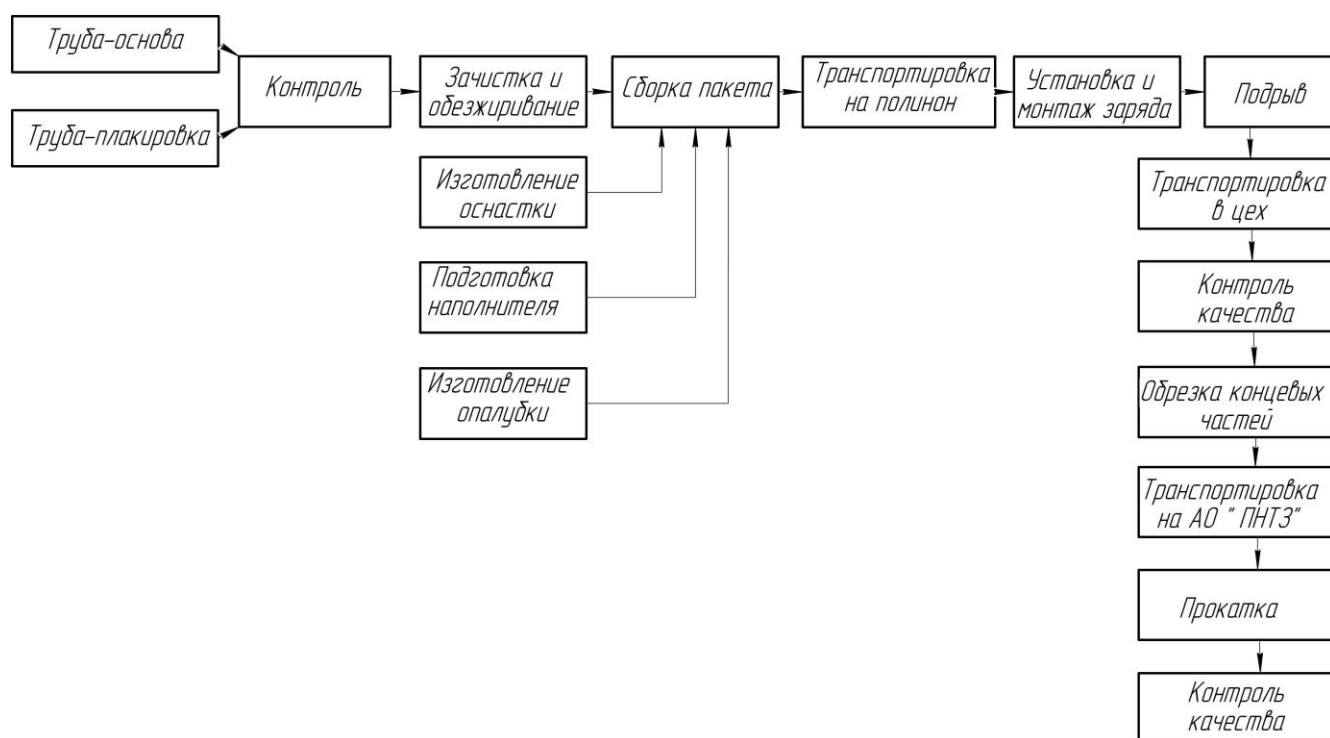


Рисунок 5.1 – Принципиальная схема двухстадийной технологии получения двухслойных насосно-компрессорных труб

После прибытия исходных труб на место сборки они осматриваются на наличие поверхностных дефектов. Трубы из стали 37Г2Ф подвергаются цветной дефектоскопии для проверки наличия трещин (рисунок 5.2).

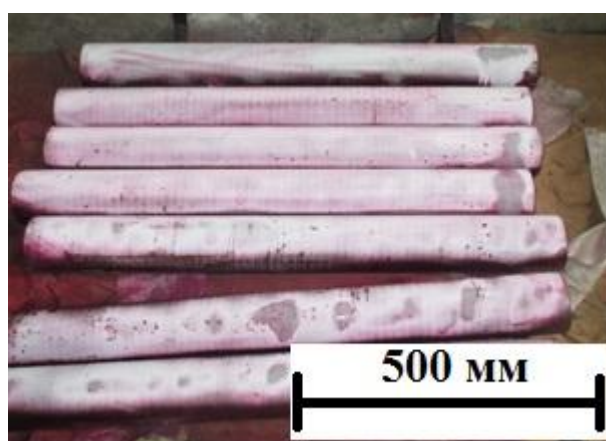
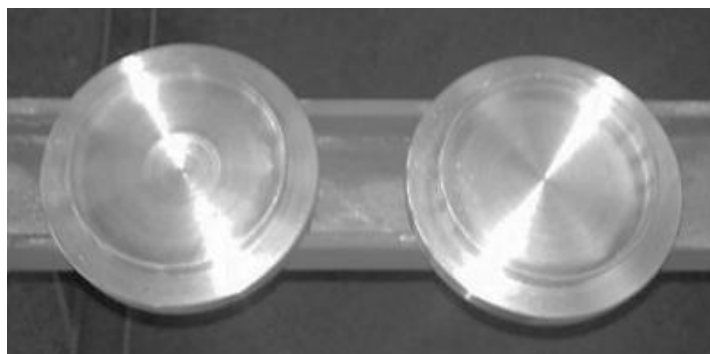


Рисунок 5.2 – Трубы из стали 37Г2Ф после цветной дефектоскопии

Для фиксирования зазора между трубами были изготовлены специальные стальные крышки с проточенным по диаметру под размер зазора пазом высотой 10 мм (рисунок 5.3, а). При использовании дисперсного твердо-жидкого

наполнителя (стальная дробь и вода) верхняя крышка изготавливалась с центральным отверстием, необходимым для его заполнения в полость собранных труб. Нижняя крышка вваривалась во внутреннюю трубу из стали 08X18H10T плотным герметичным швом аргонодуговой сваркой (рисунок 5.3, б) для предотвращения попадания воды в зазор между трубами.



а



б

Рисунок 5.3 – Первоначальный этап сборки: а – специальные крышки; б – нижние крышки, приваренные к трубам

После приварки нижней крышки поверхность нержавеющей трубы зачищается механическим способом и исходные трубы обезжиривают. Затем происходит сборка «труба в трубу» с приваркой крышек к основной наружной трубе по диаметру (рисунок 5.4).



а



б

Рисунок 5.4 – Сборка труб под сварку взрывом: а – установка центрирующей крышку на трубу-основу; б – сварной шов по диаметру кольца с трубой

Непосредственно на полигоне засыпается во внутреннюю полость твердо-жидкий наполнитель, устанавливается специальный защитный элемент на верхнюю часть сборки и заряд взрывчатого вещества. После укладывают забойку из песка и проводится подрыв зарядов для одновременного получения нескольких заготовок (рисунок 5.5).



Рисунок 5.5 – Смонтированные пакеты на полигоне

После взрыва заготовка проходит ультразвуковой контроль на сплошность соединения и отрезаются концевые участки с непроварами. Затем отбирают по два образца на металлографические исследования из начала и конца заготовки.

В результате получена опытно-промышленная партия трубных заготовок (12 штук) для насосно-компрессорных труб длиной 1000 и 2400 мм превышающей 30 диаметров (Приложение 1) сплошность соединения подтверждена ультразвуковым контролем. На рисунке 5.4а приведена партия биметаллических заготовок длиной до 1000 мм, на рисунке 5.4 б – длиной до 2400 мм.

Сваркой взрывом получают как готовые многослойные изделия, так и заготовки для дальнейшего технологического передела (холодной или горячей прокатки). Прокатка заготовок позволяет исключить недостатки присущие сварке взрывом [117].

Так как механические свойства в исходном состоянии после сварки взрывом были завышены и не удовлетворяли требованиям холодной деформации, то перед прокаткой на АО «ПНТЗ» была проведена термообработка труб (отжиг) с целью снижения прочностных свойств, повышения пластичности и снятия остаточных напряжений.



а



б

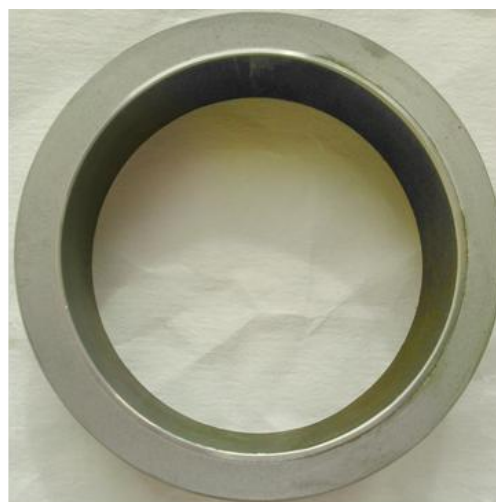
Рисунок 5.4 – Партия опытных биметаллических труб 37Г2Ф+08Х18Н10Т: а – длина заготовок до 1 метра; б – длина заготовок до 2,4 метра

После термической обработки проводилась холодная прокатка на стане холодной прокатки труб в два этапа: после первого этапа трубы имеют наружный диаметр 88 мм с толщиной стенки 11 мм (рисунок 5.5, а), а после второго –

чистой размер 73×7 мм (рисунок 5.5, б). После первой прокатки на размер $88 \times 11,0$ мм производилась термообработка (отжиг) для снижения прочностных механических свойств и повышения пластичности, после прокатки на готовый размер $73 \times 7,0$ мм проводилась термообработка (отжиг) для получения требуемых механических свойств в соответствии с нормативной документацией. После термообработок трубы промежуточного и готового размеров подвергались травлению для удаления окалины. На трубах готового размера изготовленных из заготовок сваркой взрывом с использованием дисперсной твердо-жидкой опоры глубина вмятин уменьшилась до 0,01 мм. Готовые трубы подвергались контролю сплошности соединения слоев труб методом ультразвуковой дефектоскопии.



а



б

Рисунок 5.5 – кольцевые образцы из прокатанных труб: а – после первого этапа прокатки; б – после второго этапа

После второго этапа прокатки трубные заготовки проходили механические испытания и испытания на коррозионную стойкость в ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» (Приложение 1). Механические испытания свойств биметаллических труб включали: испытания на изгиб плакирующим слоем внутрь и наружу по ГОСТ 14019, испытание на растяжение полнотолщинных образцов по ГОСТ 10006. В соответствии с ГОСТ 10885 «Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионностойкая» испытания на изгиб и растяжение от отобранного для контроля трубы отбирают: для испытания на растяжение – один

образец; для испытания на изгиб два образца (рисунок 5.6). Прочность сцепления слоев косвенно оценивали по результатам испытаний на изгиб.

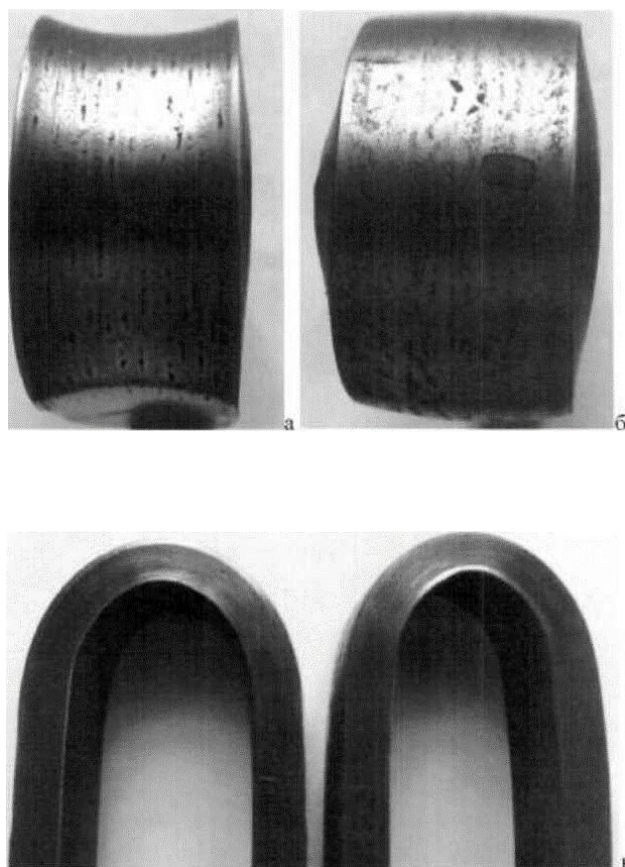


Рисунок 5.6 – Вид образцов после испытаний на изгиб: а – плакирующим слоем наружу; б – основным слоем наружу; в – общий вид

По полученным характеристикам механических свойств (таблица 5.1) биметаллическая труба относится к группе «К» по ГОСТ 633-80, при этом следует отметить высокое значение пластичности двухслойной стали.

Таблица 5.1 – Результаты механических испытаний полнотолщинных образцов

Материал	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
37Г2Ф+08Х18Н10Т	770-795	510-535	24,5

В соответствии с требованиями ГОСТ 6032 для испытаний на межкристаллитную коррозию (далее МКК) биметаллических труб

изготавливались образцы из плакирующего слоя после удаления механической обработкой основного и переходного слоев. Вид образцов для испытаний показан на рисунке 5.7.

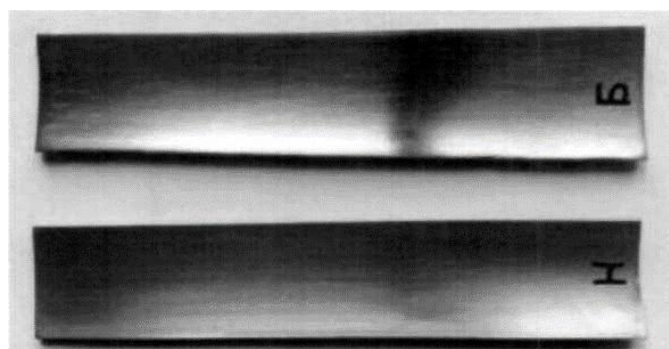


Рисунок 5.7 – Образцы для испытаний на МКК (Б - плакирующий слой, Н- мононержавеющая сталь)

Результаты испытаний показали, что, плакирующий слой биметалла из стали 08X18H10T является стойким против МКК.

Для оценки стойкости стали плакирующего слоя против питтинговой коррозии применяли химический метод, который заключается в выдерживании образцов в растворе $\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ с последующим определением потери массы образцов (рисунок 5.8). По полученным результатам можно констатировать, что стойкость против питтинговой коррозии плакирующего слоя образца биметаллической стали выше, чем образца из моносталя.

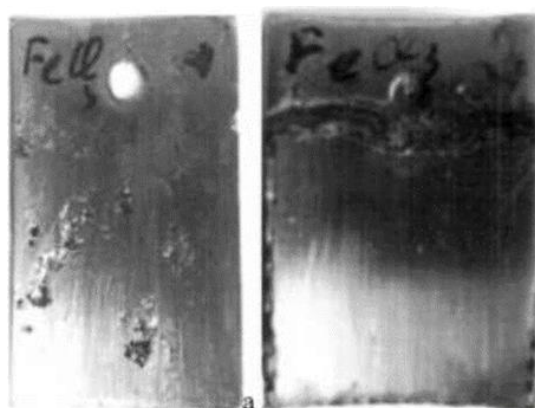


Рисунок 5.8 – Вид поверхности образцов после испытаний на питтинговую коррозию

Испытание на стойкость против коррозионного растрескивания проводили по методу четырехточечного изгиба по ГОСТ 9.901.2. Четырехточечное нагружения обеспечивает продольное растягивающее напряжение на выпуклой поверхности образца. Осмотр образцов после завершения испытаний не выявил на поверхности трещиноподобных дефектов ни на одном образце.

Результаты комплексных коррозионных испытаний показали, что плакирующий слой готовых биметаллических труб является стойким против межкристаллитной коррозии по ГОСТ 6032-2003 «Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии», стойким против питтинговой коррозии при испытании химическим методом по ГОСТ 9.912-89 (СТ СЭВ 6446-88) «Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии» и стойким против коррозии в сероводородной среде при испытании по методу четырехточечного изгиба по ГОСТ 9.901.2-89 (ИСО 7539/2-89) «Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Металлы и сплавы. Испытания на коррозионное растрескивание образцов в виде изогнутого бруса». Плакирующий слой двухслойной трубы имеет стойкость против общей коррозии не хуже стойкости стали 08X18H10T при испытании в CO_2 и H_2S – содержащих средах (Приложение 1).

5.2 Разработка и освоение промышленной технологии производства двухслойных стержней для токоподводов

Исследования главы 4 показали, что разработанные технологические основы производства двухслойных медно-титановых стержней позволяют получать биметаллические токоподводы длиной 1500 мм и диаметрами 22 и 35 мм.

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 была разработана промышленная технология получения сваркой взрывом длинномерных медно-титановых стержней, обеспечивающая требуемую сплошность соединения по всей поверхности и электросопротивление зоны соединения соответствующее техническим условиям на изделие (Приложение 2). Изготовление двухслойных медно-титановых стержней для токоподводов проводилось по разработанной промышленной технологии (рисунок 5.9).

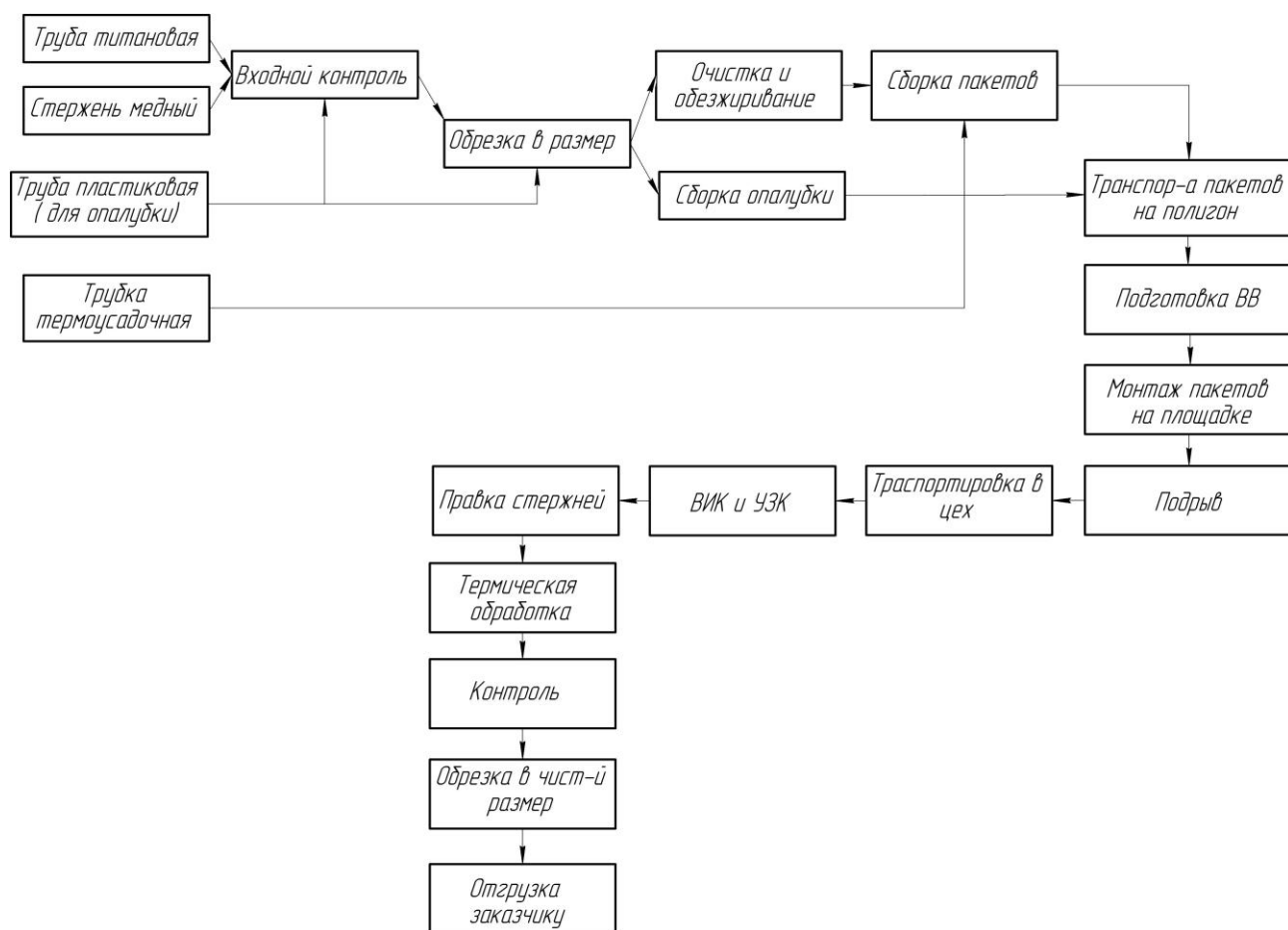


Рисунок 5.9 – Схема промышленной технологии получения сваркой взрывом биметаллических стержней титан ВТ1-0+ медь М1

Качество готового биметалла во многом зависит от качества исходных материалов, от соответствия их свойств заданным ГОСТ и ТУ. После поступления титановой трубы в сборочный цех её проверяют на наличие поверхностных дефектов, а также проводят испытания на сплющивание по ГОСТ 8695-75 (рисунок 5.10).

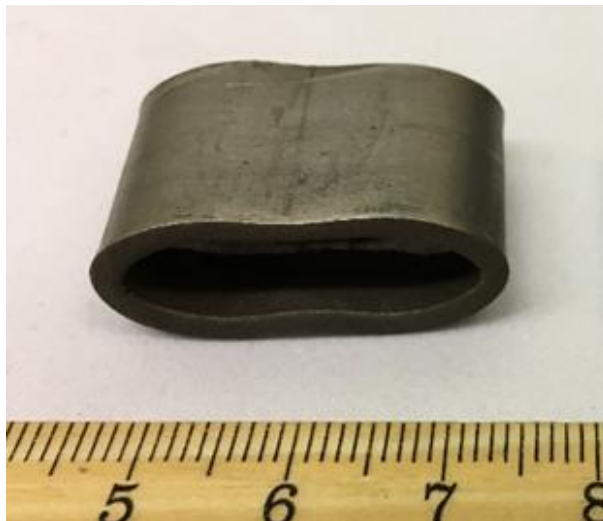


Рисунок 5.10 – Испытанный на сплющивание образец из титана ВТ1-0

В ходе проведения отработки технологии производства двухслойных медно-титановых стержней были выявлены случаи растрескивания титановых труб в поперечном направлении в процессе сварки взрывом (рисунок 5.11).

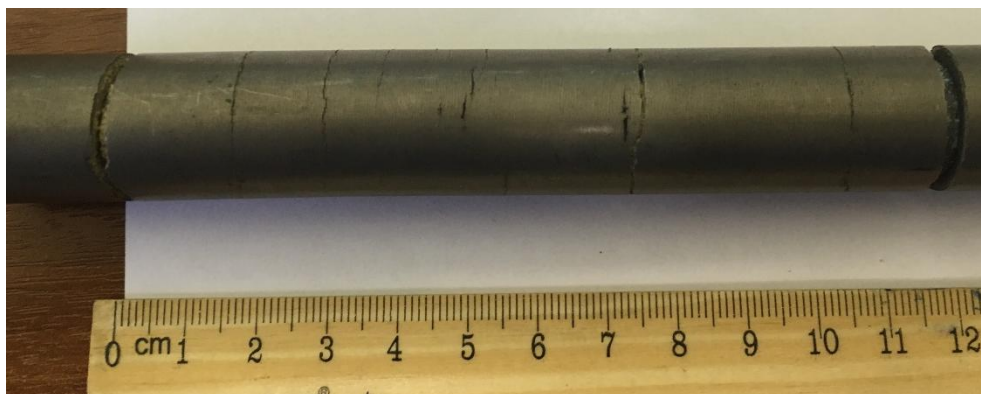


Рисунок 5.11 – Поперечные трещины в титановой трубе после сварки взрывом

Данного рода дефекты, по-видимому, происходят из-за несоблюдения режимов термической обработки предприятием-изготовителем титановых труб. После холодной деформации титановые сплавы подвергаются отжигу. Температура отжига должна быть выше температуры рекристаллизации ($T_{рек}=500^{\circ}\text{C}$), но не превышать границу перехода в β -состояние во избежание роста зерна [118] и дополнительного загрязнения атмосферными газами поверхности заготовки, которое приводит к охрупчиванию титана.

Вследствие вышеупомянутых факторов на производстве биметаллических стержней был введён входной контроль титановых труб, который заключался в сплющивании отобранных образцов до полного соприкосновения сторон (рисунок 5.12).



Рисунок 5.12 – Образец из титановой трубы VT1-0 после испытания на сплющивание до полного соприкосновения сторон

В результате введения такого входного контроля удалось выявить партии титановых труб, на поверхности которых были обнаружены трещины (рисунок 5.13), которые не выявляются испытанием по ГОСТ 8695-75.

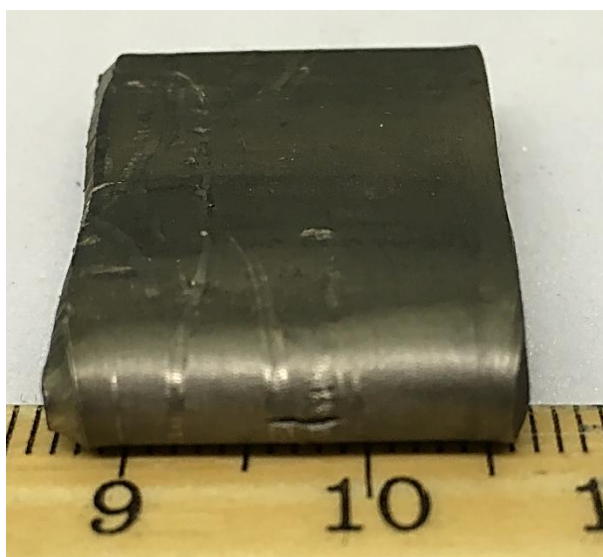
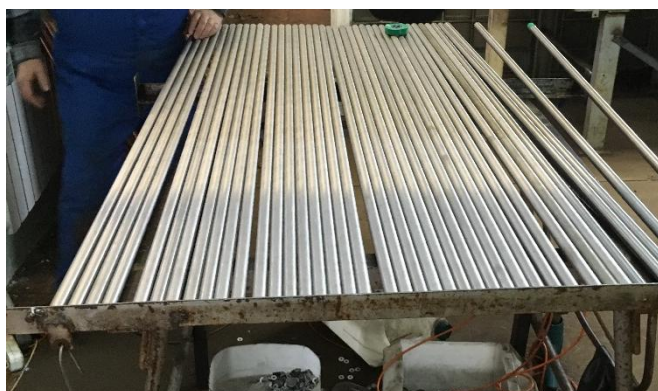


Рисунок 5.13 – Трещина в образце из титановой трубы после сплющивания

Таким образом, введение входного контроля, описанного выше, позволило исключить растрескивания титановых труб в процессе сварки взрывом и гарантировать получения бездефектных стержней.

После входного контроля медных стержней, титановых и пластиковых труб (используются для опалубки под взрывчатое вещество) осуществляется обрезка исходных материалов под размер сборки (рисунок 5.12).



а



б



в

Рисунок 5.12 – Исходные материалы после предварительной подготовки под размер сборки: а – трубы из титана VT1-0; б – медные стержни; в – пластиковые трубы для опалубки под ВВ

После обезжиривания поверхностей происходит сборка и на собранные стержни наносится термоусадочная трубка с помощью специального цилиндрического нагревателя (рисунок 5.13), который, в отличие от промышленного фена позволяет за один проход обжать до 4 стержней.



а



б

Рисунок 5.13 – Нанесение термоусадочной трубы на поверхность сборки стержня с титановой трубой на специальной установке: а – общий вид установки; б – процесс обжатия термоусадочной трубы на поверхности стержня

После сборки необходимого количества стержней они укладываются в вертикальном положении (рисунок 5.14, а), а затем вместе с опалубкой загружаются в транспорт (рисунок 5.14, б), который доставляет собранные стержни на взрывную площадку.



а



б

Рисунок 5.14 – Подготовленные в сборочном цехе стержни: а – после нанесения термоусаживаемой ленты; б – перед отправкой на взрывной полигон

На рисунке 5.15 приведена фотография, где показаны стержни, собранные на взрывной площадке.



Рисунок 5.15 – Установленные на полигоне перед взрывом заготовки (50 шт.)

После сварки взрывом (рисунок 5.16) двухслойные стержни отправляются обратно в сборочный цех, где они проходят ультразвуковой контроль и правку.



Рисунок 5.16 – Стержни после сварки взрывом на полигоне

На рисунке 5.17 показана партия биметаллических стержней до и после правки.

После ультразвукового контроля и правки осуществляется термическая обработка и обрезка в чистовой размер.



а



б

Рисунок 5.17 – Биметаллические стержни, полученные сваркой взрывом: а – до правки; б – после правки на прессе.

На рисунке 5.18 приведена партия биметаллических заготовок для токоподводов и штанг, готовых к отгрузке.



а



б

Рисунок 5.18 – Готовые к отгрузке заказчику биметаллические медно-титановые стержни: а – стержни диаметром 22 мм; б – стержни (штанги) диаметром 35 мм.

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 (Приложения 3 и 4). (рисунок 5.19).



Рисунок 5.19 – Анодные ячейки для электролизной ванны

Таким образом, для промышленного производства двухслойных стержней разработана механизированная линия, включающая в себя операции по:

1. Подготовке прутков из меди марки М1 и труб из титана ВТ1-0.
2. Сборке пакета с нанесением оболочки из термоусаживаемой ленты.
3. Изготовлению опалубки для заряда.
4. Одновременному монтажу на взрывной площадке до 100 зарядов.
5. Ультразвуковому контролю, термической обработке и правке готовых изделий.
6. Обрезке в чистовой размер.

Разработаны и утверждены в установленном порядке технические условия «ТУ 18827-002-21414987-2016 Пруток биметаллический титан+медь, изготовленный сваркой взрывом», определяющие технические требования к двухслойным стержням, изготовленным сваркой взрывом (Приложение 5).

Основным критерием оценки качества полученных сваркой взрывом медно-титановых стержней является сплошность соединения. Ранее было показано, что для обеспечения заданного параметра падения напряжения достаточно обеспечить сплошность соединения не менее 50%. В этой связи оценим вероятность получения оптимального соединения со сплошностью соединения не ниже требуемого. Для дальнейшего анализа были выбраны 700 стержней диаметром 22 мм, полученные сваркой взрывом по разработанной технологии. Данные стержни подвергались ультразвуковому контролю, после чего определялась площадь сплошности соединения по всей поверхности стержня. На рисунке 5.20 показано статистическое распределение значений площадей сплошности соединения в медно-титановых стержнях.

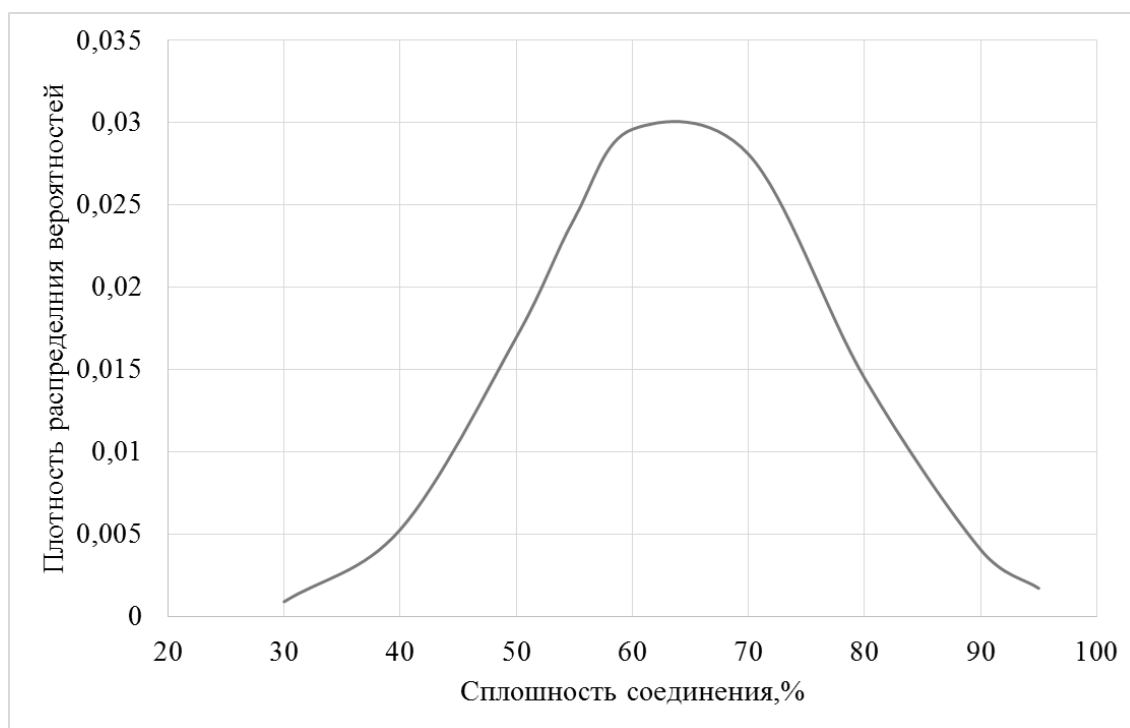


Рисунок 5.20 – Статистическое распределение значений сплошности соединения в стержнях диаметром 22 мм

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

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 стрежней, за 2017 – 25000 шт., за 2018 – 8500 биметаллических стрежней и штанг (Приложение № 2).

5.3 Выводы к Главе 5

1. Сваркой взрывом были получены биметаллические трубные заготовки требуемого качества с минимальным отклонением от цилиндричности и бездефектной наружной и внутренней поверхностью.

2. Металлографические исследования и механические испытания биметаллических трубных заготовок показали, что полученные сваркой взрывом трубные заготовки являются качественными и при последующей термической обработке могут подвергаться холодной деформации (прокатке).

3. По разработанным новой технологической схеме, режимам холодной деформации и термообработки были изготовлены образцы холоднодеформированных биметаллических труб размером 73х7,0 мм длиной до 2,2 м с удовлетворительным качеством поверхности и геометрическими параметрами.

4. По результатам механических испытаний биметаллические трубы, полученные по технологии «сварка взрывом + холодная деформация» по показателям прочностных характеристик, соответствуют группе К по ГОСТ 633-80. Как показали лабораторные коррозионные испытания плакирующий слой из стали 08X18H10T имеет высокую стойкость против коррозионного разрушения в различных средах, в том числе при воздействии сероводорода.

5. По результатам комплексных коррозионных испытаний следует отметить, что плакирующий слой двухслойных труб является: стойким против МКК при испытании по методу АМУ ГОСТ 6032, стойким против питтинговой коррозии при испытании химическим методом по ГОСТ 9.912, стойким против коррозионного разрушения в сероводородной среде при испытании по методу

четырехточечного изгиба по ГОСТ 9.901.2, стойким против общей коррозии при испытании в CO_2 - и H_2S -содержащих средах.

6. На предприятии ООО «Битруб» была освоена разработанная импортозамещающая технология сварки взрывом длинномерных цилиндрических изделий, а также механизированная линия, включающая различные этапы сборки, сварки и термической обработки готовых стержней. Промышленное производство сваркой взрывом медно-титановых стержней проходит согласно «ТУ18827-002-21414987-2016. Прутки биметаллический титан+медь, изготовленный сваркой взрывом».

7. По разработанной технологии сварки взрывом длинномерных цилиндрических изделий были изготовлены биметаллические стержни для предприятий АО «Тамбовское опытно-конструкторское технологическое бюро» и АО «Башкирская содовая компания», которыми были оснащены анодные ячейки ванн электролизеров никеля для АО «Кольская ГМК».

Общие 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+ОХНЗМ. 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+ОХНЗМ. Для пары материалов сталь ОХНЗМ и ниобиевый сплав Н65В2МЦ необходима корректировка режимов в сторону уменьшения скорости детонации, что позволит не допустить появления сплошных прослоек расплавов.

4. Сравнительный анализ результатов расчётов 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 длинномерных

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. Прутки 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».

Библиографический список:

1. Быков, А.А. Этапы развития производства биметаллов / А. А. Быков // *Металлург.* – 2009. – №8. – С. 70-75.
2. Чепурко, М.И. Биметаллические материалы / М.И. Чепурко. – Л.: Судостроение, 1984. – 272 с.
3. Чепурко, М.И. Производство биметаллических труб и прутков / М.И. Чепурко, В.Я. Остренко, А.А. Когадеев. – М.: Metallurgiya, 1986. – 240 с.
4. Титова, Т.И. Исследование служебных свойств и свариваемости биметалла нового поколения повышенной прочности и хладостойкости производства ОАО «Ижорские заводы» / Т. И. Титова, Э. С. Каган, И. Ф. Семернина // *Вопросы материаловедения.* – 2001. – №3(27). – С.73-76.
5. Полянский, С.Н. Плакированная сталь для нефтяной и газовой промышленности / С.Н. Полянский, В.С. Колногоров // *Химическое и нефтегазовое машиностроение.* – 2002. – №11. – С. 48-51.
6. Резников, Е.А. Производство биметаллических труб – эффективное направление экономии дорогих металлов / Е.А. Резников, Р.Г. Хейфец, А.И. Иртлач // *Сборник научных трудов «Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке».* – 1995. – Том 5. – 1994. – С. 71-72.
7. Способ производства биметаллических центробежно-литых заготовок и биметаллических износостойких труб для транспортировки абразивных сыпучих материалов и пульп на трубопрокатных установках с пилигримовыми станами // Патент России № 2278749. 2006. Бюль. №18. / Сафьянов А.В.
8. Фокин, Н. В. Особенности прессования биметаллических труб / Н. В. Фокин, Я. И. Космацкий. В кн: *Актуальные направления научных исследований: от теории к практике: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Чебоксары, 2015: материалы.* Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – С. 263-264.
9. Большаков, В.И. Анализ тенденций стабилизации подачи гильзы в валки пилигримового стана / В.И. Большаков, И.Б. Листопадов, К.В. Коноваленко. В кн: *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии, Днепропетровск, 2008: сб. науч.кон. Днепропетровск, 2008.* – №18. – С. 266-275.

10. Никитенко, К.А., Технологическое обеспечение качества газодетонационной футеровки бислойных труб / К.А. Никитенко, В.К. Борисевич // Авиационно-космическая техника и технология. – 2003. – №3. – С. 32-36.
11. Родионова, И.Г., Коррозионностойкие биметаллы с прочным сцеплением слоев для нефтехимической промышленности и других отраслей / И.Г. Родионова др. – М.: ЗАО Metallurgizdat, 2011. – 292 с.
12. Лысак, В.И. Сварка взрывом / В.И. Лысак, С.В. Кузьмин – М.: Машиностроение, 2005. – 544 с.
13. Селиванов, В.В. Взрывные технологии: учеб. для втузов / В.В. Селиванов, И.Ф. Кобылкин, С.А. Новиков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 648 с.
14. Петушков, В.Г. Применение взрыва в сварочной технике / В.Г. Петушков. – Киев.: Изд-во Наукова думка, 2005. – 753 с.
15. Конон, Ю.А., Сварка взрывом / Ю.А. Конон, Л.Б. Первухин, А.Д. Чудновский. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.
16. Беляков, М. О. Особенности формирования соединения при сварке взрывом толстолистовых композиционных материалов. / М.О. Беляков, Е. А. Чугунов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Известия ВолгТУ. – 2013. – № 18 (121) – С. 45-49.
17. Atomistic Simulation of the Explosion Welding Process/ Ossi Saresoja, Antti Kuronen and Kai Nordlund // Advanced engineering materials. – 2012. – №20. – pp. 1-4.
18. Basic Characteristics of the Explosive Welding Technique Using Underwater Shock Wave and Its Possibilities/ Kazuyuki Hokamoto , Yasuhiro Ujimoto and Masahiro Fujita // Materials Transactions. – 2004. – Vol. 45. – No. 9. – P. 2897-2901.
19. B. Crossland. Explosive Welding of Metals and Its Application. London.: Oxford University Press, 1982. – 123 p.
20. V. A. Simonov. Comparison of the lower boundaries for the welding region for two composites based on steel // 9th Int. Conf. of HERF, Novosibirsk 1986.

21. Deribas, A. A. Classification of flows arising with oblique impacts of metal plates. in: 2nd Int. Symp. 'Use of explosive energy for producing metal materials with new properties //Marianskie Lazni, Czechoslovakia, Pardubitse. – 1973.

22. Cowan, G. R., Bergman, O. R. and Holtzman, A. H., Mechanism of Bond Zone Wave Formation in Explosive-Clad Metals //Met. Trans. – 1971. – pp. 3144-3155.

23. Первухин, Л.Б. Очистка свариваемых поверхностей от окислов и загрязнений и их активация в процессе сварки взрывом / Л.Б. Первухин, О.Л. Первухина, С.Ю. Бондаренко // Автоматическая сварка. – 2010. – №7. – С. 46-49.

24. Recent developments in explosive welding/ Fehim Findik // Materials and Design. – 2011. – №32. – pp. 1081–1093.

25. Добрушин, Л. Д. Тепловые явления на волнообразной поверхности соединения при сварке взрывом / Л.Д. Добрушин, Ю. И. Фадеев // Известия ВолГТУ. – 2006. – №9, С. 23-24.

26. Бердыченко, А. А. Процессы, происходящие во время образования сварного соединения при сварке взрывом // Ползуновский вестник. – 2009. – №4. – С. 211-215.

27. Гринберг, Б. А. Процессы расплавления, вихреобразования и фрагментации при сварке взрывом / Б. А. Гринберг и др. // Сварка и Диагностика. – 2010. – №6. – С. 34-38.

28. Кузьмин, С. В. Особенности пластической деформации металла околошовной зоны при сварке взрывом разнородных металлов / С. В. Кузьмин и др. // Известия ВолГТУ. – 2010. – № 4. – С. 4-11.

29. Бондарь, М. П. О пластической деформации в зоне соединения при плакировании взрывом /М. П. Бондарь, В. М. Оголихин // Физика горения и взрыва. – 1985. –Т.21. – №2. – С. 147-157.

30. Гульбин, В. Н. Деформация в биметалле при высокоскоростной сварке / В. Н. Гульбин, К. К. Красиков //Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерная техника и технология. – 1989. – Вып. 5. – С. 29-33.

31. Денисов, И.В. Деформационные процессы при сварке взрывом / И.В. Денисов и др. // Известия ВолГТУ. – 2008. –№ 6. – С. 39-45.

32. Первухин, Л.Б. О возможности применения плакированных трубных досок для изготовления теплообменного оборудования / Л.Б. Первухин и др. // Вопросы атомной науки и техники. – 2012. – №31. – С. 83-91.
33. Дерибас, А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом / А.А. Дерибас. – Новосибирск.: Наука, 1980. – 222 с.
34. Захаренко, И.Д. Сварка металлов взрывом / И.Д. Захаренко. – Мн.: Наука и техника, 1990. – 205 с.
35. Корохов, В.Г. Созидательный взрыв, применение взрыва в сварке / В.Г. Корохов, П.Г. Лавринев, А.А. Стрижак // Строительство и техногенная безопасность. – 2007. – № 18. – С. 87-90.
36. Wei Deng, Ming Lu, Xiaojie Tian, Ruxun Dai. Experimental and Interfacial Waveform investigation on Aluminum/Stainless Steel Composite Tube by Explosive Welding // Advances in Mechanical Engineering and its Applications (AMEA) Vol. 3. – №2. – 2013. – pp. 3621-3625.
37. SUN Xian-jun, TAO Jie, GUO Xun-zhong. Bonding properties of interface in Fe/Al clad tube prepared by explosive welding // Nonferrous Met. Soc. China. – 2011. – Vol.21.–№10. – pp. 2175–2180.
38. R. Mendes, J.B. Ribeiro, A. Loureiro. Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration //. Materials and Design. – 2013. – №51. – pp. 182–192.
39. Крупин, А.В., Деформация металлов взрывом /А.В. Крупин и др. – М.: Металлургия, 1975. – 416 с.
40. Дидык, Р.П. Разработка технологических основ и промышленное освоение процессов плакирования и упрочнения металлов взрывом: дис. докт. техн. Наук : 05.16.05 / Р.П. Дидык. – Днепропетровск, 1979. – 330 с.
41. Добрушин, Л.Д. Канальный эффект при сварке взрывом / Л.Д. Добрушин и др. – Автоматическая сварка. – 2009. – №11. – С. 19-21.
42. Мелихов, В.П. О длине устойчивости сварки взрывом эксцентрично расположенных цилиндров. // Сварка и резка взрывом. / Под ред. Докт. техн. наук В.М. Кудинова. – К.: Изд. ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР, 1979. – С. 25-28.

43. Дидык, Р.П. Приближенный расчет осесимметричных движений стенки трубы при деформации взрывом / Р.П. Дидык, С.С. Красновский, А.Г. Тесленко // Физика горения и взрыва. – 1968. – №2. – С. 260-265.
44. Первухин, Л.Б. Теоретические и технологические основы промышленного производства биметаллов/ Л.Б. Первухин, О.Л. Первухина, С.Ю. Бондаренко // Известия ВолГТУ. – 2010. – № 4. – С. 75-82.
45. Бердыченко, А. А. Исследование возможности самоочищения поверхностей при сварке взрывом в результате действия температурных напряжений / А. А. Бердыченко, М. Х. Флат //Ползуновский альманах. – 2010. – №10.– С. 210-214.
46. Ишуткин, С.Н. Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин / С. Н. Ишуткин, В. И. Кирко, В. А. Симонов // Физика горения и взрыва – 1980. – № 6. – С. 69-73.
47. Бердыченко, А. А. О возможном возгорании выбрасываемых в зазор частиц при сварке титана взрывом / А. А. Бердыченко и др. // Физика горения и взрыва – 2003. – № 2. – С. 128–136.
48. Первухин, Л.Б. К вопросу о предельных размерах листов, получаемых сваркой взрывом / Л.Б. Первухин и др. // Известия ВолГТУ – 2016. – № 10. – С. 76– 86.
49. Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов /Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин. – М.: Высшая школа, 2001. – 625 с.
50. Рыбин, В.В. Особенности строения разориентированных структур в бислойной пластине медь–медь, полученной сваркой взрывом /В.В.Рыбин, Э.А. Ушанова, Н.Ю. Золоторевский // Журнал технической физики. – 2013. – том 83. – вып. 9. – С. 63-72.
51. Бердыченко, А.А. Влияние газовой среды в зазоре при сварке взрывом на структуру соединения / А.А. Бердыченко, О.Л. Первухина // Вестник ТамбГУ. – 2016. -Т. 21. – вып. 3.– С. 894-896.

52. Лось, И.С. Медно-алюминиевые композиционные материалы, полученные сваркой взрывом / И.С. Лось, Д.Б. Крюков, А.В. Хорин // Известия ВолгГТУ. – 2010. – Вып. 4. – том 5. – С. 88-92.

53. Оголихин, В.М. Сварка взрывом в электрометаллургии / В.М. Оголихин, И.В. Яковлев; отв. Ред. Б.Д. Аннин. – Рос. Акад. Наук, Сиб. Отд-ние, Ин-т гидродинамики им. М.А. Лаврентьева. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 160 с.

54. Рябов В. Р. Сварка разнородных металлов и сплавов / В.Р. Рябов и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 239 с.

55. Maryam Roudbari, Ali Mehdipoor, Reza Azarafza. Heat treatment of Stainless steel 316L- Titanium Bimetal Manufactured By Explosive Welding // Intl. Res. J. Appl. Basic. Sci. – 2013. – Vol. 7 (10). –pp. 687-692.

56. Bateni M. R. et al. Formation of Ti–Cu intermetallic coatings on copper substrate //Materials and Manufacturing Processes. – 2001. – Т. 16. – №. 2. – pp. 219-228.

57. Шморгун, В.Г Структура и механические свойства металло-интерметаллидных композитов системы Ti – Cu / В.Г. Шморгун и др. // Вестник Сибирского гос. индустриального ун-та. – 2014. – № 1. – С. 3-6.

58. Бердыченко, А. А. Способы получения биметалла сталь-титан. Исторический обзор / А.А. Бердыченко //Ползуновский Вестник. – 2017. – №4. С. 129-137.

59. Бердыченко, А. А. О возможном возгорании выбрасываемых в зазор частиц при сварке титана взрывом / А.А. Бердыченко и др. // Физика горения и взрыва – 2003. – № 2. – С. 128–136.

60. Первухина О.Л. Особенности сварки взрывом стали с титаном в защитной атмосфере / О.Л. Первухина и др. // Автоматическая сварка. – 2009. – №11. – С.23-26.

61. Моисеев, В. Н. Сварные соединения титановых сплавов / В.Н. Моисеев. – М.: Металлургия, 1979. – 246 с.

62. Райнхарт, Д. С. Взрывная обработка металлов [Текст] / Д.С. Райнхарт, Д. Пирсон / Пер. с англ. [и предисл.] д-ра физ.-мат. наук В. С. Ленского. – М.: Мир, 1966. – 391 с.

63. Дидык, Р.П. Определение кинематических параметров трубы при взрывном нагружении / Р.П. Дидык, С.С. Красновский, А.Г. Тесленко // Высокопроизводительные методы сварки в химическом и нефтяном машиностроении, Москва, 1965.

64. Качан, М.С. Способы устранения разрушающего воздействия ударных волн при сварке взрывом цилиндрических деталей / М.С. Качан, Ю.В. Киселев, Ю.А. Тришин. Кн: Тезисы докладов всесоюзного совещания по сварке и резке взрывом. – Киев, 1973, С. 17-18.

65. Цемахович, Б.Д. Влияние опоры на разрушение изделий при сварке взрывом / Б.Д. Цемахович. Кн: Труды всесоюзной межвузовской научной конференции по обработке металлов взрывом. – Москва, 1980. – С. 10-15.

66. Денисов, И. В. Особенности процесса деформации при сварке взрывом крупногабаритного биметалла / И.В. Денисов, О. Л. Первухина, Л. Б. Первухин // Новые перспективные материалы и технологии их получения (НПМ-2010): сб. науч. тр. V Междунар. конф. / Волгоград, гос. техн. ин-т. - Волгоград: ИУНЛ ВолГТУ. – 2010. – С. 175-176.

67. Денисов, И. В. Компьютерное моделирование деформации составляющих слоев биметалла в процессе сварки взрывом с использованием программы LS-DYNA [Текст] / И. В. Денисов и др. // Известия ВолГТУ. – 2010. – № 5 (65). – Вып. 4. – С. 66–74.

68. Батраков, В.В. Коррозия конструкционных материалов. Газы и неорганические кислоты: справочное издание: в двух книгах. Кн.1. Газы и фреоны / В.П. Батраков, Л.Н. Пивоварова, В.В. Соболев – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: «Интермет Инжиниринг», 2000. – 344 с.

69. Азаренков, Н.А. Коррозия и защита металлов. Часть 1. Химическая коррозия металлов: учеб. пособие. / Н.А. Азаренков, С.В. Литовченко, И.М. Неклюдов, П.И. Стоев. – Харьков: ХНУ, 2007. – 287 с.

70. Кравцов, В.В., Коррозия и защита конструкционных материалов. Принципы защиты от коррозии: учебное пособие / В.В. Кравцов. –Уфа.: изд-во УГНТУ, 1999 – 157 с.

71. Родионова, И.Г. Коррозионностойкие биметаллы с прочным сцеплением слоев для нефтехимической промышленности и других отраслей / И.Г. Родионова и др. – М.: ЗАО Metallurgizdat, 2011. – 292 с.

72. Рябов, В. Р. Сварка разнородных металлов и сплавов / В.Р. Рябов и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 239 с.

73. Чарухина, К.Е. Биметаллические соединения / К.Е. Чарухина и др. Изд-во Metallurgia, 1970. – 280 с.

74. Голованенко, С.А., Производство биметаллов / С.А. Голованенко, Меандров Л.В. – М.: Metallurgia, 1966 - 168 с.

75. Сиротенко, Л.Д. Применение биметаллических материалов в машиностроении / Л.Д. Сиротенко, Е.С. Шлыков, Т.Р. Абляз // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – С. 163-170.

76. Родионова, И.Г. Современные подходы к повышению коррозионной стойкости и эксплуатационной надежности сталей для нефтепромысловых трубопроводов / И.Г. Родионова и др. – М.: Metallurgizdat, 2012. – 172 с.

77. Фрейдлин, М.О. Проблема выбора стали для насосно-компрессорных труб, эксплуатируемых в углекислотных средах / М.О. Фрейдлин, С.А. Шамухамедов // Коррозия территории Нефтегаз. – 2011. – №1. – С.28-34.

78. Скрипко, С.А. Эффективная защита НКТ в коррозионном фонде / С.А. Скрипко // Нефтегазовая вертикаль. – 2011. – №5. – С. 62-63.

79. Тихомиров, В.И. Эффективная эксплуатация насосно-компрессорных труб / В.И. Тихомиров, Ф.В. Кухоль // Коррозия территории нефтегаз. – 2011. – №3. – С. 42-45.

80. Ивановский, В.Н. Коррозия скважинного оборудования и способы защиты от нее / В.Н. Ивановский // Коррозия территории Нефтегаз. – 2011. – №1. – С.18-25.

81. Богатов, Н.А. Развитие технологии изготовления труб в коррозионностойком исполнении / Н.А. Богатов и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2015. – №4. – С. 33-38.

82. Туктанов, А.Г. Технология производства стрелково-пушечного и артиллерийского оружия: учебник для студентов вузов / А.Г. Туктанов. – М.: Машиностроение, 2007. – 375 с.

83. Орлов, В.Б. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий / В.Б Орлов, Э.К. Ларман, В.Г. Маликов. – М.: Машиностроение, 1976. – 432 с.

84. Иванова, Н.П. Гидроэлектрометаллургия: электронный конспект лекций для студентов специальности 1-48 01 04 «Технология электрохимических производств» / Н.П. Иванова, И. А. Великанова. – Минск.: БГТУ, 2010. – 103 с.

85. Грудев, А. П. Теория прокатки [Текст]: учеб. для вузов / А.П. Грудев. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с.

86. Шевакин, Ю. Ф. Станы холодной прокатки труб [Текст] / Ю.Ф. Шевакин и др. // Определение характеристик надежности и технического состояния оборудования сероводородсодержащих нефтегазовых месторождений. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. – 239 с.

87. Робертс, В. Л. Холодная прокатка стали [Текст] / В. Л. Робертс; пер. с англ. П.И. Полухин, В.П. Полухин. – М.: Металлургия, 1982. – 544 с.

88. Смитлз, К. Дж. Металлы [Текст]: справ. изд. / К. Дж. Смитлз. – М.: Металлургия, 1980. – 447 с.

89. Горелик, С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. // С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев. – М.: МИСИС. – 2002. – 360 с.

90. Фетисов, Г. П. Материаловедение и технология металлов [Текст]: учеб. для студентов машиностроительных специальностей вузов / Г.П. Фетисов и др. // Под ред. Г.П. Фетисова. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 638 с.

91. Ермолов, И.Н. Ультразвуковой контроль: учебник для специалистов первого и второго уровня квалификации / М.И. Ермолов. – М.: 2006. – 208 с.

92. Гельман, А.С. Основы сварки давлением / А.С. Гельман. – М.: Машиностроение, 1970. – 312 с.

93. Масленков, С.Б. Жаропрочные стали и сплавы: справочник / С.Б. Масленков. – М.: Металлургия, 1983. – 192 с.

94. Быков, Ю.Г. Применение нового жаропрочного сплава ВЖ171 в конструкции перспективного двигателя / Ю.Г. Быков и др. // Вестник двигателестроения. – 2012. – № 2. – С. 246–249.

95. Бухановский, В. В. Высокотемпературная прочность ниобиевого сплава 5ВМЦ с силицидно-керамическим защитным покрытием: сообщение 1. Характеристики кратковременной прочности / В.В. Бухановский и др. // Проблемы прочности. – 2004. – № 2. – С. 119-129.

96. Лысак, В. И. Развитие представлений о нижней границе сварки металлов взрывом / В.И. Лысак, С. В. Кузьмин // Автоматическая сварка. – 2009. – № 11. – С. 7- 14.

97. Седых, В. С. Сварка взрывом и свойства сварных соединений / В. С. Седых, Н. Н. Казак – М.: Машиностроение, 1971. – 70 с.

98. Седых, В. С. Расчет энергетического баланса процесса сварки взрывом / В. С. Седых, А. П. Соннов // Физика и химия обработки материалов. – 1970. – №2. – С. 6-13.

99. 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.

100. Кудинов, В.М. Сварка взрывом в металлургии / В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев. – М.: Металлургия, 1978. – 166 с.

101. 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.

102. Лякишев, Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: в 3 т. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 996 с.

103. 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.

104. Курилкин, В.В. Исследование структуры границы соединения в биметалле сталь 08X18H10T + 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.

105. Maliutina, Iu. N. Explosive welding of titanium with stainless steel using bronze-tantalum as interlayer / Iu. N. Maliutina and all. // The 9 th International Forum on Strategic Technology, Bangladesh, Chittagong, 21–23 October 2014. – Bangladesh: CUET, 2013. – PP. 436–439. [Сварка взрывом титана с нержавеющей сталью, используя бронзу-тантал в качестве промежуточного слоя].

106. 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.

107. 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.

108. Душин, Ю.А. Работа теплозащитных материалов в горячих газовых потоках / Ю.А. Душин. – Л.: Химия, 1968. – 210с.

109. Зельдович, Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 2008. – 656 с.

110. 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.

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

112. 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. B. Pervukhin // Inorganic Materials: Applied Research, 2018, Vol. 9, No. 2, PP. 347–350, DOI: 10.1134/S207511331802020X.

113. 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.

114. Первухина, О. Л. Деформационные и термодинамические условия при плакировании титаном цилиндрических деталей методом сварки взрывом / О. Л. Первухина и др. // Технология машиностроения. – 2010. – №7. – С. 30–33.

115. 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.

116. 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.

117. 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.

118. Солнцев, Ю.П. Материаловедение: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по металлургическим, машиностроительным и общетехническим специальностям / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин; под ред. Ю. П. Солнцева. - 4-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург.: Химиздат, 2007. – 783 с.



П Н Т З

Акционерное общество «Первоуральский новотрубный завод»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по результатам НИР: «Разработка технологии и изготовление опытных образцов двухслойных НКТ из передельных труб, изготовленных методом сварки взрывом».

НИР проводился в соответствии с протоколом о намерениях №1-2013 и письмом №Т50-238 от 14.04.14 в ООО "Битруб Интернэшнл" на заготовках передельных труб, поставленных АО "Первоуральский Новотрубный завод".

Материал исследования: биметаллические трубы из стали марок 37Г2Ф (пл.337412) и 08Х18Н10Т (пл.1366885), изготовленной по ПР 4/42-2013 к ГОСТ 8731-74/8732-78.

ИССЛЕДОВАНИЕ

1. Разработка технологии плакирования взрывом длинномерных трубных заготовок в ООО "Битруб Интернэшнл".

Эксперименты по сварке взрывом проводились в два этапа по разработанной опытной технологии:

- Сварка взрывом биметаллических трубных заготовок длиной 1000 мм по схеме метания толстой трубы 108х12 мм из стали 37Г2Ф на тонкую 80х2 мм из стали 08Х18Н10Т. Для исключения деформаций и обеспечения качественного соединения слоёв в процессе сварки взрывом были разработаны два вида опор, которые устанавливались внутрь трубы 80х2 мм: дисперсная твёрдо - жидкая опора и сплошной стержень с акустически изолирующим слоем между трубой и стержнем из поваренной соли. В результате была изготовлена опытная партия биметаллических трубных заготовок длиной 1000 мм, от концевых частей которых были отобраны образцы для проведения исследований качества соединения. Опытная партия заготовок (таблица 1) была отпущена на АО "ПНТЗ" для изготовления биметаллических труб методом холодной прокатки (рисунок 1).
- На основании проведённых экспериментов и исследования качества соединения слоёв, величины продольной и радиальной деформации труб осуществлялся второй этап изготовления опытной партии труб длиной 2400 мм (рисунок 2).



Рисунок 1



Рисунок 2

Биметаллические трубные заготовки опытной партии подвергали визуально-измерительному контролю, ультразвуковому контролю сплошности соединения, капиллярному контролю наружной поверхности труб и исследованию микроструктуры зоны соединения на образцах, вырезанных из концевых участков труб.

Таблица 1. Характеристики опытной партии биметаллических трубных заготовок

Номер трубы	Длина трубы (после резки), м	Масса трубы (теоретическая), кг	Диаметр, мм*		Толщина стенки, мм**		Овальность, %
			d ₁	d ₂	S ₁	S ₂	
С1	0,520	16,6	73,6	73,3	14,9	14,8	0,1
№5с	0,860	27,5	73,2	72,9	14,9	14,8	0,1
Д1	0,748	23,9	72,5	73,7	15,1	15,4	0,1
№1	0,886	28,4	71,1	72,6	15,6	14,9	0,3
№2	0,908	29,1	70,8	71,8	14,4	15,5	0,3
№3	0,788	25,2	73,1	72,1	15,0	15,4	0,2
№4	0,827	26,5	73,2	72,7	15,0	15,4	0,2
Примечание							
*- d ₁ , d ₂ – внутренний диаметр биметаллических трубных заготовок со стороны начала и конца заготовок соответственно.							
**- S ₁ , S ₂ – толщина стенки трубы со стороны начала и конца заготовок соответственно.							

Результаты исследований в АО "ПНТЗ"

1. Исследование биметаллических трубных заготовок

Металлографическими исследованиями поперечных и продольных шлифов до и после травления установлено следующее:

- отсутствие трещин и расслоений в плакирующем слое и основном металле, а также между слоями;
- обнаружена переходная зона на стыке основного и плакирующего слоя величиной 0,010-0,014 мм;
- толщина плакирующего слоя - 2,40-2,48 мм (таблица 2);
- на внутренней поверхности трубных заготовок, изготовленных с использованием дисперсной твердо-жидкой опоры имеются вмятины глубиной до 0,26 мм.

Таблица 2 – Результаты замеров толщины плакирующего слоя

	Толщина плакирующего слоя, мм, в квадрантах			
	Квадрант №1	Квадрант №2	Квадрант №3	Квадрант №4
	2,42	2,42	2,46	2,40
	2,44	2,46	2,48	2,46
	2,46	2,48	2,48	2,44
Среднее:	2,44	2,45	2,47	2,43

Испытание на растяжение проводили в соответствии с ГОСТ 10006 на продольных образцах тип III-5, изготовленных из основного металла (сталь марки 37Г2Ф).

Испытание на загиб проводили в соответствии с ГОСТ 3728 на угол загиба 160° (плакирующим слоем вовнутрь) и 90° (плакирующим слоем наружу).

Результаты испытаний механических и технологических свойств представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Механические и технологические свойства

№ обр.	Механические свойства					Загиб (на 160°)	Загиб (на 90°)
	σ_B	σ_T	$\delta_5, \%$	$\Psi, \%$	σ_T / σ_B		
1-1	909,0	813,0	17,5	56,0	0,89	удовл.	удовл.
1-2	910,0	819,5	15,5	55,0	0,90	-	-

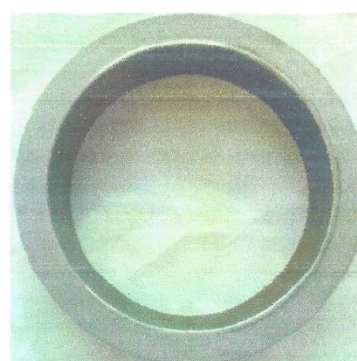
2. Двухстадийная холодная прокатка биметаллических трубных заготовок для НКТ

Так как механические свойства в исходном состоянии после сварки взрывом были завышены и не удовлетворяли требованиям холодной деформации, то перед прокаткой была проведена термообработка труб (отжиг) с целью снижения прочностных свойств, повышения пластичности и снятия остаточных напряжений.

После термической обработки проводилась холодная прокатка на стане холодной прокатки труб в два этапа: после первого этапа трубы имеют наружный диаметр 88 мм с толщиной стенки 11 мм (рисунок 3а), а после второго – чистовой размер 73×7 мм (рисунок 3б). После первой прокатки на размер 88×11,0 мм производилась термообработка (отжиг) для снижения прочностных механических свойств и повышения пластичности, после прокатки на готовый размер 73×7,0 мм проводилась термообработка (отжиг) для получения требуемых механических свойств в соответствии с НД. После термообработок трубы заготовки, трубы промежуточных и готового размеров подвергались травлению для удаления окалины.



а



б

Рисунок 3 – Кольцевые образцы из прокатанных биметаллических труб: а – после первого этапа прокатки; б – после второго этапа

На трубах готового размера изготовленных из заготовок сваркой взрывом с использованием дисперсной твердо-жидкой опоры глубина вмятин уменьшилась до 0,01 мм.

На готовом размере трубы подвергали контролю сплошности соединения слоев труб методом ультразвуковой дефектоскопии.

3. Исследования биметаллических труб 37Г2Ф+08Х18Н10Т, полученных комбинированным методом «сварка взрывом + холодная деформация»

3.1 Механические испытания

Механические испытания свойств биметаллических труб включали: испытания на изгиб плакирующим слоем внутрь и наружу по ГОСТ 14019, испытание на растяжение полнотолщинных образцов по ГОСТ 10006.

В соответствии с ГОСТ 10885 «Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионностойкая» для испытания на изгиб и растяжение от отобранного для контроля листа (в данном случае трубы) отбирают: для испытания на растяжение - один образец; для испытания на изгиб два образца. Прочность сцепления слоев косвенно можно оценивать по результатам испытания на изгиб.

На рисунке 4 приведен вид образцов после испытаний, из которого видно, что образцы выдержали испытание как плакирующим слоем внутрь, так и наружу.

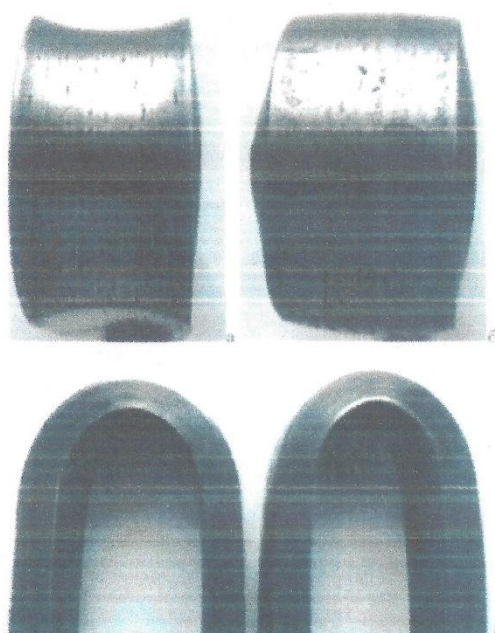


Рисунок 4 – Вид образцов после испытаний на изгиб: а – плакирующим слоем наружу; б – основным слоем наружу; в – общий вид

При испытании на растяжение полнотолщинных образцов были получены следующие значения механических характеристик:

1. предел прочности, σ_b – 794 и 777 МПа;
2. предел текучести, σ_t – 532 и 512 МПа;
3. относительное удлинение, δ_5 – 24,5 и 24,5%.

По полученным характеристикам механических свойств биметаллическая труба относится к группе «К» по ГОСТ 633-80, при этом следует отметить высокое значение пластичности двухслойной стали.

3.2 Коррозионные испытания образцов

3.2.1 Испытания плакирующего слоя на МКК по ГОСТ 6032

В соответствии с требованиями ГОСТ 6032 для испытаний на МКК биметаллических груб изготавливают образцы из плакирующего слоя после удаления механической обработкой основного и переходного слоев. Вид образцов для испытаний показан на рисунке 5.

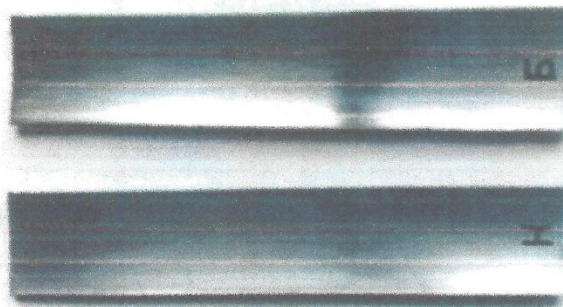


Рисунок 5 – Образцы для испытаний на МКК (Б - плакирующий слой, Н-монокристаллическая сталь)

Таким образом, плакирующий слой биметалла является стойким против МКК.

3.2.2 Испытание плакирующего слоя на стойкость против питтинговой коррозии по ГОСТ 9.912

Для оценки стойкости стали плакирующего слоя против питтинговой коррозии применяли химический метод, который заключается в выдерживании образцов в растворе $\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ с последующим определением потери массы образцов (рисунок 6). По полученным результатам можно констатировать, что стойкость против питтинговой коррозии плакирующего слоя образца биметаллической стали выше, чем образца из моносталя.

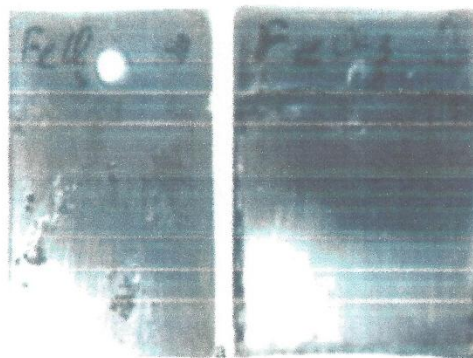


Рисунок 6 – Вид поверхности образцов после испытаний на питтинговую коррозию

3.2.3 Испытания плакирующего слоя на стойкость против коррозионного растрескивания в сероводородной среде

Испытание на стойкость против коррозионного растрескивания проводили по методу четырехточечного изгиба по ГОСТ 9.901.2. Четырехточечное нагружения обеспечивает продольное растягивающее напряжение на выпуклой поверхности образца. Полученные свойства образцов представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты испытаний на растяжение образцов плакирующего слоя и моносталей 08X18H10T

Образец	σ_b , МПа	σ_T , МПа	у при 60% σ_T , мм	у при 70% σ_T , мм	у при 80% σ_T , мм
Плакирующий слой	681	332	1,99	2,32	2,66
Моносталь	665	276	2,1	2,4	2,8

Осмотр образцов после завершения испытаний не выявил на поверхности трещиноподобных дефектов ни на одном образце.

3.2.4 Испытания на общую коррозию в модельных средах

Испытания в среде, насыщенной CO_2 , проводили в растворе 5%NaCl+0,5%CH₃COOH+CH₃COONa в течение 720 часов при комнатной температуре. В таблице 5 приведены результаты испытаний.

Таблица 5 – Результаты испытаний на общую коррозию в CO_2 -содержащей среде

№ патрубка	Исходный вес, г	Вес после испытаний, г	Потеря массы, г	Площадь рабочей поверхности, см ²	Скорость потери массы, г·м ⁻² ·ч ⁻¹
5	4,922	5,26	0,0	17,71	0,0
5	5,1	5,185	0,003	18,4	0,0097
3	52,589	52,577	0,012	7,26	0,0984
4	53,424	53,414	0,01	7,425	0,0802

Как следует из таблицы 5 скорость общей коррозии образцов биметалла выше, чем монометалла. Возможно это связано с тем, что при сушке и очистке образцов от осадка продуктов коррозии могли быть удалены частицы парафина. По состоянию рабочей поверхности после испытаний можно отметить, что существенных различий между поверхностью плакирующего слоя и рабочей поверхностью образцов монометалла не выявлено.

Испытания в H_2S -содержащей среде проводили в растворе 5%NaCl+500 мг/дм³ H_2S . Продолжительность испытаний составила 164 ч. В таблице 6 приведены результаты испытаний.

Таблица 6 – результаты испытаний на общую коррозию в H_2S -содержащей среде

№ патрубка	Исходный вес, г	Вес после испытаний, г	Потеря массы, г	Площадь рабочей поверхности, см ²	Скорость потери массы, г·м ⁻² ·ч ⁻¹
5	4,922	4,915	0,007	16,8	0,0064
5	5,262	5,251	0,011	16,8	0,0101
3	54,288	54,836	0,052	6,0	0,1337
4	53,63	53,548	0,082	6,93	0,1826

Как следует из таблицы 6 скорость общей коррозии образцов биметалла выше, чем монометалла. По состоянию рабочей поверхности после испытаний можно отметить, что на рабочей поверхности плакирующего слоя какие-либо видимые коррозионные разрушения отсутствуют, в то время как на рабочей поверхности одного из образцов монометалла видны локальные строчечные разрушения.

Таким образом, по результатам испытаний на общую коррозию можно заключить, что коррозионная стойкость стали плакирующего слоя не хуже стойкости моносталей 08X18H10T.

Выводы по результатам исследования

1. Сваркой взрывом были получены биметаллические трубные заготовки удовлетворительного качества с минимальным отклонением от цилиндричности и бездефектной наружной и внутренней поверхностью.
2. Металлографические исследования и механические испытания биметаллических трубных заготовок показали, что полученные сваркой взрывом трубные заготовки являются качественными и при последующей термической обработке могут подвергаться холодной деформации (прокатке).
3. По разработанной новой технологической схеме, режимам холодной деформации и термообработки были изготовлены образцы холоднодеформированных биметаллических труб размером 73x7,0 мм длиной до 2,2 м с удовлетворительным качеством поверхности и геометрическими параметрами.
4. По результатам механических испытаний биметаллические трубы, полученные по технологии «сварка взрывом + холодная деформация» по показателям прочностных характеристик соответствуют группе К по ГОСТ 633-80. Как показали лабораторные коррозионные испытания плакирующий слой из стали 08X18H10T имеет высокую стойкость против коррозионного разрушения в различных средах, в том числе при воздействии сероводорода.
5. По результатам комплексных коррозионных испытаний следует отметить, что плакирующий слой двухслойных труб является: стойким против МКК при испытании по методу АМУ ГОСТ 6032, стойким против питтинговой коррозии при испытании химическим методом по ГОСТ 9.912, стойким против коррозионного разрушения в сероводородной среде при испытании по методу четырехточечного изгиба по ГОСТ 9.901.2, стойким против общей коррозии при испытании в CO₂- и H₂S-содержащих средах.
6. По новой технологии «сварка взрывом + холодная деформация» возможно изготовление биметаллических труб с плакирующим слоем из других коррозионностойких сталей для применения в различных эксплуатационных средах.

Начальник управления технологии,
научных исследований и разработок

В.А. Моргунов





УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО «Битруб»

Шишкин Т.А.

28 сентября 2018 г.

АКТ**освоения промышленной технологии производства сваркой взрывом
двухслойных стержней медь-титан**

г. Красноармейск, Московская область

На основании проведенных исследований особенностей сварки взрывом длинномерных цилиндрических изделий с тонким плакирующим слоем из титана, выполненных м.н.с. ИСМАН РАН Малаховым А.Ю., разработана и освоена импортозамещающая промышленная технология производства двухслойных стержней марки «титан BT1-0+медь M1». Размеры двухслойных стержней: длина – 1420 мм, диаметры – 20 и 32 мм, толщина титана 2 мм.

Для промышленного производства двухслойных стержней разработана механизированная линия, включающая в себя операции по:

1. Подготовке прутков из меди марки M1 и труб из титана BT1-0.
2. Сборке пакета с нанесением защитной термоусадочной трубки.
3. Изготовлению опалубки для заряда.
4. Одновременному монтажу на взрывной площадке до 100 зарядов.
5. Контролю качества: визуально-измерительный, ультразвуковой сплошности соединения и испытания на срез.
6. Термической обработке и правке готовых изделий.
7. Обрезке в чистовой размер.

Разработаны и утверждены в установленном порядке технические условия ТУ 18827-002-21414987-2016 «Пруток биметаллический титан+медь, изготовленный сваркой взрывом», определяющие технические требования к двухслойным стержням, изготовленным сваркой взрывом.

В 2016 году было произведено 1000 биметаллических медно-титановых стержней, в 2017 – 25000 шт., в 2018 – 8500 биметаллических стержней и штанг диаметрами 20 и 32 мм. При этом была обеспечено качество в соответствии с ТУ 18827-002-21414987-2016.

Двухслойные стержни были отгружены Заказчику ООО «Арсенал» (г. Москва) для оснащения токоподводами титановых анодных ячеек для электролизёров никеля, изготавливаемых на АО «Тамбовское ОКТЬ» и на АО «Башкирская содовая компания (АО «БСК»)), для Кольской горно-металлургической компании («Кольская ГМК», Мурманская область).

Директор по производству

Первухин Е.Б.

АРСЕНАЛ Общество
с ограниченной
ответственностью

ООО «Арсенал»
ул. Коминтерна, д. 7, кор. 2, Москва, 129327
тел.: +7(495) 604-47-12
e-mail: arsenal-mos@bk.ru

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

о результатах промышленного производства двухслойных стержней (чертёж ГМ234-0136) и штанг (чертёж 34.10019.01.40.00.00)

В 2015 году по заданию ООО «Арсенал» в ООО «Битруб» была разработана технология и изготовлена партия двухслойных стержней марки «медь М1+ титан ВТ1-0» в количестве 1000 штук, которые были использованы в качестве токоподводов для изготовления анодных ячеек электролизных ванн для получения никеля. Анодные ячейки в количестве 100 штук, оснащенные токоподводами производства ООО «Битруб» были поставлены для испытаний в производственных условиях на АО «Кольскую ГМК». Одновременно на испытания были поставлены 100 импортных анодных ячеек. Производственные испытания показали, что отечественные анодные ячейки, обеспечили стабильную работу при постоянном рабочем напряжении 3,9 В. В импортных анодных ячейках, укомплектованных биметаллическими токоподводами было выявлено резкое повышение напряжения до 12 В и токоподводы нагревались. Учитывая положительные результаты испытаний было принято решение оснастить весь парк ванн нового цеха Кольского ГМК анодными ячейками отечественного производства в количестве 10 тысяч шт., что решило проблему импортозамещения в этой отрасли.

Перед ООО «Битруб» нашим предприятием была поставлена задача в сжатые сроки освоить промышленное производство двухслойных стержней и штанг и обеспечить поставку в 2017 году 25000 штук изделий, разработать технические условия, методику контроля качества и т.д. В результате были разработаны ТУ 18827-002-21414987-2016 «Пруток биметаллический титан+медь, изготовленный сваркой взрывом», промышленная технология производства сваркой взрывом двухслойных стержней и штанг марки М1+ВТ1-0, которая обеспечивает качество в соответствии с ТУ, при этом сплошность соединения составляет свыше 70%. Двухслойные стержни были поставлены на предприятия АО «Тамбовское опытно-конструкторское технологическое бюро» и АО «Башкирская содовая компания», 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 «Кольской ГМК».

Генеральный директор ООО «Арсенал»



Этеев А.П.

Российская Федерация –
Акционерное общество
**«ТАМБОВСКОЕ ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКОЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ БЮРО»**
(АО «Тамбовское ОКТБ»)

392000, г.Тамбов, Моршанское шоссе, 17а
Телефон: (4752) 56-06-11
Факс: (4752) 53-39-92
Электронная почта –support@okbtambov.ru
Сайт- www.okbtambov.ru

р/с 40702810300500000429 в АКБ «Тамбовкредитпромбанк
(ОАО) г. Тамбов доп. офис Советский
к/с 30101810600000000755, БИК 046850755,
ИНН 6829000148
КПП 682901001

«26» ноября 2018 г. № 1127

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

о результатах изготовления анодных ячеек для электролизных ванн никеля

В 2017-18 году наше предприятие производило анодные ячейки электролизеров никеля для АО «Кольской ГМК» (заказчик ООО «Арсенал»). Учитывая высокую агрессивность среды в электролизных ваннах используют титановые коррозионностойкие анодные ячейки с металлооксидным активным покрытием на основе диоксида иридия (ОИРТА). В качестве токоподводов использовались двухслойные стержни, изготовленные в ООО «Битруб» по методу сварки взрывом. Двухслойные стержни соответствовали ТУ 18827-002-21414987-2016 «Пруток биметаллический титан+медь, изготовленный сваркой взрывом» и требованиям чертежа ГМ234-0136.

При изготовлении токоподводов и при их вварке в ячейки, а также в процессе многоциклового термической обработки при нанесении покрытия на основе диоксида иридия не выявлено отслоений титана от меди, вздутий плакирующего слоя и других дефектов. Изготовленные анодные ячейки для электролизеров отгружены заказчику и в настоящее время они успешно эксплуатируются на производстве никеля в АО «Кольской ГМК».

Генеральный директор



М.М. Аристокесян

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	 УТВЕРЖДАЮ Директор ООО «Битруб»  Т.А. Шишкин « 28 » 11 2016 ПРУТОК БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ТИТАН-МЕДЬ, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТУ 18827-002-21414987-2016 Срок введения: 01.12. 2016 Без ограничения срока действия Держатель подлинника – ООО «Битруб» СОГЛАСОВАНЫ АО "БСК" Начальник РСМУ _____ М.Ю. Бараилян « » 2016 РАЗРАБОТАНЫ Научный руководитель ООО «Битруб» _____ Л.Б. Первухин « 21 » 11 2016 ООО «СпецТоргСервис» Генеральный директор _____ Л.В.Моисеева « » 2016  
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--

Настоящие технические условия распространяются на прутки биметаллические на основе меди плакированные слоем титана методом сварки взрывом.

1.1. В качестве основы применяются прутки круглые диаметром 14-40 мм и длиной от 1000 до 2000 мм из меди М1, М0 по ГОСТ 1535-2006. В качестве плакирующего слоя применяются трубы внутренним диаметром на 2-3 мм больше диаметра прутка с толщиной стенки 1-4 мм и длиной от 1000 до 2000 мм из титана ВТ1-0, ОТ4 по ГОСТ 22897-86 или ОСТ1 90013-81.

1.2. Заказчику поставляются прутки биметаллические диаметром 16-50 мм длиной 500±2000±3 мм.

1.3. Пример условного обозначения:

Пруток биметаллический длиной 1440±3 мм наружным диаметром 20±0,2 мм с основным слоем из меди марки М1 и плакирующим слоем из титана марки ВТ1-0.

Пруток 20×1440-БМ-М1+ВТ1-0 - ТУ 18827-002-21414987-2016

1. СОРТАМЕНТ

1.1. Прутки изготавливают наружным диаметром от 16 до 50 мм с толщиной плакирующего слоя от 1 до 4 мм и длиной от 1000 до 2000 мм.

1.2. Предельные отклонения по наружному диаметру не должны превышать ±2,0% от номинального диаметра.

1.3. Овальность прутка не должна выводить размер за предельные отклонения по диаметру.

1.4. Кривизна прутка не должна превышать 2 мм на длине 1000 мм.

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ.

2.1. Материал основного (внутреннего) слоя биметаллического прутка – медь М1, М0 по ГОСТ 1535-2006.

2.1.2. Допускается использование других марок меди для основного слоя прутка по согласованию между Заказчиком и Изготовителем.

2.2. Материал плакирующего (внешнего) слоя биметаллического прутка – титан технический ВТ1-0, ОТ4 по ГОСТ 22897-86, ОСТ1 90013-81, ОСТ1-90050-72. Для специфических условий эксплуатации токопроводов по согласованию между Заказчиком и Изготовителем допускается поставка биметаллических прутков с плакирующим (внешним) слоем из технического титана других марок.

2.3. На поверхности биметаллических прутков не должно быть следов загрязнений, плен, трещин, вмятин, расслоений, надрывов и гофр.

Допускаются без ремонта вмятины и гофры, не выводящие наружный диаметр за минимальные пределы, допустимые по ТУ.

2.4. Концы прутков должны быть обрезаны под прямым углом и зачищены от заусенцев.

2.5. Прутки поставляются в состоянии без термической обработки. По согласованию между Заказчиком и Изготовителем допускается поставка после термической обработки по технологии предприятия-изготовителя.

2.6. Сплошность соединения слоев в биметаллическом прутке по результатам ультразвукового контроля (УЗК) по ГОСТ 22727-88 должна быть не менее 50% от общей площади зоны соединения и участки несплошностей должны быть локализованы.

2.7. Прочность соединения слоёв на срез в биметаллическом прутке в зоне должна быть не ниже 80 МПа.

2.8 По согласованию между Заказчиком и Изготовителем проводится контроль падения напряжения в соединении медь-титан, перепад напряжения в контакте титан-медь не более 10 мВ.

3. ПРАВИЛА ПРИЕМКИ.

3.1. Биметаллические прутки предъявляются к приемке партиями. Партия должна состоять из прутков одного размера, одной марки меди основного слоя и титана плакирующего слоя. Партию сопровождают документом о качестве (сертификатом), удостоверяющим соответствие качества требованиям настоящих технических условий, в котором указывается:

- наименование предприятия-изготовителя биметаллических прутков;
- размеры прутков (наружный диаметр, длина);
- номер партии;
- марку и химический состав основного слоя;
- марку и химический состав плакирующего слоя;
- результаты измерения серповидности прутков;
- результаты испытаний прочности соединения на срез;
- сплошность соединения слоёв по данным УЗК в %;
- дату изготовления.

3.2. Каждый пруток подвергается визуально-измерительному контролю.

4. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

4.1. Визуально-измерительный контроль прутков проводится без применения увеличительных приборов. Контроль размеров прутков проводят микрометром по ГОСТ 6507. Длину прутков измеряют рулеткой по ГОСТ 7502 или металлической линейкой по ГОСТ 427. Глубину дефектов проверяют надпиловкой или иным способом. Скручивание, кривизну, отклонение от формы поперечного сечения прутков измеряют в соответствии с ГОСТ 26877.

4.2. Ультразвуковой контроль биметаллических прутков проводится предприятием-изготовителем по его методике согласно ГОСТ 22727-88, ГОСТ 17410-78. УЗК проводят прямыми раздельно-совмещенными пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП) путем ручного или механического сканирования по поверхности плакирующего слоя (ВТ1-0 или ВТ0-0). Контроль проводят контактным способом.

4.3 Из двух биметаллических прутков от партии отбираются пробы из которых изготавливаются образцы для проведения испытаний прочности соединения слоёв на срез. Образцы изготавливаются в соответствии с чертежом обязательного Приложения А. Испытание на срез металла биметаллических прутков с определением сопротивления срезу по плоскости соприкосновения основного и плакирующего слоёв выполняют в соответствии с методикой обязательного Приложения А. При получении неудовлетворительных результатов испытаний проводят повторные испытания на удвоенном количестве образцов. Из оставшейся части прутков отрезают по два образца длиной 200 мм и проводят испытания по режиму нагревания до 500°C и охлаждения до 60°C в количестве 20-25 циклов.

4.4 Контроль падения напряжения в соединении медь-титан проводится по методике согласованной между Заказчиком и Изготовителем.

5. МАРКИРОВКА, УПАКОВКА, ТРАНСПОРТИРОВКА и ХРАНЕНИЕ.

5.1 Биметаллические стержни должны упаковываться по ГОСТ 10198-91 или ГОСТ 2991-85. На этикетках должны быть нанесены основные, дополнительные и информационные знаки по ГОСТ 14192-96.

5.2 Биметаллические прутки должны храниться в закрытом помещении, в условиях, обеспечивающих сохранность формы, размеров и предохранение от механических повреждений.