

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ СТРУКТУРНОЙ МАКРОКИНЕТИКИ И ПРОБЛЕМ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ им. А.Г. МЕРЖАНОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



ПЕРВУХИНА ОЛЬГА ЛЕОНИДОВНА

**РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАКИРОВАНИЯ
ВЗРЫВОМ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛИСТОВ И ПЛИТ
ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЙ
СТАЛЬЮ И ТИТАНОМ**

Специальность 2.5.8

Сварка, родственные процессы и технологии

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Черноголовка – 2021

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

УСГ - ударно-сжатый газ

ВВ - взрывчатое вещество

СВП - самораспространяющийся взрывной процесс

ВУВ - воздушная ударная волна

УЗК – ультразвуковой контроль

Оглавление

Введение.....	6
1. Теория и практика производства крупногабаритных двухслойных листов методом сварки взрывом	28
1.1 Области применения крупногабаритного биметалла и методы его промышленного производства.....	28
1.2 Современное состояние промышленного производства биметаллов сваркой взрывом.....	38
1.3 Характерные дефекты, возникающие при производстве крупногабаритных двухслойных листов сваркой взрывом	40
1.4 Современное состояние теории образования соединения при сварке взрывом	52
1.5 Выводы по главе.....	63
2. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса образования соединения при сварке взрывом крупногабаритных листов	65
2.1 Экспериментальное исследование процессов, происходящих в сварочном зазоре при его заполнении различными газами при сварке взрывом крупногабаритных листов	65
2.2 Теоретическое исследование процессов, идущих впереди точки контакта в сварочном зазоре при сварке взрывом крупногабаритных листов	72
2.3 Разработка механизма очистки и преактивации свариваемых поверхностей при сварке взрывом с учетом аэродинамики потока ударно-сжатого газа впереди точки контакта.....	87
2.4 Выводы по главе.....	100
3. Особенности сварки взрывом крупногабаритных изделий в среде защитных газов.....	102
3.1 Влияние состава газа в сварочном зазоре на структуру и прочность соединения на примере сварки взрывом титана с титаном с последующим термическим воздействием	102
3.2 Зависимость расчётного времени воздействия ударно-сжатого газа перед точкой контакта от состава газа в сварочном зазоре.....	114

3.3. Исследование распределения прочности соединения сталь+титан по площади биметаллической заготовки	117
3.4. Особенности структуры соединения сталь+титан в различных зонах крупногабаритного листа, в том числе в зонах неприваров	126
3.5 Выводы по главе	136
4. Деформация крупногабаритных листов при сварке взрывом	138
4.1 Экспериментальное исследование процессов деформации основного и плакирующего слоев крупногабаритных листов	138
4.2 Особенности деформации в краевых зонах листов с плакирующим слоем из титана	148
4.3 Анализ результатов исследований процессов деформации	155
4.4 Выводы по главе	159
5. Разработка технологических основ промышленного производства сваркой взрывом крупногабаритного биметалла	162
5.1 Требования к современному промышленному производству биметалла сваркой взрывом	162
5.2 Влияние особенностей детонации крупногабаритных зарядов смесей аммиачной селитры с дизтопливом на качество соединения	165
5.3. Разработка методики определения максимальных размеров листов по длине и ширине, которые можно с заданным качеством получить сваркой взрывом	181
5.4 Технологические основы промышленного производства биметалла сваркой взрывом	195
5.5 Выводы по главе	199
6. Освоение современных промышленных технологий производства крупногабаритного биметалла для атомного, нефтехимического и судостроительного машиностроения	202
6.1. Разработка нормативно-технической документации на производство биметаллов ответственного назначения	202
6.2. Биметалл конструкционная сталь-коррозионностойкая сталь для нефтехимического машиностроения	216

6.3 Биметалл конструкционная сталь - коррозионностойкая сталь для емкостей САОЗ АЭС.....	226
6.4. Крупногабаритный биметалл для трубных решеток конденсаторов АЭС и судостроения.....	234
6.4.1. Исследование возможности применения биметалла марки 09Г2С + 10Х17Н13М2Т для изготовления трубных досок теплообменного оборудования.....	234
6.4.2. Крупногабаритный биметалл сталь+титан, применяемый для трубных досок конденсаторов АЭС и атомного ледокола	237
6.5. Выводы по главе.....	245
7. Заключение и общие выводы.....	248
Литература	253
Приложения.....	281
Приложение 1. ТУ 27.32.09.010-2005 «Сталь листовая двухслойная коррозионно-стойкая, изготовленная методом сварки взрывом».....	282
Приложение 2. ТУ 27.81.09.009-2005 «Заготовки двухслойные сталь + титан, полученные сваркой взрывом».....	285
Приложение 3. ТУ 0993-001-21414987-2012 «Лист стальной двухслойный коррозионно-стойкий, изготовленный методом сварки взрывом».....	289
Приложение 4. Акт освоения промышленных технологий производства сваркой взрывом двухслойных крупногабаритных листов при совместном производстве ООО "Битруб Интернэшнл" и ФКП НИИ "Геодезия"	293
Расчет экономического эффекта от замены импортного листа на отечественный.....	299
Приложение 6. Отзывы о сотрудничестве по поставке и качеству биметалла:	
ОАО "ВОЛГОГРАДНЕФТЕМАШ".....	301
ООО «Силур»	302
ООО "КомплектЭнерго"	303
АО "Уральский турбинный завод".....	304
ОАО "Калужский турбинный завод"	305

Введение

Актуальность работы

При создании современного оборудования для атомного, нефтехимического, судостроительного машиностроения важная роль принадлежит двухслойным крупногабаритным листам (биметаллам), которые объединяют в себе полезные свойства составляющих и обладают новыми качествами, отличными от исходных материалов. Биметаллы характеризуются комплексом ценных свойств: конструкционная прочность, коррозионная и эрозионная стойкость, жаропрочность и другие сочетания свойств. Применение биметаллов позволяет не только повысить надёжность и долговечность большого класса деталей и оборудования, но и значительно экономить дорогостоящие цветные металлы и сплавы [1].

Основными задачами в технологии производства биметаллов является создание прочного соединения составляющих по всей поверхности контакта [2] «при заданном соотношении толщины слоев, формировании требуемых структуры и свойств каждого из слоев и биметалла в целом» [3, 4]. «Отсутствие качественной связи между слоями по всей поверхности соединения может вызвать расслоения в процессе изготовления и эксплуатации оборудования из двухслойного листа, в частности: при выполнении операций гибки, резки, правки, холодной и горячей деформации, а также сварки. Это делает двухслойный лист непригодным для изготовления оборудования» [3, 4]. Наличие локальных несплошностей в двухслойных листах требует проведения дорогостоящего и трудоемкого ремонта [1]. В биметалле сталь+титан ремонт дефектов практически не возможен.

Крупногабаритные двухслойные листы должны отвечать и всем традиционным требованиям к биметаллической продукции: физико-химические, механические и другие характеристики не должны быть ниже требований ГОСТ 10885-85. «Некоторые потребители, в зависимости от условий эксплуатации оборудования, могут предъявлять и свои специфические требова-

ния к биметаллу, что должно оговариваться техническими соглашениями или техническими условиями на поставку металлопродукции» [3,4].

Сварка взрывом сегодня из экзотического процесса стала обычным процессом промышленного производства биметалла, создавая конкуренцию традиционным методам металлургического производства: пакетной прокатке, электрошлаковой и электродуговой наплавке. Основные преимущества сварки взрывом - универсальность и низкая энергоёмкость. Равнопрочное соединение слоёв образуется в твёрдой фазе, поэтому исходные материалы не изменяют своих свойств [1]. На первых этапах освоения сварки взрывом для производства биметалла достижение 98% сплошности соединения считалось успехом, сегодня необходимо получать биметалл со 100% сплошностью соединения по первому или нулевому классу сплошности по ГОСТ 22727-88. Этот метод для производства биметалла успешно используют в России и в развитых странах: США, Франции, Японии, Южной Кореи, Китае и др.

К моменту начала исследований основными недостатками метода сварки взрывом при производстве крупногабаритных листов (размером от 2 до 30 м²) с плакирующим слоем из коррозионностойкой стали и цветных металлов и сплавов было появление локальных дефектов сплошности, участков пониженной прочности соединения и других дефектов [1], зависимость от погодных условий, отсутствие промышленной круглогодичной технологии производства в России. Поэтому создание научных и технологических основ промышленного производства биметалла и разработка технологии, обеспечивающей стабильное качество крупногабаритных биметаллических листов для изготовления оборудования, работающего при одновременном воздействии высоких температур, давлений, знакопеременных нагрузок, коррозионной среды является актуальной задачей, решение которой позволит обеспечить важнейшие отрасли машиностроения (атомную, нефтехимическую, судостроительную) отечественным высококачественным двухслойным листом промышленных габаритов и исключить их зависимость от импорта биметалла. Одновременно это позволит изменить подход к организации производства

биметалла сваркой взрывом от «уровня мастерской» до «промышленного», что, в свою очередь, позволит производить конкурентноспособный крупногабаритный биметалл с качеством, соответствующим мировому уровню и в объемах, близких к потребностям машиностроения.

В настоящее время накоплен большой теоретический и экспериментальный материал по вопросу формирования соединения при сварке взрывом, обобщенный в ряде работ ведущих российских учёных в этой области: *А.А. Дерibas, В.С. Седых, В.И. Лысак, В.М. Кудинов, С.В. Кузьмин, Ю.П. Трыков, Л.М. Гуревич, В.Г. Шморгун, А.С. Гельман, Л.Б. Первухин, В.В. Пай, И.В. Яковлев, Б.Д. Цемахович, И.Д. Захаренко, А.А. Бердыченко, А.Е. Розен, Б.А. Гринберг и др.*, а также известных зарубежных специалистов: *G.R. Abrahamson, B. Crossland, G.R. Cowan, A.H. Holtzman, K. Hokamoto, J.N. Hunt, M.A. Meyers, J.L. Robinson, R. Prümmer, U. Richter, J.A. Zukas, W. Walters, J.D. Williams, R.H. Wittman и др.*

В зоне соударения при сварке взрывом развиваются высокие давления, идет интенсивная пластическая деформация, сопровождаемая значительным повышением температуры металлов в зоне соударения. Процесс сварки взрывом сопровождается локализацией в узкой зоне пластической деформации с одновременным протеканием рекристаллизации и оплавления. Высокие скорости пластической деформации, давления и большой градиент температур в узкой зоне, отсутствие данных по изменению свойств металлов и сплавов в таких экстремальных условиях не позволяют однозначно оценить роль того или иного параметра в образовании соединения свариваемых материалов [5].

Исследователями были выдвинуты гипотезы, объясняющие образование соединения с различных точек зрения.

На основе законов гидродинамики, описывающих соударение под углом двух струй идеальной несжимаемой жидкости, разработана теория сварки взрывом, позволившая определить основные параметры процесса [6-10]. Процесс образования соединения трактуется следующим образом: при высо-

коскоростном соударении под углом метаемого листа с основным впереди точки контакта образуется кумулятивная струя, которая снимает слой металла со свариваемых поверхностей и вместе с оксидами металлов и органическими загрязнениями удаляет их из сварочного зазора в виде облака дисперсных частиц. Полученные при этом ювенильные поверхности сдавливаются за счет действия продуктов детонации до образования металлической связи.

На основе классической теории сварки давлением в твердой фазе разработаны механизмы сварки взрывом с учетом наличия интенсивной пластической деформации в зоне контакта [11]. Согласно существующим представлениям [12-14] формирование соединения протекает полностью в твердой фазе (без расплавления) по механизму трехстадийной топохимической реакции «с образованием физического контакта (смятием микронеровностей на соударяющихся поверхностях и их сближением на расстояния действия ван-дер-ваальсовых сил); активацией поверхностей (образование активных центров), находящихся в физическом контакте, в результате которой происходит валентное межатомное взаимодействие с формированием между атомами соединяемых поверхностей химических связей (схватывание); объемным взаимодействием, начинающимся с момента образования активных центров и заканчивающимся слиянием дискретных очагов взаимодействия в плоскости контакта, а в объеме релаксацией напряжений» [15].

Следует отметить, что экспериментально не удалось зафиксировать кумулятивную струю при не симметричном соударении в режиме сварки взрывом со скоростью детонации взрывчатого вещества (ВВ) менее 3000 м/с . Автор [6] отмечал, что струи, образующиеся при косом соударении пластин, отличаются от струй, образующихся при сжатии конических зарядов. «Рентгеновские фотографии процесса соударения показали, что перед точкой контакта движется облако дисперсных частиц, в котором не наблюдается каких-либо плотных образований»[16]. В работе [17] показано, что в случае углового соударения условия для образования струи практически не возникают, а

образование облака дисперсных частиц имеет не гидродинамическую природу. В работе [18] импульсной рентгеновской съёмкой зафиксировано образование бугра деформации в медной пластине перед точкой контакта и отсутствие каких-либо следов обратной струи. В определяющей роли кумуляции в образовании соединения усомнились авторы [10, 19], а в работе [12] показано, что кумулятивная струя не играет решающей роли в образовании соединения.

Основное внимание в опубликованных исследованиях российских и зарубежных ученых уделяется вопросам волнообразования, структуре зоны соединения, образованию вихревых зон, процессам диффузии, особенностям деформации в зоне соединения и т.п. В то же время недостаточно внимания уделяется процессам, идущим в сварочном зазоре впереди точки контакта при плакировании крупногабаритных листов и заготовок, в том числе материалов, образующих химические соединения (интерметаллиды). Слабо изучены вопросы особенностей макродеформации основного и плакирующего слоев в процессе сварки взрывом, влияние на эти процессы окружающей среды.

При промышленном производстве сваркой взрывом двухслойных листов размером свыше 8 м^2 фиксируются такие дефекты, как непривары в начале процесса и участки пониженной прочности в этой зоне [5], а также возможны вырывы, свищи, трещины и т.п. Согласно общепринятым представлениям исключить образование таких дефектов при формировании сварного соединения не представляется возможным, выбором режима сварки можно только изменить их размер.

Обычно при сварке взрывом сварочный зазор заполнен воздухом окружающей атмосферы. При сварке материалов, образующих интерметаллидные соединения, сварочный зазор предложено заполнять гелием [20, 21] или аргоном [22], что приводит к улучшению качества соединения титана (циркония) со сталью за счёт исключения их возгорания в сварочном зазоре. Создание вакуума также положительно сказывается на качестве сварки [23]. Тем не

менее, в литературе до сих пор имеется немного исследований о поведении среды в сварочном зазоре и о влиянии её на процесс образования соединения.

В работе [24] высказано предположение, что «с увеличением размера свариваемых пластин негативные последствия сложных процессов, которые происходят в сварочном зазоре, будут усиливаться».

Для создания технологии промышленного производства крупногабаритных двухслойных листов ответственного назначения необходимо обеспечить 100% сплошность и прочность соединения, исключить образование трещин, разрушений, свищей и других дефектов биметалла. Требуется обеспечить равномерность свойств и структуры по всей поверхности крупногабаритных листов, включая начальные и краевые зоны.

Таким образом, для решения проблемы производства высококачественного биметалла в промышленных масштабах необходимо провести комплекс экспериментально-теоретических исследований процесса сварки взрывом стали со сталью и титана со сталью на крупногабаритных листах. Это позволит разработать научные и технологические основы промышленного производства крупногабаритного биметалла, позволяющие обеспечить прочность соединения в соответствии с требованиями нормативно технической документации, 100% сплошность соединения слоев, включая начальную и краевые зоны, со стабильным волнообразованием и минимальным количеством литых включений, исключить образование локальных дефектов сплошности (вырывы, свищи и т.п.).

Актуальность выбранной темы диссертационного исследования подтверждается выполнением её научных разделов в рамках НИР ИСМАН, российских научно-исследовательских программ, проектов и госконтракта: «Оптимизация процессов обработки материалов взрывом на основе исследований эволюции их структуры» (2006), «Химические и структурные превращения веществ и материалов при ударно-волновых воздействиях» (2007-2009), «Поведение металлов и сплавов в ударных волнах. Механизм образования химической (металлической) связи и структурные превращения на границе

раздела при сварке металлов взрывом» (2010-2012), «Механизмы физико-химических превращений под воздействием динамических и квазистатических давлений. Физические эффекты и нестационарные явления при сварке, компактировании и синтезе взрывом» №01201351576 (2013-2016), "Синтез и обработка материалов в условиях высокоэнергетических воздействий" №0091-2018-0004 (2017–2019), «Формирование композиционных материалов методами горения и взрыва» (Программа Президиума РАН № I.31 «Фундаментальные основы технологий двойного назначения в интересах национальной безопасности. Фундаментальные исследования процессов горения и взрыва. Актуальные проблемы робототехники») № 0091-2015-0063 (2017), РФФИ 14-19-00251 «Изучение возможности применения методов высокоэнергетического воздействия для формирования заданного комплекса механических и теплофизических свойств композиционных материалов» (Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами. ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», 2014 г.); РФФИ 14-08-00845 «Исследование влияния термодинамических параметров адиабатически сжимаемого газа и ионизации контактных поверхностей на получение композиционных материалов с заданными свойствами сваркой взрывом» (2014 -2016 гг.); Составная часть опытно-конструкторской работы «Исследование распределения прочности в зоне сцепления сталь+титан по площади биметаллической заготовки. Изготовление модельных и опытных образцов». Шифр «Титан БМ». Выполнена в рамках государственного контракта от 07.03.2014г. № 14411.1879999.09.009 между Министерством промышленности и торговли РФ и ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» в рамках Федеральной целевой программы «Развитие гражданской морской техники» на 2009-2016 годы, тема: «Технологии создания новых и специальных материалов для морской техники» (комплекс работ «Титан», мероприятие №2.3.4).

Цель диссертационной работы: Разработка научных и технологических основ промышленного производства крупногабаритных листов и плит из конструкционной стали с плакировкой коррозионностойкой сталью и титаном на базе исследования закономерностей процессов, происходящих при сварке взрывом в сварочном зазоре перед точкой контакта.

Задачи исследования:

1. Провести анализ качества крупногабаритных двухслойных листов при их промышленном производстве и выявить характерные дефекты, понижающие эффективность производства биметалла, которые не устраняются традиционными методами.
2. Теоретически и экспериментально исследовать влияние газа в сварочном зазоре на процесс образования соединения при сварке взрывом крупногабаритных листов.
3. Исследовать особенности процесса сварки взрывом титана в среде защитных газов и причины образования характерных дефектов в различных зонах крупногабаритного листа.
4. Экспериментально исследовать закономерности пластической деформации растяжения по длине основного и плакирующего слоев.
5. По результатам проведенных исследований разработать технологические основы промышленного производства сваркой взрывом крупногабаритного биметалла конструкционная сталь+коррозионностойкая сталь и конструкционная сталь+титан.
6. Разработать и внедрить современные промышленные технологии производства сваркой взрывом крупногабаритного биметалла для атомного, нефтехимического и судостроительного машиностроения на специализированном предприятии.

Научная новизна заключается в создании научных и технологических основ промышленного производства сваркой взрывом крупногабаритных листов биметалла конструкционная сталь+коррозионностойкая сталь и конструкционная сталь+титан, базирующихся на учете аэродинамики ударно-

сжатого газа (УСГ) в сварочном зазоре перед точкой контакта, свойств свариваемых материалов, условий деформации основного и плакирующего слоев.

Экспериментально установлено, что на режимах сварки взрывом со скоростью точки контакта 2000-2500 м/с отсутствует устойчивый кумулятивный процесс, способный очистить и активировать перед точкой контакта свариваемые поверхности из стали и титана (при заполнении сварочного зазора аргоном), а также стали и коррозионностойкой стали на воздухе.

Теоретически показано, что с учётом истечения газа из сварочного зазора в боковые стороны размер области УСГ зависит от ширины при заданной длине листа, скорости точки контакта и свойств заполняющего сварочный зазор газа. При прочих равных условиях увеличение ширины листов приводит к росту длины области УСГ.

Предложено новое теоретическое представление о процессе очистки и активации свариваемых поверхностей перед точкой контакта при сварке взрывом крупногабаритных изделий. Показано, что очистка и преактивация свариваемых поверхностей происходит перед точкой контакта до соударения за счет воздействия на поверхностный слой металла потока неравновесной ударной плазмы, образующейся в процессе аэродинамического нагрева в пограничном слое между УСГ и свариваемыми поверхностями при их сверхзвуковом обтекании. Взаимодействие ударной плазмы с поверхностью твёрдого тела приводит к диссоциации окислов, разрушению органических загрязнений и резкому повышению термической активации свариваемых поверхностей перед точкой контакта. Время взаимодействия определяется длиной области УСГ.

Разработана методика определения максимальных габаритов свариваемых листов, с качественным соединением слоёв, основанная на определении границы допустимого времени воздействия УСГ на свариваемые поверхности в конечных участках сварки. Доказано, что исключаящее образование сплош-

ных расплавов критической толщины время воздействия УСГ составляет 150-170 мкс.

Экспериментально доказано, что длина конечных участков с трещинами и вырывами плакирующего слоя после сварки взрывом крупногабаритных листов из конструкционной стали с титаном при отрицательной температуре окружающей среды соизмерима с протяженностью области УСГ, а появление соответствующих дефектов обусловлено резким падением ее параметров (давления и температуры).

Практическая значимость. Предложены принципиально новые подходы к разработке технологии, учитывающие процессы, происходящие в сварочном зазоре, и свойства свариваемых материалов, а также обеспечивающие получение качественного соединения по всей площади листа. Разработана конструкция и схемы сборки пакетов для сварки взрывом с использованием генератора УСГ и технологических пластин в краевых зонах, обеспечивающие образование равнопрочного соединения по всей поверхности, включая начальные и краевые зоны. Использование генератора УСГ и технологических пластин в краевых зонах при сварке взрывом в среде аргона крупногабаритных листов стали с титаном (шириной более 3000 мм со скоростью точки контакта 2000-2500 м/с) позволило обеспечивать постоянство площади литых включений и высоты волн на границе соединения по всей длине листов с незначительным возрастанием в месте начала деформации растяжения плакируемого листа.

Установлена возможность повышения стабильности детонации плоских крупногабаритных зарядов из смеси аммиачной селитры с дизельным топливом за счет использования гранулированной микропористой селитры (ТУ 143-036-002-3789-2003). Наличие микропор в структуре селитры позволяет удерживать дизельное топливо в течение длительного времени, а сферическая форма частиц обеспечивает постоянную плотность заряда по всей поверхности плакирующего листа.

На производство биметаллов ответственного назначения разработаны, согласованы и зарегистрированы в установленном порядке ТУ 27.32.09.010-2005, ТУ 27.81.09.009-2005, а ТУ 0993-001-21414987-2012 одобрены Управлением по регулированию безопасности атомных станций и исследовательских ядерных установок Ростехнадзора, внесены в НП-089-15 приложение №1 к Сводному перечню документов по стандартизации.

Разработаны современные технологии круглогодичного промышленного производства крупногабаритного листового биметалла сваркой взрывом, обеспечивающие 100% сплошность и заданную прочность соединения слоёв, качество в соответствии с требованиями нормативно-технической документации. Внедрение технологии в группе компаний в составе ООО «Битруб Интернэшнл» и ООО «Битруб» позволило изготовить в период с 2013 по 2019 г.:

- для ведущих заводов нефтехимического машиностроения (ООО «Зенит-Химмаш», АО «Волгограднефтемаш», АО «Востсибмаш», ЗАО НПО «НАТЭК-Нефтехиммаш», АО «Пензахиммаш», и др.) свыше 7000 м² высококачественного биметалла с основным слоем из конструкционных сталей марки 09Г2С (категория 6, 12, 15), 12ХМ (категория 3, 18), 20К, с плакирующим слоем из сталей 08Х13, 08Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т или зарубежных аналогов AISI 410S, AISI 321, AISI 316Ti, AISI 316L толщиной от 3 до 12 мм и площадью листов от 5 до 26 м²;
- для предприятий (АО «Петрозаводскмаш», ООО "Комплект Энерго"), изготавливающих ёмкости САОЗ (Ленинградская, Нововоронежская АЭС), свыше 380 тонн биметаллических плит марки 22К+08Х18Н10Т, площадью до 25 м²;
- для изготовления трубных досок конденсаторов блоков АЭС (Ростовской, Балаковской, «Кудан Кулам», «Руппур») свыше 240 биметаллических плит марки 09Г2С-13+ВТ1-0 (Grade 1) площадью от 8 до 12 м²;

– для предприятий, изготавливающих оборудование для судостроения (АО «Уралхиммаш», АО «Уральский турбинный завод»), биметаллические плиты марки 09Г2С+ВТ1-0 площадью до 12 м² для изготовления трубных решёток конденсатора атомного ледокола проекта 22220 общей площадью 60 м².

Внедрение указанных технологий позволило исключить закупку за рубежом крупногабаритных листов сталь+коррозионностойкая сталь и сталь+титан, плакированных взрывом для отраслей машиностроения. Годовой экономический эффект от замены импортного листа на отечественный составил более 163 млн. рублей.

Качество поставленных биметаллических листов получило высокую оценку от предприятий заказчиков: ОАО «Волгограднефтемаш», АО «Уральский турбинный завод», ОАО «Калужский турбинный завод», ООО «Комплект Энерго».

Методология исследования предполагала:

- проведение анализа характерных дефектов, возникающих при производстве крупногабаритных двухслойных листов;
- разработку методики и экспериментальное исследование процесса образования соединения при сварке взрывом крупногабаритных листов методом ловушек с целью установления наличия или отсутствия процесса кумуляции;
- разработку методики расчёта параметров УСГ в сварочном зазоре впереди точки контакта путём решения аэродинамической задачи о сверхзвуковом обтекании свариваемых поверхностей с учетом истечения газа из сварочного зазора в боковые стороны;
- установление влияния состава газа в сварочном зазоре, времени воздействия УСГ и теплофизических свойств материалов на температуру нагрева свариваемых поверхностей перед точкой контакта;

- определение влияния состава газа в сварочном зазоре на структуру и прочность соединения пары титан+титан (для исключения образования интерметаллидов);
- исследование структуры и прочности соединения слоев крупногабаритного листа биметалла сталь+титан после сварки взрывом в среде защитного газа аргона в различных зонах по площади плакированного листа, в том числе в зонах, прилегающих к участкам неприваров;
- разработку методики экспериментального исследования методом реперных точек процессов деформации основного и плакирующего слоев крупногабаритных листов и особенностей деформации в краевых зонах листов с плакирующим слоем из титана, в том числе при отрицательных температурах;
- на основании проведенного комплекса исследований, с учетом опыта производства биметалла, разработать технологические основы промышленного производства сваркой взрывом крупногабаритных двухслойных листов ответственного назначения, включающие разработку требований к исходным материалам, взрывчатым веществам, а также определения максимальных размеров листов по длине и ширине с учетом среды в сварочном зазоре;
- при разработке современных промышленных технологий, создании нормативно-технической документации, конструкции пакетов, контроля качества и сертификации биметалла.

В работе для экспериментальных исследований использованы следующие основные материалы: 09Г2С, 12ХМ, 22К, 12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т, 03Х23Н13М2Т, 08Х13, 03Х18Н11 и зарубежные аналоги AISI 321, 316L, 316Ti, 410S, 304L, титан BT1-0 и Grade-1. Все исследования проведены на крупногабаритных листах промышленных размеров. Эксперименты, связанные с получением материалов методом сварки взрывом, и экспериментальные работы по исследованию параметров смесей аммиачной селитры с дизельным топливом выполнены на производственной базе ведущего произво-

дителя биметалла в РФ ООО «Битруб Интернэшнл» совместно и на территории ФКП НИИ «Геодезия».

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального исследования методом «ловушек» процессов, происходящих в сварочном зазоре, при сварке взрывом двухслойных листов сталь+сталь и сталь+титан промышленных размеров.
2. Методика расчёта параметров ударно-сжатого газа в сварочном зазоре впереди точки контакта в условиях сверхзвукового обтекания свариваемых поверхностей.
3. Механизм очистки и активации свариваемых поверхностей перед точкой контакта при сварке взрывом крупногабаритных изделий за счет воздействия на поверхностный слой металла потока неравновесной ударной плазмы, образующейся в пограничном слое УСГ при сверхзвуковом обтекании свариваемых поверхностей.
4. Условия образования сверхзвукового потока неравновесной ударной плазмы на границе раздела газ-металл, обеспечивающие прочное соединение между слоями в биметалле в начале процесса сварки взрывом.
5. Методика расчетной оценки максимальных габаритов биметаллических листов, которые можно получить методом сварки взрывом с гарантированным качеством сцепления слоев.
6. Экспериментально выявленные причины появления дефектов (потягов, трещин и вырывов лакирующего слоя) в конечных участках сваренных взрывом крупногабаритных листов конструкционной стали с титаном при отрицательной температуре окружающей среды.
7. Научные и технологические основы круглогодичного промышленного производства крупногабаритных биметаллических листов сваркой взрывом.

Достоверность полученных результатов при решении поставленных задач обеспечивается использованием для анализа полученных данных современных представлений о физике взрыва, образовании соединения при

сварке взрывом и сварке давлением в твердой фазе, аэродинамике сверхзвукового течения газа, применением комплекса взаимодополняющих методов исследований структуры и свойств металлов, проведением испытаний в сертифицированных лабораториях предприятий и организаций, сопоставлением полученных данных с результатами работ других авторов, статистической обработкой результатов экспериментальных измерений.

Аналитические исследования полученных в работе материалов выполнены на оборудовании ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН (ИСМАН), ГНЦ НПО ЦНИИТМАШ, ГНЦ ФГУП ЦНИИчермет им И.П. Бардина, НИЦ «Курчатовский институт» ЦНИИ КМ «Прометей», Пензенский государственный университет.

В диссертационной работе использованы принятые методики исследования на следующем оборудовании: растровая электронная микроскопия (Zeiss Ultra Plus на базе Ultra 55 (Carl Zeiss) с приставкой INCA Energy 350 XT (Oxford Instruments), LEO 1450 VP (Carl Zeiss) с приставкой INCA 300; оптическая металлография (Axiovert 200 MAT/M и CARL ZEISS AXIOVERT), микроиндентирование (ПМТ-3), измерение прочностных свойств в условиях растяжения (INSTRON 1195), рентгеноструктурные исследования (ДРОН-3). Исследования металла сварного соединения на содержание газа (кислород, азот, аргон и гелий) проведены методом масс-спектрального анализа на лазерном масс-спектрографе ЭМАЛ-2.

Апробация работы

Основные результаты работы доложены и обсуждены на IX-XIV Международных симпозиумах Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations 14th International Symposium (EPNM): 2008 (г. Лисс, Нидерланды), 2010 (г. Бечичи, Черногория), 2012 (г. Страсбург, Франция), 2014 (г. Краков, Польша), 2016 (г. Коимбра, Португалия), 2018 (г. Санкт-Петербург, Россия); Международных конференциях «Новые перспективные материалы и технологии их получения» (НПМ): 2010 и 2014 (г. Вол-

гоград); «Деформация и разрушение материалов»: 2015, 2017 (г. Москва); «Актуальные проблемы прочности»: 2008 (г. Нижний Новгород), 2012 (г. Уфа); «Научно-технический прогресс в черной металлургии»: 2015 (г. Череповец); Международные конференции "Титан в СНГ" 2012 (г. Казань), 2013 (г. Донецк), 2014 (г. Нижний Новгород), 2016 (г. Санкт-Петербург), 2017 (г. Верхняя Салда - Екатеринбург); «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении, эксплуатации АЭС» МЕЙНСТРИМ-2016 (г. Зеленогорск); Всероссийских конференциях «Взрыв в физическом эксперименте»: 2013, 2018 (г. Новосибирск); «Энергетические конденсированные системы» 2012 (г. Черноголовка); Всероссийском семинаре с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям: 2012 (г. Томск); Сварка в России - 2019: современное состояние и перспективы (г. Томск); XV Всероссийского симпозиума по горению и взрыву 2020 (г. Москва); «Сварка и аддитивные технологии для промышленного применения» в рамках «Российской промышленной недели» на территории выставки RusWeld 2020 (г. Москва).

Основное содержание диссертации отражено в 110 работах, в том числе: 21 статья в реферируемых журналах (из перечня ВАК при Минобрнауки РФ), 7 публикаций индексируемых наукометрическими базами Web of Science и Scopus, 1 монография. Наиболее значительные приведены ниже:

В журналах из перечня ВАК при Минобрнауки РФ

1. Первухина, О.Л. Двухслойные стали для ответственных металлоконструкций/ О.Л. Первухина, И. В. Денисов //Известия ВолгГТУ. Серия "Сварка взрывом и свойства сварных соединений". – 2020. – № 11 (246). – С.46-52.
2. Первухина, О.Л. К вопросу об очистке и активации свариваемых поверхностей при сварке взрывом крупногабаритных листов/О.Л. Первухина //Известия ВолгГТУ. Серия "Сварка взрывом и свойства сварных соединений". – 2020. – № 11 (246) – С.58-63.
3. Опыт производства крупногабаритного биметалла титан-сталь для трубных досок конденсаторов АЭС /Л. Б. Первухин, И. В. Денисов, Т. А. Шишкин, О.

- Л. Первухина //Известия ВолгГТУ. Серия "Сварка взрывом и свойства сварных соединений". – 2020. – № 11 (246). – С.37-40.
4. Исследование структуры и свойств по площади крупногабаритных решеток сталь-титан/ О.Л. Первухина, И.А. Счастливая, А.М. Федоров, Л.Б. Первухин, Т.А. Шишкин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2017. – №13 (208). – С. 46-54.
 5. К вопросу о предельных размерах листов, получаемых сваркой взрывом / Л.Б. Первухин, О.Л. Первухина, И.В. Денисов, Т.А. Шишкин, Д.В. Ноняк // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. – №10 (189). – С. 76-86.
 6. Бердыченко, А.А. Влияние газовой среды в сварочном зазоре при сварке взрывом на структуру соединения/ А.А. Бердыченко, О.Л. Первухина// Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21, № 3. – С. 894-896.
 7. Первухин, Л.Б. Взаимодействие ударно-сжатого газа в сварочном зазоре со свариваемыми поверхностями при сварке взрывом Л.Б. Первухин, О.Л. Первухина // Сварочное производство. – 2016. – № 6. – С. 20-25.
 8. Первухина, О.Л. Влияние температуры на деформацию и разрушение титана в процессе сварки взрывом в краевых зонах / О.Л. Первухина, И.В. Денисов, Т.А. Шишкин // Материаловедение. – 2016. – № 1. – С. 40-44.
 9. О возможности применения плакированных трубных досок для изготовления теплообменного оборудования / Л.Б.Первухин, О.Л. Первухина, А.С. Зубченко, В.П. Рабинович, Н.В. Давыдова //Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. – 2012. – № 31. – С. 83-91.
 10. Первухин, Л.Б. Теоретические и технологические основы промышленного производства биметаллов/ Л.Б. Первухин, О.Л. Первухина, С.Ю. Бондаренко // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2010. – №5 (65). – С. 75-82.
 11. Компьютерное моделирование деформации составляющих слоёв биметалла в процессе сварки взрывом с использованием программы LS-DYNA / И.В. Де-

- нисов, А.Ю. Муйземнек, А.Е. Розен, О.Л. Первухина, Ю.А. Гордополов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2010. – №5 (65). – С. 66-74.
12. Деформационные и термодинамические процессы при плакировании титаном сваркой взрывом цилиндрических деталей / Первухина О.Л., Сайков И.В., Первухин Л.Б., Хайдаров Ф.Б. Технология машиностроения. – 2010. – № 7. – С. 30-33.
 13. Бердыченко, А.А. Эволюция структуры титана в зоне соединения, полученного сваркой взрывом/ А.А. Бердыченко, Л.Б. Первухин, О.Л. Первухина/ Металловедение и термическая обработка металлов. – 2009. – №10 (652). – С. 19-24.
 14. Первухин, Л.Б. Развитие технологии производства биметалла сваркой взрывом в России / Л.Б. Первухин, О.Л. Первухина, Д.В. Рихтер// Технология машиностроения. – 2009. – №9. – С. 5-11.
 15. Особенности образования несплошности при производстве двухслойных крупногабаритных листов сваркой взрывом /Л. Б. Первухин, Д. В. Рихтер, О. Л. Первухина, С. Ю. Бондаренко. // Технология машиностроения. – 2009. – №10. – С.5-9.
 16. Бердыченко, А.А. Дефекты, возникающие при плакировании крупногабаритных листов стали титаном, причины их возникновения и пути устранения/ А.А. Бердыченко, Л.Б. Первухин, О.Л. Первухина // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4. – С. 216-219.
 17. Производство биметалла сталь-титан сваркой взрывом и его применение в конструкциях теплообменников атомных энергетических установок/ Л.Б. Первухин, С.В. Сериков, И.К. Устинов, О.Л. Первухина // Титан. – 2009. – №1 (23). – С. 37-40.
 18. Первухин, Л.Б. Особенности взрывчатых веществ для промышленного производства биметаллов сваркой взрывом/ Л.Б. Первухин, О.Л. Первухина // Взрывное дело. Научно-технический сборник. – 2009. – №102-59. – С. 47-57.

19. Деформационные процессы при сварке взрывом / И.В. Денисов, Л.Б. Первухин, О.Л. Первухина, А.Е. Розен//Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2008. – №3 (41). – С. 39-45.
20. Влияние состава атмосферы на образование соединения титана со сталью при сварке взрывом / О.Л. Первухина, А.А. Бердыченко, Л.Б. Первухин, Д.В. Олейников // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2006. – №9 (24). – С. 51-54.
21. Бондарь, М.П. Зависимость структуры титана, формирующейся при высокоскоростном нагружении, от его исходного состояния/ Бондарь, М.П., О.Л. Первухина// Физика Горения и Взрыва. – 2000. – № 36 (2). – С. 110-121.

Статьи, индексируемые в реферативных базах Scopus и Web of Science

22. Evolution of titanium structure in the zone of the joint formed by explosive welding / А. А. Бердыченко, Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина // Metal Science and Heat Treatment. – 2009. – Vol. – 51(9-10). – P. 476-481. (Scopus); Q3; DOI: 10.1007 / s11041-010-9196-7.
23. Interaction of impact-compressed gas in the welding gap with the welded surfaces in explosive welding / Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина // Welding International. – 2017. – Vol. 31 (6). – P. 457-461. (Scopus); Q3; DOI: 10.1080/09507116.2016.1268763.
24. Deformation and thermodynamic processes in explosion cladding of cylindrical components with titanium/ О. Л. Первухина, И. В. Сайков, Л. Б. Первухин, Ф. Б. Хайдаров //Welding International. – 2012. – Vol. 26(4). – P. 318-321. (Scopus); Q3; DOI: 10.1080 / 09507116.2011.606160.
25. Special features of formation of defects in explosion welding of two-layer large plates / Л. Б. Первухин, Д. В. Рихтер, О. Л. Первухина, С. Ю. Бондаренко //Welding International. – 2011. – Vol. 25 (2). – P. 130-134. (Scopus); Q3; DOI: 10.1080 / 09507116.2010.527089.
26. The synthesis of materials in a cumulative jet / О. Л. Первухина, Л. Б. Первухин //AIP Conference Proceedings 849. – 2006, P. 115-120. (Scopus); DOI: 10.1063/1.2337186.

27. Dependence of the titanium structure formed under high-rate loading on its initial state / М. П. Бондарь, О. Л. Первухина //Combustion, Explosion and Shock Waves. – 2000. – Vol. 36 (2), P. 261-271. Web of Science); Q4; DOI: 10.1007 / BF02699372.
28. Development of the titanium structure in explosive collapse of thick-walled cylinders / М. П. Бондарь, О. Л. Первухина, В. Ф. Нестеренко, Ю. Л. Лукьянов //Combustion, Explosion and Shock Waves. – 1998. – Vol. 34 (5). – P. 590-597 (Web of Science); Q4; DOI: 10.1007/BF02672684.

В других печатных изданиях:

29. 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 (686). С. 46-49.
30. Особенности сварки взрывом стали с титаном в защитной атмосфере/ О.Л. Первухина, Л.Б. Первухин, А.А. Бердыченко, Л.Д. Добрушин, В.Г. Петушков, Ю.И. Фадеев //Автоматическая сварка . 2009. № 11. С. 23.
31. Определение параметров ударно-сжатого газа в сварочном зазоре впереди точки контакта при плакировании взрывом /С.Ю. Бондаренко, Д.В. Рихтер, О.Л. Первухина, Л.Б. Первухин // Автоматическая сварка. 2009. № 11 (679). С. 46-48.
32. Первухина, О.Л.Свойства коррозионностойких биметаллов, полученных сваркой взрывом, для производства оборудования в нефтехимическом машиностроении/О.Л. Первухина, Л.Б. Первухин //Коррозия Территории нефтегаз № 3(32) 2015. С.36-39.
33. Pervukhina, O.L. The specifics of producing steel to brass bimetal using explosion welding /Pervukhina O.L., Denisov I.V. //Advanced Materials and Technologies. 2017. № 3. pp. 44-46.
34. Mixture of porous ammonium nitrate with diesel oil for use in industrial-scale explosive welding /Denisova N.A., Pervukhina O.L., Pervukhin L.B., Doronin G.S., Alekseev V.V., Kim G.Kh. //В сборнике: Shock-assisted materials synthesis

and processing: Science, innovations, and industrial implementation 2008. pp. 77-78.

35. **Монография:** Способы получения композиционных материалов методами высокоэнергетического воздействия: монография / Розен А.Е., Кривенков А.О., Крюков Д.Б., Чугунов С.Н., Первухина О.Л., Гуськов М.С. – Пенза, Изд-во ПГУ, 2016. – 136 с. (ISBN: 978-5-906913-13-5).

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности, по которой она рекомендуется к защите

Работа соответствует формуле и пунктам 3, 4 и 7 области исследования специальности 2.5.8."Сварка, родственные процессы и технологии":

п.3. Физические процессы в материалах при сварке и родственных технологиях, фазовые и структурные превращения, образование соединений и формирование их свойств;

п.4. Технологические основы сварки плавлением и давлением;

п.7. Влияние конструктивных особенностей сварных соединений и технологии сварки на прочность, надежность и ресурс сварных конструкций.

Личный вклад автора

В большинстве работ, выполненных в соавторстве с другими исследователями, автором определены основные идеи и направления проводимых исследований; разработаны оригинальные методики экспериментального и теоретического исследования процессов в ударно-сжатом газе, происходящих при сварке взрывом крупногабаритных листов в сварочном зазоре; предложен и обоснован механизм очистки и преактивации свариваемых поверхностей перед точкой контакта; осуществлено планирование экспериментов и обработка полученных данных при исследовании причин появления дефектов при сварке взрывом титана; проведено исследование структуры и механических свойств двухслойных листов и плит сталь+сталь и сталь+титан. При создании технологических основ производства крупногабаритного биметалла автором обобщены результаты собственных исследований, а также исследований других ученых и специалистов в области сварки взрывом. Ав-

тор принимала личное участие в разработке нормативно-технической документации: технических условий, технологических инструкций, инструкций по контролю качества, сертификации готовой продукции, а так же в работах по созданию и освоению технологий круглогодичного промышленного производства крупногабаритного биметалла сваркой взрывом.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения, списка литературы из 244 наименований и 6 приложений. Общий объем диссертации составляет 305 страниц, включая 112 рисунков, 29 таблиц.

В заключение приношу благодарность д-ру тех. наук, профессору Шморгуну Виктору Георгиевичу за неоценимую помощь в редактировании диссертационного исследования, ценные советы и замечания.

Приношу также благодарность Лауреату Премии Совета Министров СССР, заслуженному изобретателю РСФСР, д-ру тех. наук, профессору Первухину Леониду Борисовичу в значительной мере определившему основные направления данного диссертационного исследования, помощь в проведении экспериментов и внедрении результатов исследований в промышленное производство.

Выражаю благодарность директору ИСМАН член-корр., профессору Алымову Михаилу Ивановичу, всем моим коллегам, в первую очередь сотрудникам лаборатории динамических воздействий ИСМАН за помощь при выполнении исследований и анализе полученных результатов.

Выражаю благодарность коллективу ООО "Битруб Интернэшнл" за неоценимую помощь в проведении экспериментов в условиях промышленного производства двухслойных листов сваркой взрывом.

1. Теория и практика производства крупногабаритных двухслойных листов методом сварки взрывом

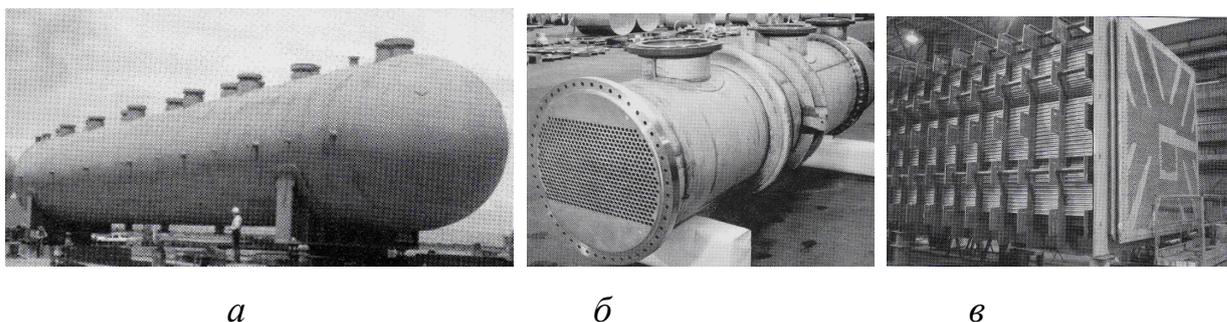
1.1 Области применения крупногабаритного биметалла и методы его промышленного производства

В настоящее время в стране поставлена задача создания в ближайшие годы современного машиностроения, основанного на импортозамещающих технологиях. Для этих целей создаются мощные государственные корпорации по важнейшим отраслям: атомной, нефтехимической, судостроительной, авиационной и др. Развитие этих отраслей немыслимо без новых современных материалов, к которым относятся многослойные композиционные металлические материалы, в том числе биметаллы. Ежегодно около 10% металла разрушается от коррозии, выводя из строя важнейшие объекты и оборудование, поэтому защита металлов от коррозии является актуальной задачей. Многие проблемы позволяет решить использование биметаллов, объединяющих в одном материале трудносовместимые свойства [25-30]. Например, совместить технологичность и высокую конструкционную прочность основного слоя со специфическими свойствами тонкого плакирующего слоя (коррозионной стойкостью, электропроводностью, износостойкостью и т.п.). Применение многослойных материалов позволяет повысить надёжность и долговечность большой номенклатуры изделий, разрабатывать принципиально новые конструкции узлов машин, экономить дорогостоящие или дефицитные материалы [31, 32].

Разнообразие агрессивных сред в современных отраслях промышленности вызывает необходимость использования для плакирующего слоя биметаллов самых различных сталей и сплавов, а также цветных металлов. По данным работ [3, 33] наибольшее применение получили двухслойные листы с плакирующим слоем из хромистых, хромоникелевых и хромоникельмолибденовых сталей, а также хромо-никелевых сплавов. «Для изготовления аппаратов, работающих в большинстве органических соединений в таких средах, как растворы азотнокислых, сернокислых и хлористых солей, сухой хлор,

сернистый и углекислый газы, применяются двухслойные стали с плакирующим слоем из сталей типа 08X18H10T. Для изготовления аппаратуры, работающей в сильноагрессивных средах: горячих растворах сернистой и фосфорной кислот, кипящих растворах уксусной, щавелевой и муравьиной кислот и в растворе серной кислоты при повышенных температурах используются биметаллы с плакирующим слоем из хромоникельмолибденовых сталей. В особо агрессивных средах, когда коррозионная стойкость указанных сталей оказывается недостаточной, целесообразно применять двухслойную сталь с плакирующим слоем из сплавов на основе никеля, титана и других цветных металлов и сплавов» [34].

Из двухслойных сталей изготавливаются конденсаторы, теплообменники, кристаллизаторы, автоклавы, реакторы и реакционные колонны, вакуум-аппараты, вымывные резервуары и другое оборудование (рисунок 1.1).



а

б

в

Рисунок 1.1 – Примеры использования крупногабаритного биметалла [30]. Автоклав с плакировкой из титана для извлечения никеля и кобальта из латеритных руд в кислой среде под давлением, диаметром 5,1 м, массой 100 т (а); оболочечно-трубный теплообменник с циркониевыми трубами, применяемый при производстве азотной кислоты, имеющий кожух из нержавеющей стали и трубные доски из биметалла сталь-цирконий (б); конденсатор для электросиловой установки с титановыми трубками и трубными досками с плакировкой из титана (в).

В нефтяном машиностроении двухслойная сталь применяется для изготовления реакторов отгонки бензина из сырой нефти, реакторов для рафинирования, смесителей теплообменников, отстойников, насосов, ректификаци-

онных и отпарных колонн, коксовых камер и другого оборудования, работающего в средах сернистой нефти, мазутов, гудронов, газосырьевых и газопродуктовых смесей, содержащих водород, сероводород и т.д.

Атомное машиностроение в последние годы развивается особенно интенсивно. В 70-80 годы прошлого столетия применительно к атомному машиностроению были проведены работы по исследованию физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств двухслойных сталей, полученных сваркой взрывом, которые были обобщены в [35, 36]. Эти систематические исследования (проведенные совместно с ЦНИИТМАШ) прочностных и служебных характеристик биметалла с изучением его механических свойств при статическом, ударном и циклическом нагружении, при повторных теплосменах, а также коррозионной стойкости, показали, что биметалл, полученный сваркой взрывом, обладает комплексом свойств, позволяющим использовать его в конструкциях ответственного назначения в атомном, энергетическом, химическом, нефтехимическом и других отраслях современного машиностроения.

В атомном машиностроении перспективно использовать крупногабаритные листовые биметаллы толщиной до 120 мм, шириной до 4 м, длиной до 10 метров, полученные сваркой взрывом, при изготовлении [37]:

- теплообменного оборудования - трубные решётки конденсаторов, плакированные титаном или хромоникельмолибденовой сталью;
- корпусов парогенераторов, ёмкостей САОЗ (системы аварийного охлаждения зоны), сепараторов пара и других сосудов, в которых требуется защита от коррозии.

Для увеличения коррозионной стойкости нержавеющей сталей в средах, содержащих хлор ионы, разработан [38, 39] многослойный материал с внутренней катодной защитой, что позволяет на порядок повысить стойкость этих сталей к питтинговой коррозии. Такие материалы перспективно производить сваркой взрывом, например, для изготовления хранилищ для кубово-

го остатка ЖРО (жидких радиоактивных отходов) с использованием нового многослойного металлического материала с «протекторной питтинг-защитой».

Корпуса мощного ледокольного флота, в первую очередь атомных ледоколов, судов арктического плавания, а также плавучих буровых установок и стационарных платформ, работающих при низких температурах (часто в условиях сложной ледовой обстановки), изготавливаются из высокопрочных корпусных сталей типа F500W с пределом текучести 500 МПа. Известно, что надежность этих сталей при эксплуатации определяется способностью материала сопротивляться разрушению при зарождении трещин вследствие коррозии и их распространении. Для повышения надёжности целесообразно защитить поверхность корпуса судна от воздействия агрессивной среды путём нанесения на поверхность стали слоя пластичной аустенитной коррозионностойкой стали, что одновременно предотвратит зарождение трещин в поверхностном слое.

В судостроении коррозионностойкий биметалл (сталь +коррозионностойкая сталь или хромоникелевые сплавы, сталь+титан, нержавеющая сталь+титан и др.) находит применение в качестве материала для изготовления различных деталей емкостей, опреснителей, цистерн, трубных решёток и т.п. [40].

Мировой рынок потребления биметаллов

С 2004 по 2014 год мировой рынок биметаллов вырос почти в 3 раза (рисунок 1.2). Сегодня мировой объем рынка оценивается в 350 тыс.м² [41].

Постоянными потребителями крупногабаритного биметалла в РФ являются крупнейшие машиностроительные предприятия, производящие оборудование для атомной и нефтехимической отраслей промышленности: АО «Пензахиммаш», «Курганхиммаш», «Уралхиммаш», «Волгограднефтехиммаш», ПАО «ЗИО-Подольск», АО «Атоммаш», АО «Калужский турбинный завод», АО «Уральский турбинный завод», ПАО «Силовые машины» и т.д.

Их потребности в настоящее время удовлетворяются отечественными производителями только на 50%, остальное импортируется.

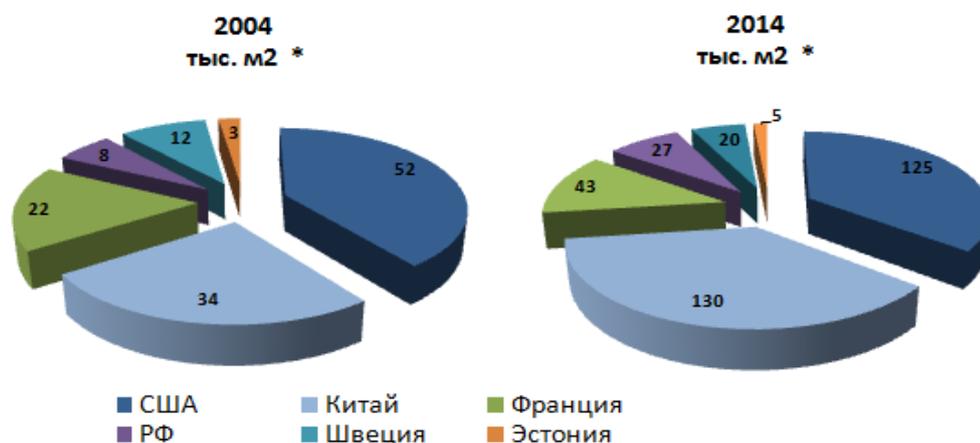


Рисунок 1.2 – Мировой рынок производства биметаллов.

Российский рынок биметаллов дефицитен и оценивается сегодня в 70-80 тыс.м². в год (20-30 тыс. т в год или 4-7,5 млрд. руб.):

- 20 тыс.м² производится в России,
- 25-30 тыс. м². импортируется,
- 20-40 тыс. м² неудовлетворенный спрос.

Общая потребность в России к 2030 году составит 100 тыс.м². Потребление по отраслям промышленности в РФ представлено на рис.1.3.



Рисунок 1.3 – Потребление по отраслям промышленности в России, % .

Основной задачей создания технологии промышленного производства крупногабаритного биметалла является обеспечение прочного соединения

слоёв без изменения их исходных свойств. В мире сегодня находят применение три основных технологии производства крупногабаритного листового биметалла: пакетная прокатка, электродуговая или электрошлаковая наплавка и сварка взрывом. Каждый из этих методов имеет «специфические преимущества и недостатки, определяющие область его рационального применения» [42].

Методы, основанные на расплавлении плакирующего слоя

Электродуговая наплавка в различных ее модификациях (ручная, полуавтоматическая под флюсом или в атмосфере защитных газов, автоматическая под флюсом, порошковой проволокой и др.) различается универсальностью в отношении формы наплавляемой поверхности, что позволяет наносить покрытия из твердых сплавов, не допускающих обработку давлением [37]. Общими недостатками методов, основанных на расплавлении плакирующего слоя, являются высокая стоимость наплавочных материалов, трудность обеспечивать заданный состав плакирующего слоя из высоколегированных сталей, высокая энергоёмкость процесса наплавки, связанная с необходимостью расплавления наплавочных материалов, образование химических соединений в зоне перемешивания основного и плакирующего слоёв, а также высокий уровень напряжений и деформаций из-за разницы коэффициентов теплового расширения и усадки расплавленного металла. Из-за этих недостатков методы, основанные на расплавлении плакирующего слоя, не применяются в развитых странах для промышленного производства листовых биметаллов на основе стали.

Методы, основанные на образовании соединения слоёв в твёрдой фазе в процессе горячей прокатки

Наибольшее распространение в мировой практике при производстве биметаллического листового проката с основой из стали получили методы пакетной прокатки. При этом способе на заготовку (сляб) из перлитной или низколегированной стали с хорошо обработанной и обезжиренной поверхностью укладывается плакирующий лист из высоколегированной стали [37].

Производится герметизация пакета по периметру. Пакет перед прокаткой нагревают до температур 1150...1250°C, при этом происходит растворение и восстановление окислов на всех поверхностях герметичного объема. Последующая прокатка на толстолистовых станах с величиной обжатия не менее 60% приводит к схватыванию; т.е. образованию металлических связей между контактными поверхностями металлов. Структура и прочностные характеристики зоны соединения определяются металлургическими процессами, в частности, взаимной диффузией, приводящей к образованию эвтектических и хрупких интерметаллидных прослоек [34]. Метод эффективен при производстве крупнотоннажных партий. Этим методом в настоящее время производится основная масса плакированного листа в Англии, США, Франции, ФРГ, Швеции и Японии. Отличия в производстве биметалла пакетной прокаткой на различных фирмах состоят в отдельных элементах конструкции пакетов (симметричные, несимметричные, с крышкой и т.д.), в применении метода защиты контактной поверхности от окисления в процессе нагрева под прокат (использование геттеров, вакуумирования), в применении различных материалов подслоя, обеспечивающего снижение степени перераспределения углерода в граничной зоне соединения слоев [37]. Существенным недостатком метода является то, что при использовании в качестве основного слоя слябов, механические характеристики и сплошность основного слоя определяются на конечном этапе, то есть в готовом биметалле. В случае несоответствия по этим показателям готовый биметаллический прокат бракуется.

Методы, основанные на использовании энергии взрыва для получения прочного соединения слоёв в твёрдой фазе.

Сварка взрывом является методом, практически не изменяющим свойства исходных составляющих биметалла. Это важный фактор [34], который позволяет до изготовления биметалла обеспечить требуемые конструкционные свойства основного слоя (механические свойства, категория прочности, структура, наличие включений, химсостав и т.п.) и специальные свойства плакирующего слоя (химсостав, стойкость к

межкристаллитной коррозии и т.п.). Сварка проходит в твёрдой фазе без значительного разогрева металла за промежуток времени порядка десятков микросекунд без взаимной диффузии свариваемых металлов [34, 43, 44]. Главное преимущество плакирования взрывом состоит в возможности соединения между собой металлов, сварка которых другими способами сложна или практически исключена. Применение этого метода даёт возможность получить сварное соединение на площади от нескольких квадратных миллиметров до десятков квадратных метров. Универсальность технологии, отсутствие специального оборудования, обеспечивающего процесс образования соединения, делает возможным одновременно производить разные марки биметаллов широкой номенклатуры от одного листа до крупнотоннажных партий в несколько сотен тонн [34]. В процессе сварки взрывом в зоне соединения фиксируется высокий уровень остаточных напряжений, а также происходит деформация заготовки под действием заряда ВВ, что требует термической обработки и последующей холодной правки. В случае крупногабаритных листов требуется мощное оборудование для правки и термообработки. Кроме того, процесс происходит с использованием достаточно больших зарядов ВВ, что требует использования специальных полигонов, удаленных от промышленных баз.

Метод производства в первую очередь характеризуется прочностью соединения слоёв (рисунок 1.4). Наибольшую прочность имеют методы наплавки, основанные на расплавлении плакирующего слоя. Сравним эти методы по энергоэффективности и универсальности (таблица 1.1) [45-47]. Анализ методов производства биметалла показывает, что затраты энергии на изготовление 1 кв. м биметалла сваркой взрывом на порядок ниже, чем прокаткой, и в 40-60 раз ниже, чем наплавкой. Низкий расход энергии при сварке взрывом связан с тем, что соединение образуется в твёрдой фазе, и в образовании соединения участвуют только поверхностные слои свариваемых материалов толщиной до 0,5 мм. Основные преимущества сварки взрывом, кроме отмеченных выше, возможность получения прочных соединений

практически любых металлов и сплавов, отсутствие ограничений по площади заготовок, относительная простота процесса и высокая производительность.

Проведенный анализ показывает значительные преимущества метода сварки взрывом по универсальности, энергоэффективности, прочности соединения, что предопределило его бурное развитие. Опыт производства биметалла сваркой взрывом убедительно свидетельствует о перспективности и эффективности этого процесса [47]. Метод позволяет создавать материалы с принципиально новыми свойствами, повышать срок их службы в условиях воздействия агрессивных сред, экономить нержавеющие стали, цветные металлы и сплавы, снижать трудоёмкость и стоимость изделий.

Для нужд машиностроения изготавливают крупногабаритные двухслойные листы толщиной от 12 до 200 мм, шириной от 500 до 4000 мм, длиной от 500 до 13000 мм. При этом толщина плакирующего слоя может составлять от 2 до 25 мм.

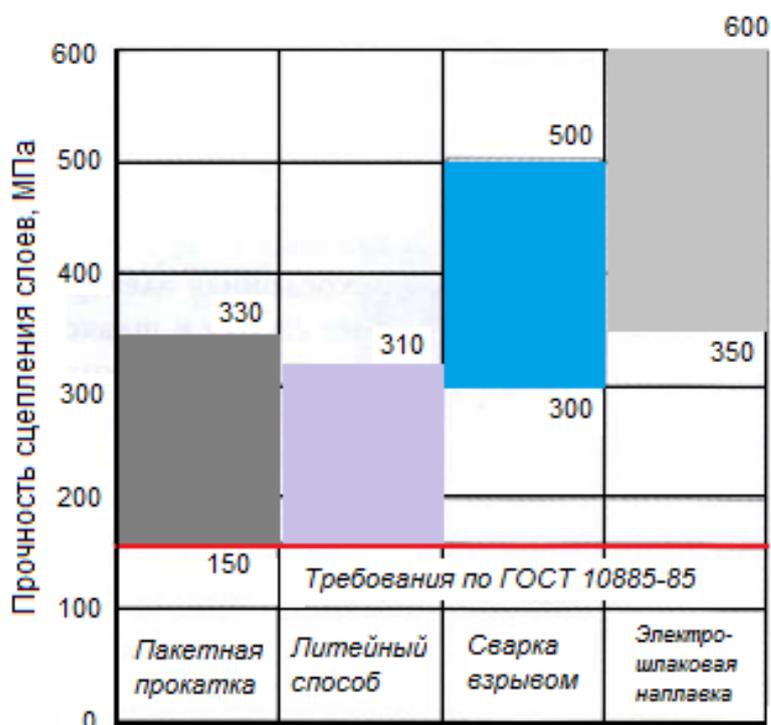


Рисунок 1.4 - Прочность сцепления слоев (сопротивление срезу) в двухслойных листах, полученных различными способами [3].

Таблица 1.1 – Характеристика методов производства биметалла и удельный расход энергии на изготовление одного квадратного метра биметалла

№ п/п	Метод производства	Характеристика метода	Энергия расходуется	Удельный расход энергии Квт-час/м ²
1	Пакетная прокатка	Требуется мощное специализированное прокатное оборудование. Крупнотоннажные партии. Изготовление вакуумируемых пакетов.	На подготовку и сварку пакетов. Нагрев пакетов до температуры прокатки (1100-1200 °С). Работу прокатного оборудования	30-35
2	Электро-дуговая наплавка	Требуются специальные установки для наплавки электродом или лентой. Требуется механическая обработка после наплавки. Деформация листов в процессе наплавки и тепловое воздействие на металл основного слоя.	Расплавление наплавочных материалов (электродов и шлака). Работу термических печей и правильного оборудования.	199-285
3	Электро-шлаковая наплавка с последующей прокаткой	Требуются специальные установки для наплавки и мощное прокатное оборудование. Высокая стоимость наплавочных материалов. Ограничение по номенклатуре марок плакирующего слоя	Расплавление наплавочных материалов(электродов и шлака). Нагрев наплавленных слябов до температуры прокатки (1100-1200 °С). Работу прокатного оборудования. Работу термических печей и правильного оборудования.	120-160
4	Сварка взрывом	Возможность производства любых партий биметаллов без ограничений по номенклатуре при расходном коэффициенте 1,05. Требуется специальные полигоны для ведения взрывных работ, оборудование для термообработки и правки	На абразивную зачистку свариваемых. поверхностей, сборку и сварку пакетов. Работу термических печей (нагрев до 750 °С) и правильного оборудования.	3-4

Эти преимущества определили быстрое развитие производства крупногабаритного биметалла сваркой взрывом для важнейших отраслей машино-

строения в мире (рисунок 1.5). Производство биметаллов, произведенных сваркой взрывом, за 10 лет выросло почти в 4 раза.

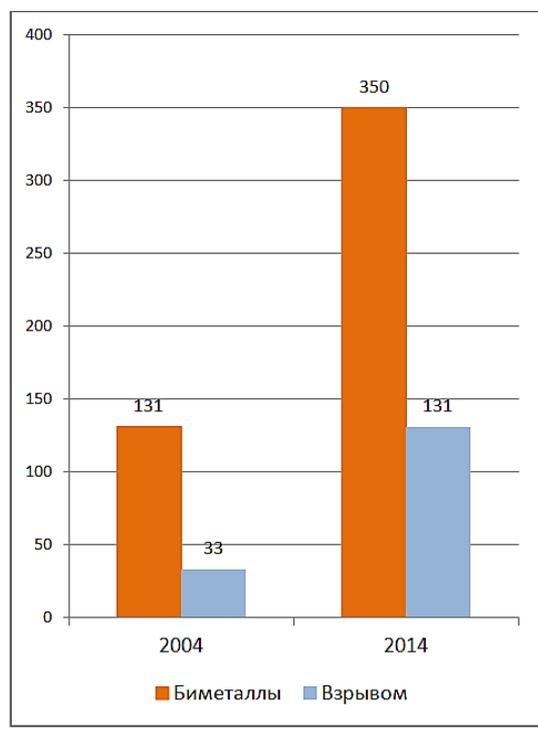


Рисунок 1.5 – Развитие мирового производства биметаллов за период 2004-2014 годы, в том числе методом сварки взрывом [41].

1.2 Современное состояние промышленного производства биметаллов сваркой взрывом

Сваркой взрывом в основном производится крупногабаритный биметалл, используемый при изготовлении парогенераторов, трубчатых теплообменников, нагревателей, испарителей, котлов, газификаторов (энергетика), паровых резервуаров, реакторов, вакуум-аппаратов, автоклавов (химическая отрасль), продукто-нефтепроводов, шлакоуловителей (нефтяная отрасль) сепараторов пара, систем аварийного охлаждения зоны (машиностроение), корпусов, переходных элементов (судостроение), брони (ВПК), установок по десульфуризации.

Наиболее значимые производители биметалла методом сварки взрывом: Корпорация NobelClad™ / DMC (Франция/США), Shockwave Metalworking Technologies (Нидерланды), BACLAD™ / Asahi Kasei Corporation

(Япония), Hanwha Corporation (Южная Корея), ICEM Engineering Company (Индия). Активно развивается производство биметалла в Китае: TISCO /Taiyuan Iron and Steel Co. Ltd. (TISCO), Sichuan Jinglei, Baoji Baotai, Dalian Shipbuilding, Nanjing Baotai, Xian Tianli, Zhengzhou Yugunag, Nanjing Runbang. В настоящее время на рынке биметаллов, производимых методом сварки взрывом, складывается дуополия американской корпорации DMC, поглотившей своих европейских конкурентов, включая Nobel Clad (Франция), и китайскими производителями Tianli Clad Metal, Nanjin Baotai, Dalian Shipbuilding, Zhong Bao и др.. Концентрация производства связана с его спецификой – жесткими требованиями к безопасности проведения взрывных работ.

В ряде зарубежных публикаций, посвященных производству биметалла сваркой взрывом, рассматриваются вопросы образования соединения различных пар металлов, получаемых структур соединения, влияния на структуру и механические свойства режимов термической обработки [48-53]. Следует отметить, что в этих работах, как правило, не рассматриваются технологические особенности производства биметаллов.

В России биметалл сваркой взрывом производят: Группа компаний в составе ООО «Битруб Интернэшнл» и ООО «Битруб» (г. Красноармейск, Московской обл.), АО Энергометалл (г. Санкт-Петербург), ООО Технология СВ (г. Волгоград), ООО Биметалл (г. Волжск), ООО "Протол" (г. Новоуральск).

На момент начала исследований (2004 г.) биметалл сваркой взрывом практически не производился в промышленных масштабах из-за отсутствия промышленной технологии, обеспечивающей высокое качество крупногабаритных двухслойных листов, соответствующих мировому уровню.

Поэтому создание научных и технологических основ промышленного производства биметалла и разработка технологии, обеспечивающей стабильное качество крупногабаритных биметаллических листов для изготовления оборудования, работающего при одновременном воздействии

высоких температур, давлений, знакопеременных нагрузок, коррозионной среды является актуальной задачей, решение которой позволит обеспечить важнейшие отрасли машиностроения (атомную, нефтехимическую, судостроительную) отечественным высококачественным двухслойным листом промышленных габаритов и исключить их зависимость от импорта биметалла. Одновременно это позволит изменить подход к организации производства биметалла сваркой взрывом от «уровня мастерской» до «промышленного», что позволит производить конкурентоспособный крупногабаритный биметалл в объемах, близких к потребностям машиностроения.

1.3 Характерные дефекты, возникающие при производстве крупногабаритных двухслойных листов сваркой взрывом

Классификация дефектов, образующихся при сварке взрывом, была сделана в работах [7, 36, 54]. На рисунке 1.6 представлено пять групп основных дефектов, выявляемых в крупногабаритных изделиях.

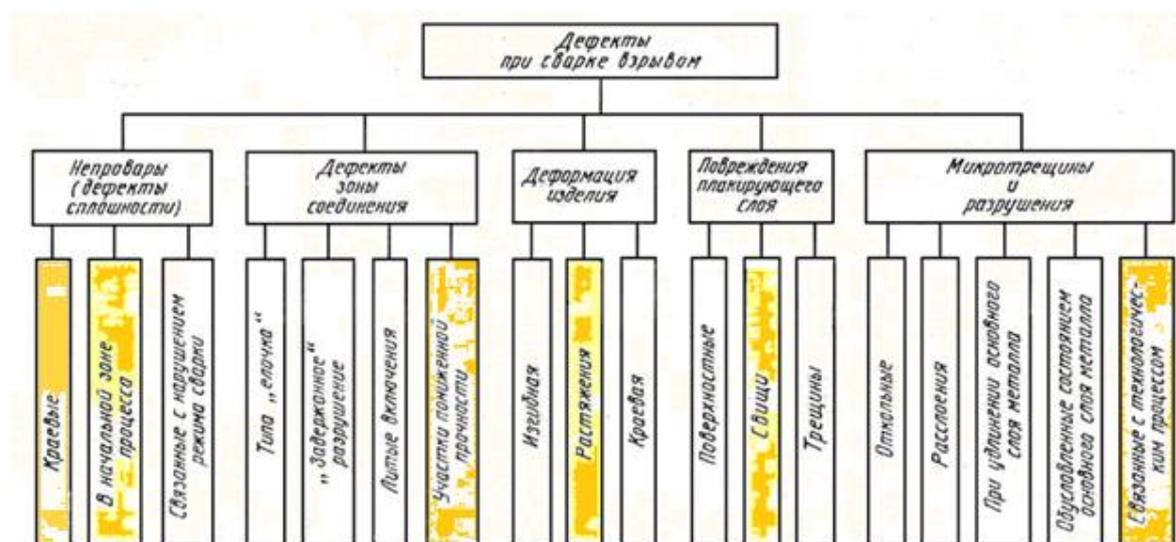


Рисунок.1.6 – Характерные дефекты, возникающие при изготовлении крупногабаритных двухслойных листов [36]. Проблемы, не решенные к моменту начала работ обозначены желтым цветом.

В соответствии с расположением дефекта и причиной его появления каждая группа подразделена на подгруппы. К моменту начала работ (2004 г.)

при контроле результатов качества двухслойных листов сталь+ коррозионно-стойкая сталь и сталь+титан, производимого в ООО «Битруб Интернэшнл», по режимам, представленным в таблице 1.2, были выявлены дефекты, которые значительно понижали эффективность производства крупногабаритного биметалла (рисунок 1.6, выделено желтым). К ним относятся краевые неспривары, неспривары в начальной зоне процесса, участки пониженной прочности, деформация растяжения в конечной зоне листа, повреждение плакирующего слоя (свищи), а также неспривары, связанные с нарушением технологического процесса (для пары сталь+титан). Указанные дефекты рассмотрены подробнее в работах [46, 55].

Таблица 1.2 – Режимы, принятые при сварке взрывом крупногабаритных листов.

Начальные параметры			Расчетные параметры соударения	
$V_k = D$, м/с	Параметр $r = m_{ВВ} / m_{пл}$	Сварочный зазор δ , мм	V_c , м/с	γ , град.
2200-2800	0,9-1,4	8 ± 4	400-600	10-13

Краевые неспривары, которые образуются в виде полосы вдоль кромок заготовки или имеют Г-образную форму на углах [55] объясняют в [58, 59] неравномерным распределением суммарного импульса, действующего на свариваемую пластину, что приводит к неравномерному распределению давления. На практике для выравнивания импульса применяют нависания заряда, увеличивая его размеры по длине и ширине по сравнению с размером основного листа. Метод приближенного расчета оптимальных нависаний на основе общей теории детонации ВВ приведен в работе [60]. Для случая полного ограничения разлета ВВ с нижних поверхностей нависающих частей заряда (размеры метаемой пластины равны размерам заряда) предлагается переднее l_n и боковое нависание l_b определять из условия $l_n = l_b = H_{вв}$, заднее нависание l_3 - из условия $l_3 = (2/3) H_{вв}$ (где $H_{вв}$ — высота заряда).

Применение больших нависаний плакирующего листа в сочетании с ложными нависаниями заряда ВВ существенно снижает неспривары на концах заготовок со 100-200 до 10-20 мм, но не предотвращает их полностью, осо-

бенно при толщине метаемой пластины больше 10 мм [46, 55]. При этом возникает возможность внесения в сварочный зазор различных загрязнений от потдува продуктов детонации.

Следует отметить, что даже при производстве биметалла на специализированных предприятиях компании NobelClad / DMC фиксируются участки неприваров в начале сварки, размеры которых определены ТУ NC 501 General Specification (Франция), AD Merkblatt W8, Juli 1987, спецификация 1264 от 4.85 непривары в краевых зонах. В связи с этим производители часто отрезают краевые зоны шириной до 80 мм по всему периметру, что значительно уменьшает выход годного биметалла и увеличивает его стоимость [55].

Непривары в начальной зоне процесса после ультразвукового контроля представлены на рисунке 1.7. Опыт производства биметалла сваркой взрывом показывает, что в месте инициирования процесса взрыва (или начала сварки) образуется непривар, на размеры которого влияют различные факторы (тип ВВ, время стабилизации процесса, толщина плакирующего материала и др.). В работе [36] появление начального непривара связывают с отсутствием в этой зоне косоугольного соударения, определяющего очищение от оксидных пленок свариваемых поверхностей. Разработан ряд способов для уменьшения или ликвидации неприваров в месте инициирования процесса [36]. Авторами [56] предложено в месте инициирования между листами устанавливать вставку из металла, имеющего треугольное и ромбовидное сечение. Трудность точного центрирования вставок и места инициирования ограничивает применение способа сравнительно небольшими листами. В [57] в месте начала процесса предложено производить инициирование боевиком, состоящим из высокоскоростных ВВ двух типов при условии, что ВВ с большей скоростью детонации должно располагаться с наружной стороны боевика.

Следует подчеркнуть, что надежного способа ликвидации неприваров в точке инициирования не предложено. Данный вид дефекта считается сопутствующим процессу. Однако с увеличением размеров плакируемых изделий

Изменение режима сварки заметно не влияет на протяженность этих зон. На участках пониженной прочности соединение имеет ситовый характер, прочность которого определяется числом «мостиков» схватывания [46, 55]. Для разработки мер по стабилизации соединения сталь+сталь в работе [36] на участках пониженной прочности изучено изменение прочности соединения в зависимости от режима термической обработки. Исследования показали, что достаточно продолжительная высокотемпературная обработка (при $t > A_{c3}$) увеличивает прочность до нормальной. Авторы [36] объясняют это тем, что «в указанных условиях идёт процесс, родственник спеканию, сопровождаемый залечиванием микроскопических несплошностей соединения за счёт процессов самодиффузии. Ультразвуковые колебания в диапазоне частот 2,5 – 10 МГц беспрепятственно проходят через границу слоёв уже при наличии мостиков схватывания и физического контакта между ними. В этом состоянии отдельные образцы, на которых ультразвуковой контроль не обнаружил непроваров, хрупко разрушались уже при механической обработке». Высокотемпературная обработка с нагревом выше A_{c3} стабилизировала прочность соединения. В то же время в работе [36] приведены данные увеличения размеров непроваров при низкотемпературном нагреве. Явление образования участков пониженной прочности недостаточно изучено, и считается, что не существует методов для устранения данного вида дефекта [55].

Следует отметить, что при иницировании заряда из центра прочность возрастает по такому же закону (см. рис.1.8), следовательно, это место будет участком пониженной прочности, не соответствующим ТУ. При иницировании из центра следует критично оценивать площадь радиусом 180-200 мм. Эти участки при изготовлении биметалла сталь+титан в процессе термообработки не будут изменяться. Таким образом, при иницировании из центра не соответствующим требованиям ТУ и ГОСТ по прочности соединения слоёв будет участок не 35 см², а более 300 см². Это важно для трубных решеток конденсаторов, т.к. в этих зонах возможно отслоение плакирующего слоя при сверлении отверстий, что может приводить к расслоению при эксплуатации.

Повреждение плакирующего слоя при сварке взрывом в виде образования в плакирующем листе из стали сквозного отверстия (свища) с отогнутыми наружу и утонёнными кромками со следами оплавления наблюдали авторы [35]. Несмотря на то, что «свищи» могут иметь значительные размеры (рисунок 1.9), в опубликованной литературе мало уделено внимания данному виду дефекта [46, 55].

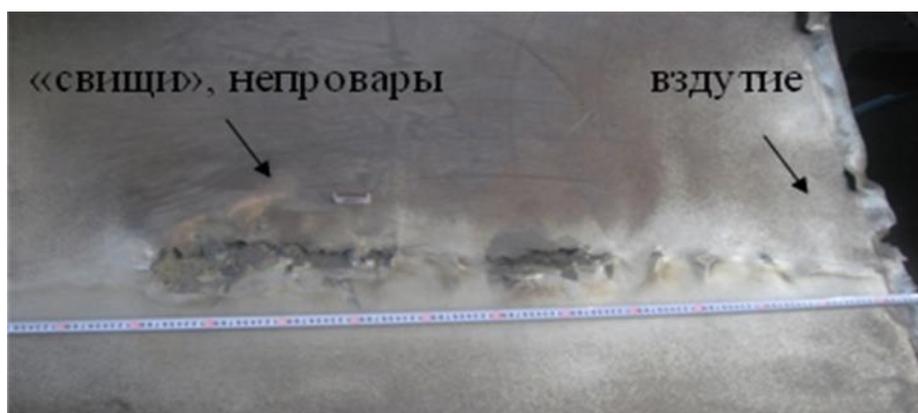


Рисунок 1.9 – Кратерообразные вырывы (свищи) после сварки взрывом [46].

Причины появления дефектов в виде свища были изучены в экспериментах по его искусственному получению. В первой серии экспериментов [36] «в заряде создавали конические выемки с углом при вершине от 30 до 90° и высотой до половины толщины заряда. Метаемую пластину изготовили из стали 08X18H10T толщиной 3 мм». Воспроизвести свищ изменением скорости детонации от 2000-4000 м/с и параметра γ от 1 до 2 не удалось, однако в зоне выемок наблюдались непровары. Во второй серии экспериментов [36] «в центре заряда выполняли отверстие диаметром 100 мм, а инициирование заряда производили по всему его контуру системой детонирующих шнуров. Опыты проводили на пластинах диаметром 450 мм на воздухе и в вакууме ($P=6,5$ КПа). После взрыва в центре заготовок были обнаружены сквозные отверстия с отогнутыми наружу и утонёнными кромками со следами оплавления, по внешнему виду, похожи на свищи. При проведении экспериментов в вакууме размеры свищей значительно уменьшились». На основе проведённых экспериментов в работе [36] сделан вывод о том, что «свищи обра-

зуются вследствие нарушения процесса и захлопывания воздуха, находящегося в зазоре под большим давлением в ограниченном объёме».

Деформация растяжения в конечной зоне листа. Деформация крупногабаритных двуслойных листов оценивается путём измерения отклонения от плоскостности и изменений габаритных размеров [61]. В частности, в работе [36] выявлено три типа деформаций: изгиб, растяжение и деформация узких граней. Деформации изгиба могут быть устранены последующей правкой листов. Деформация растяжения в конечной зоне листа приводит к неисправимым изменениям габаритных размеров листов, а также образованию откольных трещин [61]. В работе [62] при исследовании деформации растяжения выявлено удлинение и основного и плакирующего листов. Однако производители биметалла после сварки взрывом толстолистового крупногабаритного биметалла наблюдают удлинение основного листа по сравнению с его исходным размером. Этот факт учитывается производителями при обрезке заготовки биметалла в заданный размер.

Как правило, промышленности требуются крупногабаритные заготовки биметалла сталь+титан шириной до 3,5 и длиной до 4 метров. Сварка взрывом крупногабаритных листов осуществляется на открытых площадках (полигонах), в том числе в средней полосе России и на Урале. Температура воздуха в этих районах зимой нередко опускается до -20 °С. Производственные опыты показали, что поведение титана в процессе сварки взрывом изменяется при отрицательных температурах окружающего воздуха. В этих условиях на боковых кромках и в краевых зонах после сварки взрывом наблюдаются обрывы «зубчатой формы» (рисунок 1.10) и потяги метаемого листа, а также вырывы в углах и в отдельных местах по кромке плакирующего слоя заготовки. Вырыв плакирующего слоя на конечных участках заготовок наблюдается на расстоянии до 100 мм от края.

Непровары, связанные с нарушением режима сварки, могут появляться вследствие ряда случайных факторов, например, нарушения гомогенности смесового заряда ВВ и искривления фронта детонации, изменения размера

сварочного зазора, наличия различных загрязнений на свариваемых поверхностях [55, 63]. В работе [54] показано, что при смешивании и раскладке заряда ВВ, приготовленного из сухой селитры, может происходить разделение селитры и аммонита, что приводит к обеднению аммонитом одних участков и обогащению других. Поэтому при использовании для сварки взрывом смесей порошкообразного аммонита с аммиачной селитрой предложено «обеспечить их влажность в пределах 0,8-1,5%, в случае использования ВВ с влажностью менее 0,8% необходимо тщательное перемешивание непосредственно на плакирующем листе в процессе раскладки» [46, 54].

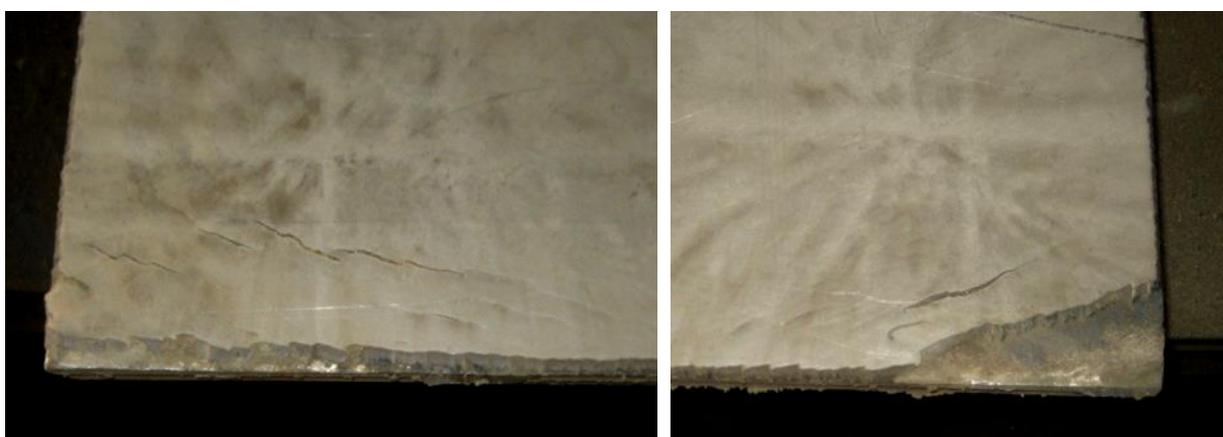


Рисунок 1.10 – Дефекты в конечной зоне двухслойного листа (потяги, вырывы, обрывы), полученного сваркой взрывом в среде аргона при температуре окружающего воздуха -20°C .

При детонации крупногабаритных зарядов аммиачно-селитренных ВВ в толщинах, близких к критическим, возможен переход процесса детонации в режим самораспространяющегося взрывного процесса, описанный в работах К.К. Шведова [64]. Смена режима детонации может быть локальной, что приводит на этих участках к появлению непроваров, а также свищей. Также данный вид дефекта образуется вследствие недостаточной плоскостности исходных материалов [65]. Одной из основных технологических задач, во многом определяющих качество соединения, является выдерживание исходного сварочного зазора. Особенно актуальна эта задача при плакировании больших поверхностей тонкими листами (1-5 мм) [63]. Имеются различные вари-

анты способов регулирования зазоров, применяемые производителями. В России широко применяются для выдерживания сварочного зазора V – различные металлические опоры, разработанные авторами [66-68]. Чтобы избежать загрязнения свариваемых поверхностей, установку металлических опор желательно производить в закрытом помещении. При транспортировке готовых пакетов к месту сварки взрывом может происходить смещение дистанционных опор, в результате чего нарушается сварочный зазор и, как следствие, происходит появление дефектов сплошности [63].

В практике применения сварки взрывом для производства крупногабаритных листов биметалла с плакирующим слоем из титана [69] известна проблема снижения качества сварного соединения по мере удаления от начала процесса сварки [18, 70, 71]. На расстоянии более 1 м от начала процесса отмечается значительное снижение прочности сцепления слоев с последующим разрушением плакирующего слоя. Эти изменения сопровождаются увеличением размера вихревых зон вплоть до образования сплошной прослойки оплавленного металла [69]. Выявленную нестабильность обычно связывают с образованием интерметаллида Fe–Ti на границе сварки [12, 72]. Улучшение качества обработки свариваемых поверхностей, изменение режимов сварки несколько улучшало положение, но полностью устранить масштабный эффект не удавалось. В работе [22] на основании экспериментальных данных по сварке взрывом пластин титана с титаном показана теоретическая возможность воспламенения и горения за счёт взаимодействия с кислородом и азотом воздуха мелкодисперсных частиц титана. Особенности технологии сварки взрывом в среде защитного газа аргона позволяют предотвратить горение частиц титана в сварочном зазоре, однако и в этом случае не удавалось полностью избежать указанных выше дефектов. Кроме того при производстве изделий из биметалла сталь+титан были выявлены случаи, когда результаты ультразвукового контроля показывали отсутствие дефектов сплошности, а при сверлении отверстий иногда появлялись расслоения, что говорит о наличии участков низкой прочности, не выявляемых УЗК (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 – Отслоения лакирующего слоя, выявленные в процессе сверления отверстий - участки полупривара (участки пониженной прочности) пары сталь+титан.

Результаты контроля качества соединения нескольких партий двухслойных листов, марки 09Г2С+Тр316Тi размерами 23(20+3)х1400х5900 мм и 09Г2С+Тр321 размерами 45(40+5)х1400х5900 мм представлены в работе [55, 73, 74]. Образцы для сертификационных испытаний отбирались от каждой промышленной партии из 10-15 листов. На всех листах на расстоянии до 70 мм от зоны начального непривара выявлен участок пониженной прочности, на котором прочность соединения на срез не превышает 150 МПа. На основании этих данных было сделано заключение, что дефект сплошности в начале процесса всегда сопровождается участком пониженной прочности [55].

В результате контроля качества партии биметалла из 41 листа марки 09Г2С+ВТ1-0, размерами 30(25+5)х3700х3200 мм, полученных сваркой взрывом в среде аргона, на отдельных листах выявлены непровары и вырывы лакирующего слоя в зонах, прилегающих к окончанию сварки (рисунок 1.12).

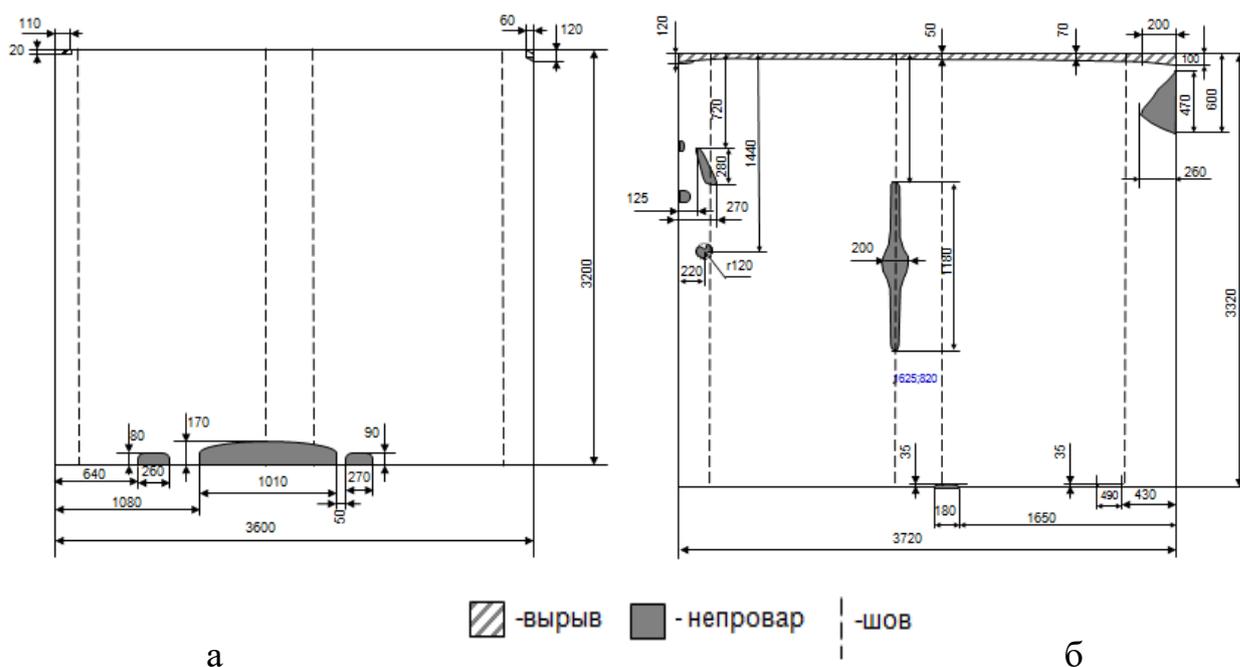


Рисунок 1.12 – Карта ультразвукового контроля дефектных листов биметалла: непривар в начале процесса (а), непривары и вырыв плакирующего слоя (б).

На основании анализа дефектов было установлено, что участки пониженной прочности в начале процесса сварки взрывом (дефект А, таблица 1.3) фиксировались во всех листах сталь +сталь и на 24% листах сталь+титан. Количество листов с краевыми и локальными неприварами в зоне швов плакирующего слоя (дефект Б, таблица 1.3), а также свищами и вырывами плакирующего слоя в зонах, прилегающих к окончанию сварки (дефект В, таблица 1.3) достигало 25 % от общего числа произведенных листов для биметалла сталь+сталь [55, 63, 73, 74] и 51% для биметалла сталь+титан.

Листы биметалла с дефектами подвергают ремонту путём удаления дефектных мест и последующей электродуговой наплавке, что ухудшает качество биметалла, повышает его стоимость [55]. Участки пониженной прочности не фиксируются ультразвуковой дефектоскопией, и для обеспечения гарантированной прочности соединения в готовом биметалле производитель, в том числе и за рубежом, отрезает по периметру листа полосу [74] шириной до 80 мм или вынужден проводить высокотемпературную термическую обработку биметалла.

Таблица 1.3 – Анализ дефектов, выявленных при промышленном производстве биметалла сваркой взрывом по данным 2008 года [74].

Марки сталей, размер (мм)	Вид дефекта*		<i>A</i>	<i>B</i>			<i>B</i>
	Класс сплошности по ГОСТ 10885-85		-	I	II	III	-
	площадь дефекта, см ²		50- 250	10- 50	20- 100	50- 250	10- 250
	количество листов, шт						
09Г2С+Тр316 Ti 23(20+3)х1400х5900	всего	51					
	с дефектами		51	5	7	5	4
09Г2С+Тр321 45(41+4)х1400х5900	всего	99					
	с дефектами		99	3	4	4	5
09Г2С+ВТ1-0 30(25+5)х3320х3720	всего	41					
	с дефектами		10	3	0	7	21

*вид дефекта: *A*-участок пониженной прочности; *B*- непровары; *B*- «свищи», вздутие, вырывы плакирующего слоя в зонах, прилегающих к окончанию сварки.

На паре сталь+титан все указанные дефекты не могут быть устранены ремонтом (наплавкой электродом). Их появление может существенно уменьшить площадь годного листа, так как обрезка дефекта производится линейно, по периметру листа с захватом потенциально годных областей. С учетом же невозможности отступления от заданных габаритов листы даже с мелкими дефектами бракуются.

Из таблицы 1.3 следует, что основным дефектом биметалла является непривар в начале процесса (точке инициирования). Измерение прочности соединения по длине листа показало, что прочность соединения при удалении от участка несплошности постепенно повышается и на расстоянии 150-250 мм (см. рис.1.8) становится постоянной, и, как правило, превышает прочность наиболее слабого металла композиции. Таким образом, при сварке взрывом наблюдается участок стабилизации прочности соединения. Наличие этого участка нельзя объяснить разгоном процесса ВВ.

Существующие представления о процессе сварки взрывом не дают однозначного ответа на причины образования указанных выше дефектов, они считались случайными или рассматривались как сопутствующие сварке взрывом.

1.4 Современное состояние теории образования соединения при сварке взрывом

В настоящее время накоплен большой экспериментальный и теоретический материал по вопросу формирования соединения при сварке взрывом [75] и образования характерного волнообразного соединения [76]. Однако до сих пор нет единого мнения по процессу образования соединения. Это связано в первую очередь с тем, что затруднено непосредственное наблюдение за процессом сварки из-за наличия поражающих факторов взрыва. В зоне соударения при сварке взрывом развиваются высокие давления, идет интенсивная пластическая деформация, сопровождаемая значительным повышением температуры металлов [5].

Имеется ряд гипотез, подтвержденных экспериментальными данными, объясняющих образование соединения с различных позиций. Успехи, достигнутые в области сварки взрывом, наиболее полно обобщены в монографиях выдающихся российских ученых [6, 12, 35, 36, 77] и публикациях зарубежных авторов [78-82].

Многочисленными исследованиями большой группы ученых и специалистов из различных мировых научных центров (в первую очередь российских) было доказано, что процесс сварки взрывом не является каким-то особым, отдельно стоящим видом сварки, а относится к твердофазным бездиффузионным способам сварки давлением [7, 44, 70, 84-86]. Различия заключаются лишь в величинах давлений и скоростей протекания процесса образования соединения в зоне контакта металлов, а следовательно, и в механизмах их реализации [83].

При сварке давлением соединение металлов образуется в результате развития сложных, взаимосвязанных и часто конкурирующих физико-

химических процессов. Традиционно все виды сварки давлением основаны на том, что соединение образуется в результате пластической деформации контактирующих объемов, которая сопровождается накоплением макропластической деформации [84, 87]. Формирование соединения при любой сварке давлением рассматривается как бездиффузионный процесс, происходящий в твердой фазе, состоящий из трех основных стадий [12]:

1. Создание физического контакта, т.е. сближение атомов материалов на расстояние, при котором становится возможным их химическое взаимодействие.

2. Активация соединяемых поверхностей (формирование активных центров на поверхности соединяемых материалов).

3. Объемное взаимодействие. Эта стадия начинается с момента формирования активных центров на сопрягаемых поверхностях. Она характеризуется развитием взаимодействия соединяемых металлов в плоскости контакта с формированием прочных связей. Процесс протекает в активных центрах, которые представляют собой дислокации со связанными с ними полями напряжений. В плоскости контакта процесс завершается слиянием отдельных ядер в области их взаимодействия, в поле напряжений фаза заканчивается их релаксацией.

При сварке взрывом условия возникновения активных центров на свариваемой поверхности и последовательность формирования соединения исследователи трактуют по-разному. Единого мнения на этот счет нет, что связано, в том числе, с многообразием экспериментальных схем, различием свойств свариваемых материалов, энергоэффективности ВВ, а также наличием масштабного фактора.

В настоящее время можно условно выделить две группы исследовательских моделей, объясняющих образование соединения при сварке взрывом со следующих позиций [11, 88]:

1. Процесс образования соединения рассматривается на основании законов гидродинамики, описывающих соударение под углом двух струй иде-

альной несжимаемой жидкости. Исследования стали основой теории сварки взрывом и позволили определить основные параметры процесса.

2. Процесс образования соединения рассматривается на основании законов классической теории сварки давлением в твердой фазе. Разработаны механизмы сварки взрывом с учетом наличия интенсивной пластической деформации в зоне контакта.

В работах [6, 77, 79-82] за основу процесса образования соединения была взята гидродинамическая модель. Процесс соударения пластин рассматривают как соударение под углом струй идеальной несжимаемой жидкости и решающую роль в образовании соединения отводят кумулятивному эффекту, образованию кумулятивной струи или облака дисперсных частиц (рисунок 1.13).

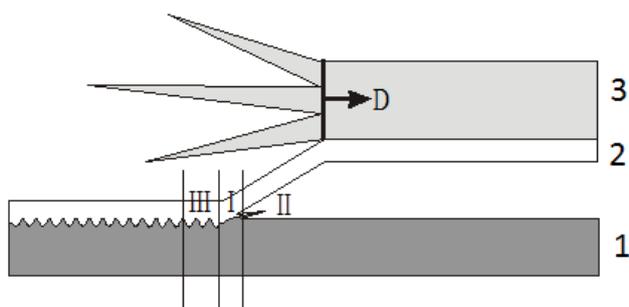


Рисунок 1.13 – Классическая схема сварки взрывом. 1 – основной лист, 2 – плакирующий лист, 3 – ВВ, I - зона точки контакта, II – кумулятивная струя, III - зона формирования соединения, D – скорость детонации.

Согласно работе [6] образующиеся при косом соударении пластин струи отличаются от струй при сжатии конических зарядов. Экспериментально при несимметричном соударении в режиме сварки взрывом со скоростями детонации ВВ менее 3000 м/с кумулятивную струю зафиксировать не удалось. Как показали рентгеновские фотографии процесса соударения, перед точкой контакта движется «облако дисперсных частиц, в котором не наблюдается каких-либо плотных образований» [16]. «В случае углового со-

ударения условия для образования струи практически не возникают, а образование облака дисперсных частиц имеет не гидродинамическую природу» [17]. Импульсной рентгеновской съёмкой в работе [18] зафиксировано образование бугра деформации в медной пластине перед точкой контакта и отсутствие каких-либо следов обратной струи. Авторы [89] связывают образование бугров с выходом ударной волны на свободную поверхность вследствие опережения ударной волной границы контактной поверхности с образованием микровыступов перед точкой контакта.

Вопросы волнообразования, пластической деформации в зоне соединения, интерпретации процессов, возникающих в структуре соединения, с позиции дислокационных моделей, особенности диффузии элементов в данной работе не рассматриваются, так как, с одной стороны, при оценке эффективности технологии требуется в первую очередь сплошность и стабильность прочности соединения. С другой стороны эти вопросы достаточно полно изучены в работах российских научных школ [90-98], а также в многочисленных зарубежных работах, например [82, 99-102].

Для сварки взрывом, как любого процесса сварки давлением в твердой фазе, наиболее важным является состояние свариваемых материалов [5, 103]. Под состоянием свариваемых материалов подразумеваются механические и химические свойства основного и плакирующего слоев и качество подготовки свариваемых поверхностей. Если рассматривать реальную поверхность металла, то с учетом микронеровностей при стандартной абразивной зачистке ее шероховатость HRz составляет 20-80 мкм. Таким образом, площадь реальной поверхности превышает площадь свариваемого листа в несколько раз. Считается, что в условиях косых соударений самоочищение поверхности свариваемых элементов происходит, в первую очередь, в результате образования кумулятивной струи [35, 36, 77, 86] и [99-102] или канального эффекта [104]. Кумулятивная струя снимает слой металла со свариваемых поверхностей и вместе с окислами и загрязнениями удаляет их в виде облака дисперсных частиц из сварочного зазора. Далее ювенильные поверхности сдавлива-

ются под действием продуктов детонации до образования металлической связи. Процесс соединения металлов при сварке взрывом сопровождается резким повышением температуры в зоне соединения, о чем свидетельствует наличие «литых структур» - зон, в которых происходило плавление материала в процессе сварки [83]. Следует отметить, что кумулятивную струю наблюдали только в специальных экспериментах на режимах, далёких от режимов, применяемых при сварке взрывом сталей. Например, точечное поражение мишеней, установленных на выходе из сварочного зазора, зафиксировано в работе [105] при сварке алюминия со сталью.

В работе [77] провели серии экспериментов для проверки возможности образования сварного соединения за счёт деформации микронеровностей. Результаты экспериментов показали, что механизмом очистки и активации свариваемых поверхностей является процесс струеобразования. Авторы [105] измеряли потерю массы образцов весовым методом в результате сварки с оценкой количества литых включений в соединении (с определением средней толщины включений литого металла, которую оценивали как отношение площади включения, измеренной в плоскости шлифа, к длине соединения). В работе [79] показано, что большая часть удаляемого с поверхности металла остаётся в соединении в виде литых включений. «Полное отсутствие включений, предельным случаем которого является процесс, не сопровождающийся потерей массы, приводит к неудовлетворительной очистке соединяемых поверхностей и резкому ухудшению качества сварки, чему одновременно способствует и малая энергия соударения, характерная для такого процесса» [83, 107].

Необходимое условие образования соединения при сварке взрывом, по мнению авторов [6, 77, 108], заключается в присутствии потока массы перед точкой контакта, который приводит к самоочищению свариваемых поверхностей. Именно процессам кумуляции отводится основная роль в процессах очистки и активации поверхностей, в контакт в точке соударения вступают активные и очищенные поверхности. При этом указывается, что механизм

образования обратной (кумулятивной) струи и облака дисперсных частиц один и тот же. В работе [12] сделан вывод о том, «...образование обратного массового потока (кумуляция) не является обязательным условием формирования соединения при сварке взрывом, и волнообразование имеет к ней косвенное отношение».

В работах [31, 32, 109] образование соединения при сварке металлических поверхностей взрывом рассматривается согласно гипотезе топохимических реакций (активных центров), основанной на общей теории несовершенства кристаллической решётки и кинетики химических реакций. Образование соединения в твёрдой фазе происходит в три основные стадии [87]: образование физического контакта, то есть сближение атомов соединяемых металлов на расстояние, при котором возможно физическое или химическое взаимодействие; активация контактных поверхностей (образование активных центров); объёмное взаимодействие. Соединение образуется при сближении свариваемых поверхностей на расстояние, позволяющее реализовываться силам межатомного взаимодействия, и устанавливать электронный обмен между активированными атомами, находящимися на этих поверхностях [110]. Если сила взаимодействия между атомами меньше суммарной энергии этих же изолированных атомов, то между ними преобладают силы притяжения, и образуется устойчивая молекула.

В работе [12] высказано предположение, что основным фактором, обеспечивающим формирование соединения при твердофазной сварке, является давление, к которому добавляется температура и время действия давления. Однако, так как при сварке взрывом диффузионные процессы не успевают развиваться, формирование соединения заканчивается только схватыванием сопрягаемых поверхностей:



где Me' и Me'' – атомы металлов на сопрягаемых поверхностях; O – кислород.

Во время процесса деформации происходит снижение энергии межзеренных границ, вызванное уменьшением площади их поверхности. Такая форма уравнения реакции процесса схватывания означает, что контактные поверхности металлов покрыты слоем оксида, а в результате реакции образуется новое соединение ($Me' - Me''$) как результат межатомного валентного взаимодействия. Таким образом, процесс схватывания металлов в твердой фазе представляется как химическая реакция, в результате которой происходит межатомное валентное взаимодействие и образуются химические связи [12].

Согласно работам [18, 44, 111, 112] пластическая деформация в зоне соударения металлических пластин является одним из обязательных условий сварки взрывом. В то же время в работе [77] показано, что возможно соединение очищенных и активированных металлических поверхностей без процессов деформации. По мнению авторов [113, 114] активация свариваемых поверхностей происходит за счёт энергии сдвига на границе раздела, и величина максимальных сдвигов должна превышать некую критическую $g_{\max}^{кр}$, чтобы затрачиваемая на деформацию энергия обеспечивала необходимую степень активации контактирующих поверхностей и должна быть меньше некоторой предельной $g_{\max}^{пр}$, при которой нарастание энергозатрат вызовет чрезмерный рост количества оплавленного металла, появление усадочных раковин, пустот, рыхлот, хрупких фаз и др. дефектов. Так для случая сварки стальных пластин в качестве $g_{\max}^{кр}$ и $g_{\max}^{пр}$ авторами указываются значения соответственно $\approx 35\%$ и $\approx 60\%$ [83]. В работе [115, 116] разработана методика расчетного определения затрат на пластическую деформацию. Равнопрочность соединений реализуется при постоянной и конкретной для каждого сочетания металлов энергии, затрачиваемой на деформирование слоя, равного амплитуде волн. Обобщение результатов исследований и сопоставление энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию в зоне волнообразования, с количеством необходимой для волнообразования энергии, выра-

жаемой как местное повышение температуры активного объема, позволило получить зависимости для определения скорости метания.

В работе [12] утверждается, что для сварки взрывом характерна двухстадийность процесса образования соединения: образование физического контакта и активация контактных поверхностей за счёт пластической деформации. Однако, несмотря на сомнения в существовании обратного потока в условиях сварки взрывом, энергетический баланс, образование и формирование соединения рассматриваются с учётом кумулятивных эффектов [88].

В работе [117] исследованы возможности самоочищения поверхностей при сварке взрывом в результате действия температурных напряжений на основе моделирования воздействия разогрева атмосферы между пластинами в качестве теплового удара по поверхности. На основе решения динамической задачи термоупругости о тепловых напряжениях в упругом полупространстве при тепловом ударе на его поверхности оценена возможность разрушения оксидной пленки и приповерхностных слоев металла за счет возникновения температурных напряжений в результате разогрева поверхностей свариваемых пластин ударно-сжатым газом, движущимся впереди точки контакта при сварке взрывом. Сделан вывод о возможности очистки поверхности ударно-сжатым газом.

Следует подчеркнуть, что все указанные теории справедливы и подтверждаются экспериментами для конкретных условий проведения экспериментов и режимов сварки, включающих свойства свариваемых материалов, ВВ, схемы сварки, масштабный фактор и т.п. В зависимости от условий эксперимента могут реализовываться различные механизмы образования соединения.

Для уточнения механизма образования соединения на крупногабаритных листах рассмотрим процесс образования соединения при сварке взрывом. В процессе участвуют 5 типов материалов: взрывчатое вещество, плакирующий лист, газ в сварочном зазоре, основной лист и опора [88]. Свойства

этих материалов в той или иной мере оказывают влияние на процесс образования соединения (таблица 1.4).

Влияние характеристик ВВ, свариваемых материалов и опоры хорошо изучены [12-14, 36, 65, 77-82]. Как было показано выше, образование соединения связывают с самоочищением поверхности в результате образования кумулятивной струи и наличием интенсивной пластической деформации. С этой точки зрения газ в сварочном зазоре не играет роли в образовании соединения, поэтому количество исследований по влиянию газа в сварочном зазоре ограничено [2, 21, 22, 118].

Таблица 1.4 – Физические характеристики материалов, участвующих в процессе сварки взрывом [88].

Материал	Характеристики материала
Взрывчатое вещество	скорость детонации, масса (толщина заряда), плотность
Плакирующий лист	плотность, масса, физико-механические свойства, химический состав, кристаллическая структура, свойства поверхности
Основной лист	
Газ в сварочном зазоре	плотность, состав, скорость звука и температура (исходная и в процессе сварки взрывом)
Опора	плотность, гомогенность, дисперсность, скорость звука

В работах [119-121] экспериментально исследованы тепловые процессы при сварке взрывом и дана оценка теплового воздействия УСГ впереди точки контакта на тепловую ситуацию в околошовной зоне. Сделан вывод, что толщина металла, прогретого до 100-200 °С, составляет 0,3-0,5 мм, и это не может отразиться на общей тепловой ситуации в условиях образования соединения. Однако эти результаты не характеризуют температуру на свариваемых поверхностях перед точкой контакта. В исследованиях [122] разработана модель для прогнозирования передачи тепла в процессе плакирования и для определения характеристик ударно-сжатого газа, образующегося в сва-

рочном зазоре. Сделан вывод о влиянии на морфологию границы соединения количества переданного тепла УСГ и кинетической энергии, затрачиваемой при соударении.

В работе [123] проведено исследование повышения стабильности структуры и свойств свариваемого взрывом крупногабаритного коррозионно-стойкого биметалла на основе исследования причин и особенностей нестационарности процесса плакирования длинномерных пластин. Разработаны рекомендации и технологические мероприятия, в частности, рекомендуется производить сварку, используя накладной заряд ВВ, обладающий высокой скоростью детонации (порядка 3000 ... 3500 м/с), поскольку в этом случае вероятность вертикальных перемещений сечений метаемого листа перед фронтом детонации сводится к нулю, а также заметно сокращается время воздействия нагретого воздуха на свариваемые поверхности перед линией контакта [123]. Экспериментально показано, что происходит вертикальное смещение листа при скорости детонации 2000-2500 м/с, приводящее к увеличению сварочного зазора в конечных зонах и переходу процесса сварки с плоскопараллельной схемы в угловую с соответствующим увеличением размера волн в соединении.

Следует отметить, что на практике (при промышленном производстве в стране и за рубежом) основной и плакирующий листы по периферии жестко скрепляются болтами и в собранном виде отправляется на взрывную площадку, а сварочный зазор выдерживается с помощью дистанционных опор различной конструкции, что должно исключать взаимное перемещение листов в процессе сварки взрывом. Исследований о стабильности процесса сварки взрывом в этих условиях к моменту начала работы не было.

Сварка взрывом со скоростями свыше 3500 м/с (выше поперечной скорости звука в металле 3000 м/с) по данным ряда исследований приводит к увеличению количества литых включений в соединении. В работе [36] для предупреждения образования трещин типа елочка при сварке взрывом сталей

необходимо соблюдать критерий $V_k < C_t$ (поперечная скорость звука в металле, равная для стали 3000 м/с).

В работе [124] приведены экспериментальные данные по измерению температуры УСГ и методика расчета воздействия ударно-сжатого газа на свариваемые поверхности. Показано, что ударно-сжатый газ нагревает свариваемую поверхность до соударения, а дополнительное выделение энергии в результате удара может привести к расплавлению металла на значительную глубину.

В работе [125] описан метод сварки взрывом основанный на использовании теплового потока газа, образующегося в тонком зазоре (0,2-0,3 мм) между свариваемыми металлическими поверхностями. При этом используются высокоскоростные ВВ, которые создают в зазоре между соединяемыми пластинами высокоинтенсивную воздушную ударную волну (ВУВ), которая формирует в зазоре высокотемпературную плазму. По мнению авторов, ее энергия разогревает и оплавляет свариваемые поверхности. При этом сварка происходит при меньшей пластической деформации, и также уменьшаются краевые зоны непроваров.

Обычно при сварке взрывом сварочный зазор заполнен воздухом окружающей атмосферы. При сварке материалов, образующих интерметаллидные соединения, сварочный зазор предложено заполнять гелием [20, 21] или аргоном [2, 22], что приводит к улучшению качества соединения за счёт исключения их возгорания в сварочном зазоре. В работе [2] отмечается, что аргон имеет более низкую теплопроводность, чем воздух, и это оказывает влияние на глубину проплавления. Создание вакуума также положительно сказывается на качестве сварки [23], снижая количество интерметаллидов. Однако создание вакуума в сварочном зазоре при сварке взрывом плоских крупногабаритных изделий практически невозможно.

Действительно, опыт производства биметалла сваркой взрывом показал, что газ, находящийся в сварочном зазоре, оказывает решающее влияние на процесс образования соединения. В частности, замена воздуха в свароч-

ном зазоре на инертный газ позволила получить качественные соединения стали и меди с титаном крупногабаритных листов и цилиндрических изделий [83, 126 -129].

Существующие теории образования соединения в процессе сварки взрывом не дают однозначного ответа на причины образования указанных выше дефектов при производстве крупногабаритного биметалла. Для уточнения причин возникновения дефектов необходимо теоретически и экспериментально исследовать влияние ударно-сжатого газа в сварочном зазоре на процесс образования соединения слоев в условиях сварки взрывом крупногабаритных листов.

1.5 Выводы по главе

1. Крупногабаритные двухслойные листы используются при изготовлении оборудования в важнейших отраслях машиностроения (атомном, нефтехимическом, судостроительном и др.). Показаны значительные преимущества метода сварки взрывом по универсальности, энергоэффективности, прочности соединения, что предопределило рост производства биметалла этим методом в мире в последние 10 лет.

2. На момент начала исследований (2004 г.) в РФ биметалл методом сварки взрывом в промышленных масштабах практически не производился из-за отсутствия промышленной технологии, обеспечивающей высокое качество крупногабаритных двухслойных листов. Потребность предприятий (70-80 тыс.м² в год) удовлетворялась, в основном, за счет импорта.

3. Установлено, что при производстве биметалла по принятой ООО "Битруб Интернэшнл" (г. Красноармейск, Московской обл.) технологии количество листов с дефектами достигало при изготовлении крупногабаритных листов и плит:

сталь-коррозионностойкая сталь - 25 % от общего числа листов, в основном непривары в начале процесса, краевые непривары и свищи в локальных зонах, участки пониженной прочности в начале процесса имели все листы;

сталь-титан - 51 % от общего числа плит, в основном локальные непривары в зонах, прилегающих к окончанию сварки, непривары с волнистостью, свищами, вырывами и трещинами плакирующего слоя, участки пониженной прочности в начале процесса имели 24% листов.

4. Для решения проблемы производства высококачественного биметалла в промышленных масштабах необходимо провести комплекс экспериментально-теоретических исследований процесса сварки взрывом стали со сталью и титана со сталью на крупногабаритных листах. Это позволит разработать научные и технологические основы промышленного производства крупногабаритного биметалла, позволяющие обеспечить 100% сплошность соединения слоев, включая начальную и краевые зоны, исключить образование локальных дефектов сплошности (вырывы, свищи и т.п.), обеспечить прочность соединения в соответствии с требованиями нормативно-технической документации, структуру со стабильным волнообразованием и минимальным количеством литых включений.

2. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса образования соединения при сварке взрывом крупногабаритных листов

2.1 Экспериментальное исследование процессов, происходящих в сварочном зазоре при его заполнении различными газами при сварке взрывом крупногабаритных листов

Для экспериментального подтверждения наличия или отсутствия кумулятивного потока при сварке взрывом крупногабаритных листов с использованием ВВ со скоростью детонации 2000-2500 м/с был разработан метод ловушек [46, 74, 83, 130 - 132], который позволяет улавливать частицы, вылетающие из сварочного зазора в процессе сварки взрывом, не нарушая технологию производства биметалла, и изменять атмосферу в сварочном зазоре.

Сущность метода заключается в следующем (рисунок 2.1). Пластины (плакирующий слой – титан, основной слой - сталь) располагали с зазором на опоре из песка. С торца, противоположного началу процесса, устанавливали ловушку, состоящую из двух предварительно зачищенных листов стали и собранных под углом с первоначальным зазором, равным сварочному (δ). На верхней пластине устанавливали заряд ВВ заданным слоем и электродетонатор для инициирования заряда. Сварку проводили на режимах $D = 2500$ м/с, $r = 1,3$, $\delta = 8$ мм, применяемых при промышленном производстве биметалла [130]. Ловушку от прямого действия продуктов детонации защищали слоем песка. Использование протяженной ловушки позволяет не только ловить вылетающие из зазора частицы, но и проследить их динамику осаждения на поверхность пластин ловушки [83, 130].

При подготовке свариваемых поверхностей пластины зачищали абразивным кругом, обеспечивая шероховатость поверхности для сталей 5-20 мкм, для титана 20-80 мкм, затем обезжировали ацетоном.

В результате серии экспериментов были получены следующие биметаллические пары: 09Г2С + Тр321; 12ХМ + Тр321; 09Г2С + ВТ1-0; 12ХМ + Тр410S; 09Г2С + Тр410S [83, 130]. В случае сварки с титаном проводили два варианта экспериментов, в одном варианте в сварочном зазоре находился

воздух из атмосферы, во втором варианте сварочный зазор заполняли аргоном.

Предполагалось, что при соударении в режиме сварки взрывом в сварочном зазоре впереди точки контакта образуется ударно-сжатый газ, насыщенный мелкодисперсными частицами, которые снимаются с поверхности соударяющихся материалов. После взрыва проводили визуальный осмотр листов и пластин ловушек, ультразвуковой контроль сплошности соединения. Образцы для исследований отбирали по всей длине из средней части пластин ловушек по ширине. На пластинах ловушки после взрыва измеряли величину напыленного слоя, фиксировали его конфигурацию, затем вырезали образцы, на которых методами оптической и электронной микроскопии, рентгеноспектрального анализа и методом микротвердости определяли состав и структуру продуктов на поверхности ловушек, а также структуру соединения листов [83, 131].

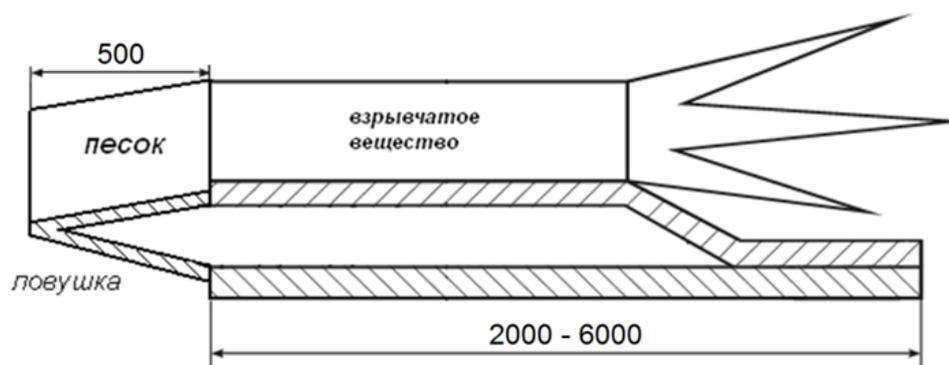


Рисунок 2.1 – Сварка металлов взрывом с применением метода ловушек.

По опубликованным экспериментальным данным авторов [36, 77] и гидродинамической теории кумуляции [133] оценили ожидаемую толщину покрытия h_{Π} на одной из пластин «ловушек» из условия, что материал, снимаемый кумулятивным процессом с поверхности свариваемых пластин, осаждается на поверхность «ловушки», боковой разлёт не учитывался (таблица 2.1).

$$h_{\Pi} = \frac{h_{\text{сним}} S_{\text{лист}}}{S_{\text{лов}}}, \quad (2.1)$$

где $h_{\text{сним}}$ – толщина металла снимаемая с поверхности свариваемого листа, мкм; $S_{\text{лист}}$ – площадь листа, мм²; $S_{\text{лов}}$ = площадь ловушки, мм²

При равенстве ширины листа и ловушки отношение примет вид:

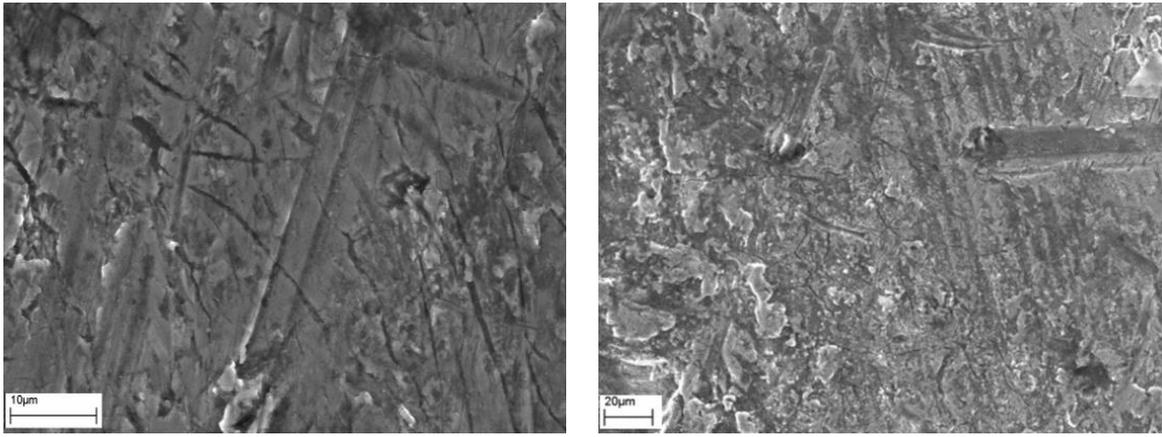
$$h_{\text{п}} = \frac{h_{\text{сним}} L_{\text{лист}}}{l_{\text{лов}}}, \quad (2.2)$$

где $L_{\text{лист}}$ – площадь листа, мм; $l_{\text{лов}}$ – площадь ловушки, мм.

Таблица 2.1 – Расчётная и экспериментальная толщина слоя покрытия на поверхности одной из пластин ловушек [46, 131].

Свариваемый материал (атмосфера)	Размер образца, мм	Размер ловушки, мм	Расчетные данные			Эксперимент, мкм
			[36]	[77]	[133]	
Сталь+сталь (воздух)	500x1200	250x500	48	528	192	Покрытие отсутствует
Сталь+титан (воздух)	500x1200	250x500	48	528	192	20....80
Сталь+сталь (воздух)	1400x5900	250x1400	236	2600	944	Покрытие отсутствует
Сталь+титан (аргон)	2700x2700	250x2700	112	1232	448	Покрытие отсутствует

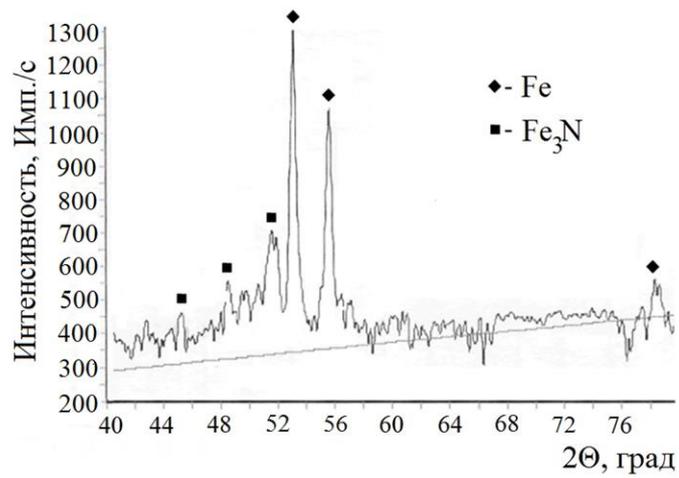
Расчёты показали, что при сварке взрывом крупногабаритных образцов и листов промышленных размеров толщина покрытия на ловушках должна составлять 24 - 708 мкм. Однако в случае сварки крупногабаритных образцов и листов из стали со сталью на воздухе, а также листов стали с титаном в аргоне визуальные исследования не выявили на поверхности ловушек наличия частиц, вылетающих из сварочного зазора [131, 132]. При металлографическом исследовании наблюдаются только следы исходной механической обработки (рисунок 2.2, а). Химический анализ также не выявил наличия поверхностного слоя с составом, отличным от состава металла ловушки [131]. Рентгенофазовым анализом на поверхности ловушек зафиксированы соединения железа с азотом Fe₃N и железо (рисунок 2.3 а).



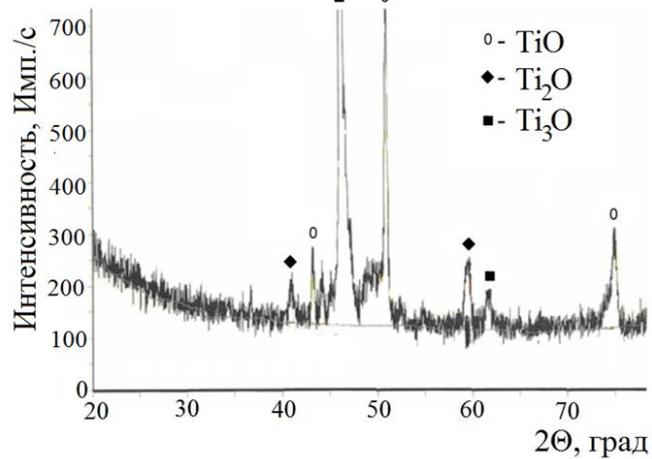
а

б

Рисунок 2.2 – Следы исходной механической обработки на поверхности ловушки после сварки стали со сталью на воздухе (а), стали с титаном в аргоне (б) [131].



а



б

Рисунок 2.3 – Рентгенограмма поверхности ловушки после сварки стали с титаном в среде аргона (а) после сварки стали с титаном в среде на воздухе (б) [131].

После сварки взрывом стали с титаном на воздухе на поверхности обеих пластин ловушки выявили наличие сплошного матового пористого покрытия с сеткой микротрещин (рисунок 2.4 а, б). Толщина покрытия неравномерна и составляет 20–80 мкм [134]. Граница раздела между покрытием и материалом ловушки чёткая, структура пористая. Материал покрытия имеет микротвёрдость 5000–7000 МПа при микротвёрдости титана – 1800 МПа, стали – 1200 МПа. Химический и рентгеновский анализ состава покрытия показал [69, 134], что оно состоит из различных оксидов титана TiO , Ti_3O , Ti_2O (рисунок 2.3 б).

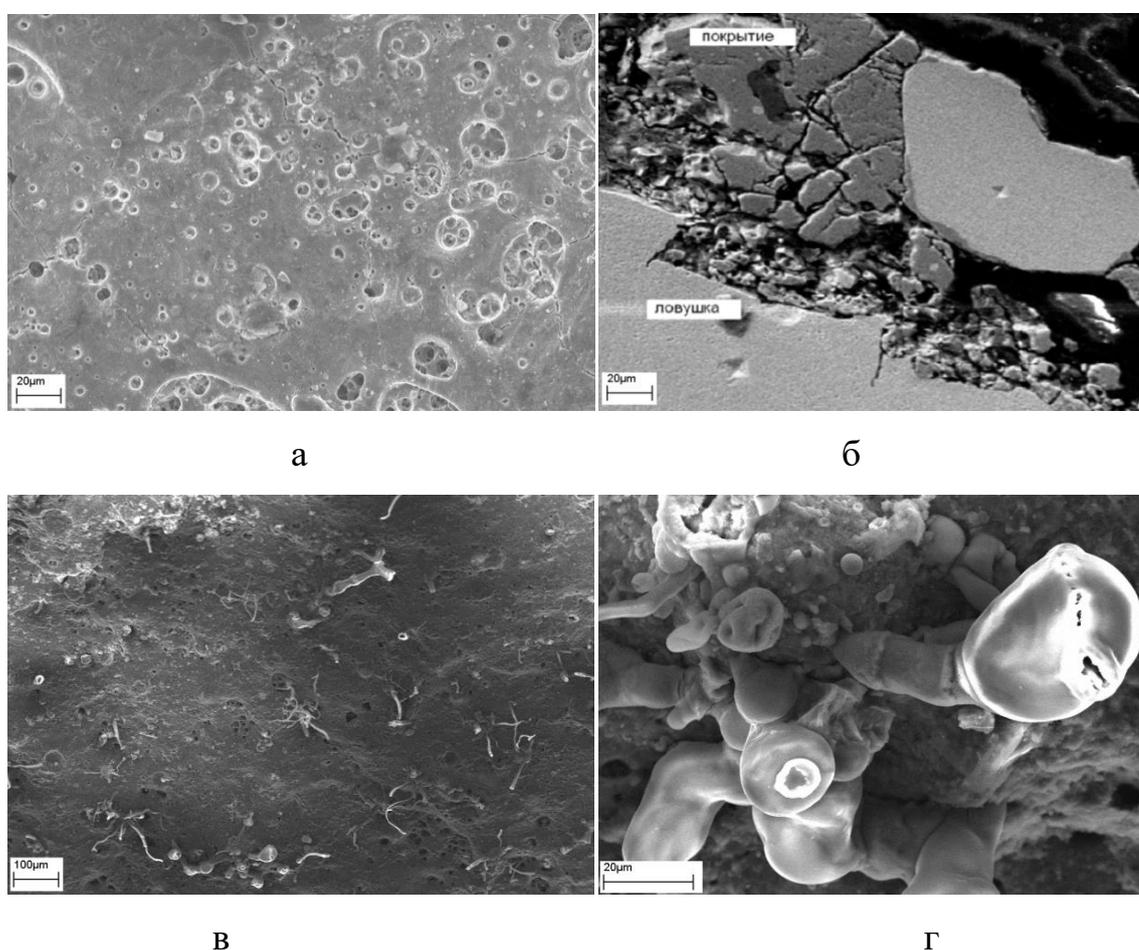
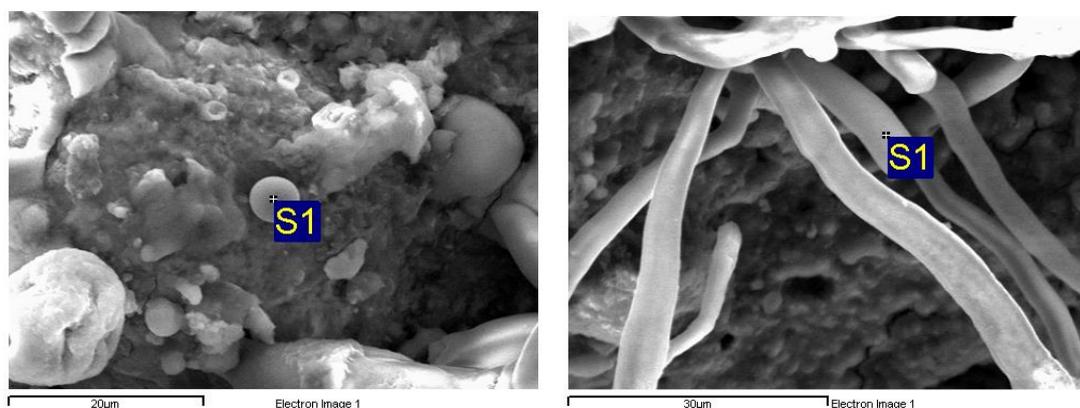


Рисунок 2.4 – Характерные структуры, наблюдаемые в ловушках после сварки взрывом в атмосфере воздуха образцов сталь+титан: поверхность ловушек (а), поперечный шлиф ловушки (б), волокна из оксидов железа (в, г) [69].

На поверхности покрытия наблюдаются отдельные включения в виде глобул, состоящих из оксидов титана (рисунок 2.5 а) и застывших струек из

оксидов железа (рисунки 2.4 в, г и 2.5 б). Форма включений свидетельствует о наличии отдельных расплавленных частиц железа в сварочном зазоре в процессе сварки (подобно разлету капли при ударе о поверхность).



Spectrum	O	Si	Ti	Fe	Total
S1	75.36	0.21	23.74	0.69	100.00

Spectrum	C	O	Si	Ti	Fe	Total
S1	12.07	60.72	0.80	1.81	24.60	100.00

а

б

Рисунок 2.5 – Характерный микроанализ глобул (а) и волокон (б) на поверхности ловушки после сварки взрывом в атмосфере воздуха биметалла сталь+титан.

Фаз чистого железа и титана, их твердых растворов и соединений в структуре покрытия не выявлено. Следует отметить, что нами не установлена роль азота в процессе горения частиц титана и железа в сварочном зазоре: соединения азота в ловушках не выявлены. Однако на поверхности покрытия ловушки и в соединении в литых включениях наблюдаются округлые поры. Это может быть связано с тем, что в условиях высоких температур и давлений азот растворился в металле. При спаде давления за точкой контакта и кристаллизации литых включений, когда снижается растворимость азота, происходит его выделение с появлением на поверхности покрытия округлых пор. Замена в сварочном зазоре активного газа инертным газом исключает прямое горение дисперсных частиц, что снижает их температуру и возможность инициирования горения за счёт газов, растворённых в частице [134].

Эти результаты подтверждают выводы, сделанные в работе [22], о возможном горении титана в сварочном зазоре при сварке взрывом.

Исследование механических свойств полученного сварного соединения показало, что с удалением от точки инициирования заряда ВВ прочность биметалла на отрыв падает с 300 до 1 МПа, растут амплитуда волн и количество оплавленных участков в зоне соединения. Кроме того, имеются хаотично расположенные непривары, имеющие вид вздутий, а также повреждения плакирующего слоя в виде разрывов и свищей [134]. В микроструктуре сварного шва фиксируются прослойки интерметаллида.

Сравнение результатов по сварке листов стали с титаном на воздухе и в аргоне показало, что исключение процесса горения в сварочном зазоре за счет использования инертного газа, предсказанное в работе [22], приводит к отсутствию покрытия на поверхности ловушек.

Эксперименты, проведенные в работах [46, 69, 83, 130 - 132], показали, что не выявлен устойчивый кумулятивный процесс при сварке взрывом крупногабаритных листов титана со сталью, при заполнении сварочного зазора аргоном и стали со сталью на воздухе на режимах ($D = 2000-2500$ м/с), на что указывает отсутствие покрытия на поверхности ловушек. Экспериментально по наличию на поверхности ловушек слоя окислов титана толщиной 20-80 мкм показано, что в сварочном зазоре при сварке взрывом титана со сталью при заполнении его активным газом идут процессы горения, в первую очередь микронеровностей.

Следует отметить важный момент, что сам факт соударения не подразумевает под собой сварку (образование соединения), если соударение происходит по не подготовленным к сварке поверхностям. Этот факт является причиной непровара в начальной зоне. Поэтому **в рассматриваемой точке** к моменту соударения (образованию физического контакта) необходимо обеспечить очистку поверхности от поверхностных плёнок и её активацию.

Возникает вопрос: как происходит очистка и активация свариваемых поверхностей от загрязнений и оксидных пленок в условиях отсутствия ус-

тойчивого кумулятивного процесса? Для ответа на этот вопрос исследовали процессы, происходящие впереди точки контакта в сварочном зазоре.

2.2 Теоретическое исследование процессов, идущих впереди точки контакта в сварочном зазоре при сварке взрывом крупногабаритных листов

Рассмотрим процесс сварки взрывом с учетом роли ударно сжатого газа в реализации механизмов образования соединения [118, 119]. При сварке взрывом биметаллов основная и метаемая пластины располагаются с определенным сварочным зазором δ (рисунок 2.6).

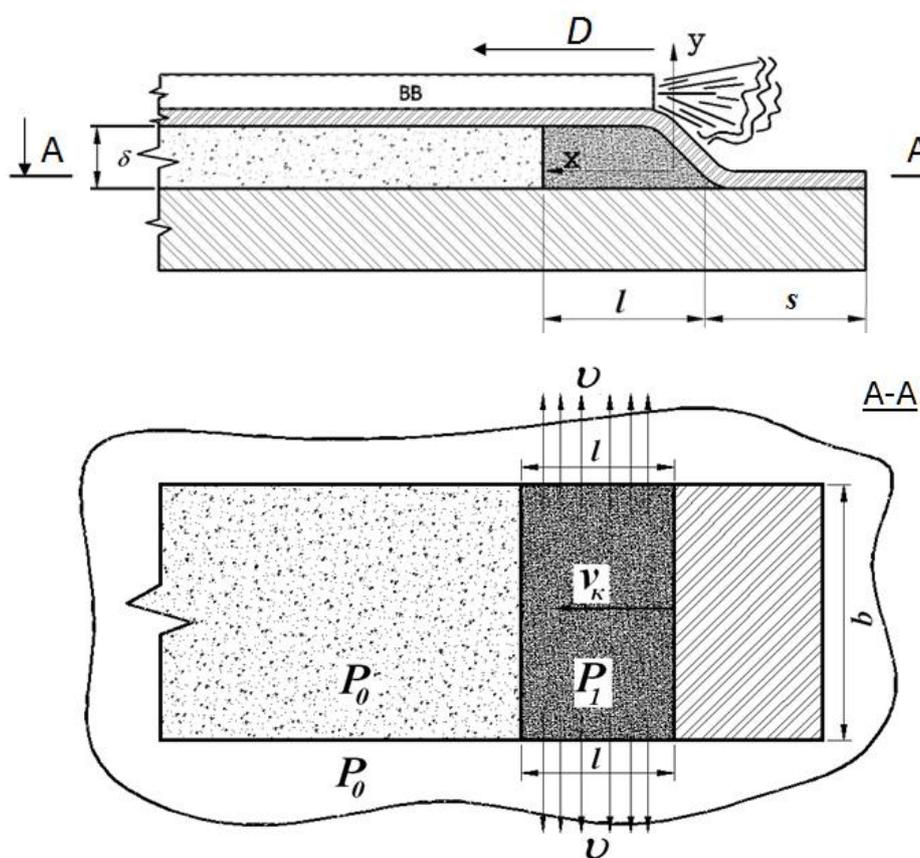


Рисунок 2.6 – Схема расчета области ударно-сжатого газа [135]. P_1 и P_0 – абсолютные давления в области ударно-сжатого газа и окружающей атмосферы, V_k – скорость точки контакта, v – скорость истечения газа, l – протяженность зоны ударно-сжатого газа, s – расстояние от начала сварки до точки контакта.

Под действием продуктов детонации заряда ВВ метаемая пластина соударяется с основным под углом, при этом газ, находящийся в сварочном зазоре, сжимается и вытесняется из сварочного зазора. После столкновения пластин в газ со скоростью, превышающей звуковую в несколько раз, движется «поршень», роль которого выполняет точка контакта. Газ перед поршнем сжимается, при этом возрастает его плотность и давление. Точка контакта движется вдоль свариваемых листов, образуя перед собой область ударно-сжатого газа (УСГ), который нагревает поверхность металла еще до соударения пластин, что оказывает существенное влияние на качество соединения [135].

При рассмотрении взрывных процессов в литературе большое внимание уделено возникновению и распространению ударных волн. Однако при решении таких задач условия формулируются таким образом, что поршень вдвигается в ограниченное пространство (некую трубу), исключая потерю массы газа за пределы площади поршня. Применимость данных схем для расчета параметров УСГ к конкретным случаям сварки взрывом требует некоторых уточнений.

Линия контакта имеет конечную длину и создает область ударно-сжатого газа только в пределах своей длины и величины зазора. Учитывая, что область ударно-сжатого газа при этом, граничит с невозмущенным воздухом, неизбежна утечка газа за пределы «поршня» в окружающее пространство. Градиент давления, образующийся между сжатым и невозмущенным газом «сбоку» от «поршня», направленный вдоль линии контакта, разгоняет газ до некоторой скорости, которая является, в данном случае, скоростью истечения v (см. рис.2.6) [135, 136].

Как показано в работе [136], в соответствии с законом сохранения массы область ударно-сжатого газа перестанет увеличиваться, когда масса дополнительного «захваченного» за единицу времени фронтом ударной волны воздуха $m_{зм}$ и масса истекающего воздуха $m_{мр}$ будут равны, т.е. при устано-

вившемся течении величина «захвата массы» и массового расхода в единицу времени t при некоей максимальной величине l будет одна и та же:

$$\frac{dm_{зм}}{dt} = \frac{dm_{мп}}{dt} = const, \quad (2.3)$$

где $m_{мп}$ - масса истекающего «расходуемого» воздуха (кг), $m_{зм}$ - масса дополнительного «захваченного» фронтом ударной волны воздуха (кг) в единицу времени t .

В итоге рассматривается совокупность двух задач: задача о вдвигаемом «поршне» (определение параметров за ударной волной (УВ)) и задача о скорости истечения газа из объема, которые решаются совместно.

При определении параметров ударно-сжатого газа задача о вдвигаемом поршне трансформируется в задачу сверхзвукового обтекания тела, формой напоминающего камертон с постоянно укорачивающимися концами (см. рис.2.6), относящуюся к задачам аэродинамики.

На рисунке 2.7 приведены иллюстрации процесса сверхзвукового обтекания тел, на которых видна головная волна, располагающаяся на небольшом расстоянии к плоской поверхности, которое зависит от скорости движения и показателя адиабаты обтекающего газа. Рассмотрим решение этой задачи для тела, имеющего форму камертона (напоминающую схему сварки взрывом), и движущегося со сверхзвуковой скоростью (рисунок 2.8).

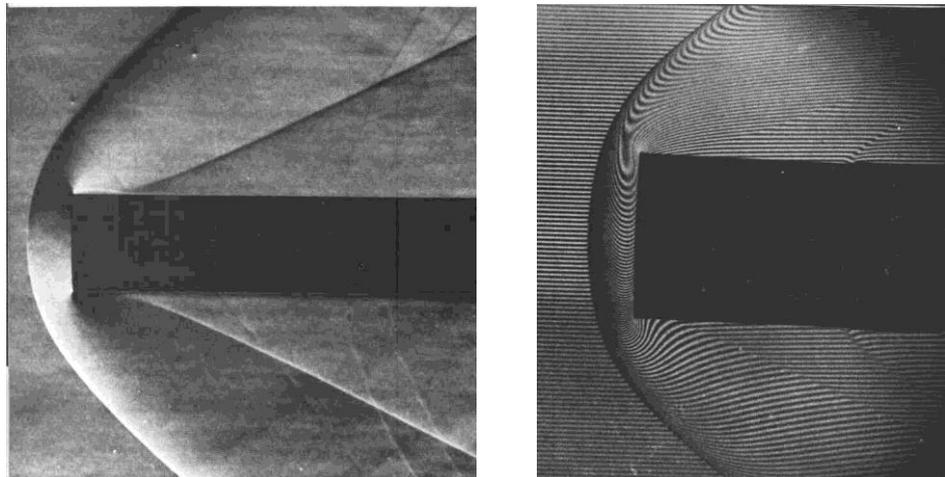


Рисунок 2.7 – Обтекание тел с плоской передней частью.

(Фото из Air Flow Branch, U. S. Army Ballistic Research Laboratory)

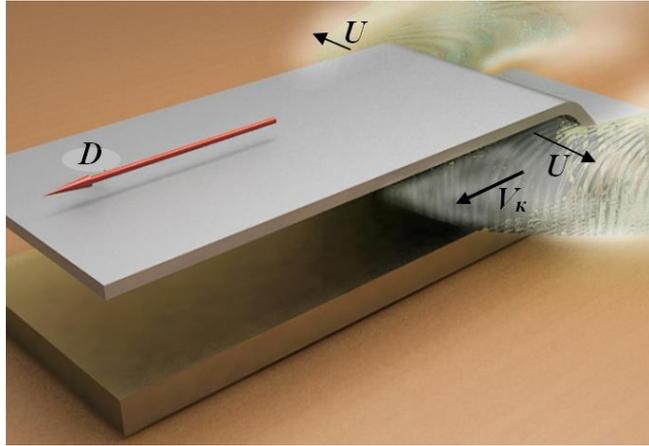


Рисунок 2.8 – Общий вид схемы расчета области ударно-сжатого газа.

Определение скорости истечения, расхода газа, а также установление условий, существенно влияющих на процесс его истечения, является основной задачей термодинамического анализа применительно к газовому потоку. В системе отсчета, связанной с точкой контакта, можно не учитывать сверхзвуковую скорость области ударно-сжатого газа и рассматривать ее как покоящуюся. Тогда атмосферный воздух будет двигаться навстречу линии контакта со скоростью V_k . Данная расстановка систем координат и условий относительности движения позволит пользоваться каноническими формулами для расхода газа [136].

При адиабатном установившемся течении газа теоретический массовый расход газа за единицу времени m_{mp} и теоретическую скорость его истечения v_{kp} , можно выразить из выражений, приведенных в [137] для критического течения газа:

$$m_{mp} = f \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1} P_1 \rho_1 \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{2}{\gamma-1}}}, \quad (2.4)$$

$$v_{kp} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1} RT_{kp}}, \quad (2.5)$$

где: f – площадь выходного сечения (m^2), γ – показатель адиабаты для вытекающего газа, P_1 , ρ_1 , T_{kp} – давление (Па), плотность ($кг/м^3$), температура между пластинами в области ударно-сжатого газа (К), R — газовая постоянная ($Дж/(моль \cdot К)$).

С расходом газа происходит уменьшение его давления и температуры, следовательно, функции массы и скорости истечения должны быть интегральными. Однако, при соблюдении условия (2.3) при истечении газа за пределы области пластин не происходит падения давления, а потеря массы компенсируется уменьшением области ударно-сжатого газа, т.е. параметром f , и восстановлением давления [136].

Хотелось бы отметить, что в рассуждениях использованы формулы для стационарного течения, как общепринятой точки зрения. Хотя некоторые исследователи [138] утверждают, что при больших числах Маха и небольшом показателе адиабаты может осуществляться нестационарный режим сверхзвукового обтекания тел, характеризующийся крупномасштабными вихрями в ударно-сжатой области перед телом, искривлением профиля ударной волны и осцилляцией всех параметров течения.

Для определения геометрических характеристик области ударно-сжатого газа в [46, 135] проведено совместное решение двух вышеописанных задач.

Пусть за время Δt точка контакта прошла расстояние Δx со скоростью $V_k = \Delta x / \Delta t$. В объеме ударно-сжатой области при этом происходит увеличение массы из-за притока в этот объем дополнительной массы газа. Найдем приток дополнительной «захваченной» массы m_{zm} за Δt секунд:

$$\Delta m_{zm} = \rho_0 b \delta V_k \Delta t, \quad (2.6)$$

где: ρ_0 – плотность притекающего газа; b – длина линии контакта (ширина листов) (см. рисунок – 1); δ – величина сварочного зазора.

Увеличение массы приведет к расширению области ударно-сжатого газа, а значит и величины l . При этом, одновременно с захватом начнется процесс истечения газа, и массовый расход определится из формулы:

$$\Delta m_{mp} = 2l \delta \Delta t \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1} P_1 \rho_1 \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{2}{\gamma-1}}}. \quad (2.7)$$

Постепенное увеличение величины l неизбежно будет приводить к увеличению m_{mp} и при установившемся течении величина «захвата массы» и массового расхода в единицу времени при некоей максимальной величине l_{max} будет одна и та же: $\Delta m_{зм} = \Delta m_{mp} = \text{const}$ [135]. Приравняв выражения (2.6) и (2.7) и решая это уравнение относительно l_{max} , получим:

$$2l_{max} = \rho_0 b V_k \sqrt{\frac{(\gamma+1)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}{\gamma P_1 \rho_1 2^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}}. \quad (2.8)$$

Нужно отметить, что в левой части выражения стоит удвоенная длина, а не просто l_{max} потому, что именно функция $2l_{max}$ является функцией площади выходного сечения f . Данная формула ограничена параллельной схемой сварки. При отклонении от параллельности необходимо вводить в формулу функции площадей захвата и истечения. Эти функции составляются индивидуально для каждого конкретного случая.

Формула (2.8) позволяет рассчитать лишь максимальную протяженность области ударно-сжатого газа. Но для практического применения необходимо знать, как и когда она достигает определенного значения. Проследим динамику роста области ударно-сжатого газа. В классической теории сварки взрывом берут скорость движения фронта УВ примерно в 1.2 – 1.4 раза выше скорости точки контакта. Мы видим, что в начальный момент это так и есть. Но с момента отрыва УВ от линии контакта и появлении величины l , отличной от нуля, в связи с увеличивающимся расходом газа с увеличением l эта скорость начинает падать, пока не становится равной скорости точки контакта. То есть, эта ударная волна является головной при обтекании тела. В отсутствии утечки газа зависимость l от s носила бы прямолинейный характер, но так как с увеличением l массовый расход увеличивается, меняется и характер зависимости $l = f(s)$ [135].

Объем ударно-сжатого газа за определенный момент времени равен:

$$V = b \delta l. \quad (2.9)$$

Также его можно выразить через массу и плотность газа. Начиная с момента времени $t=0$, он равен:

$$V = t \frac{(m_{3M} - m_{MP})}{\rho_1}. \quad (2.10)$$

Решая уравнение (2.10) относительно l , с учетом (2.9) получим:

$$l = \frac{t(m_{3M} - m_{MP})}{\rho_1 b \delta}. \quad (2.11)$$

Подставив в (2.11) значения масс из (2.6) и (2.7), получим формулу, которая представляет собой зависимость $l = f(t)$:

$$l = \frac{t \rho_0 V_k b}{\rho_1 b + 2t \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1} P_1 \rho_1 \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{2}{\gamma-1}}}}. \quad (2.12)$$

Представив время как $t = s/V_k$, получим зависимость $l = f(s)$ в виде:

$$l = \frac{s \rho_0 b}{\rho_1 b + 2 \frac{s}{v_k} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1} P_1 \rho_1 \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{2}{\gamma-1}}}}, \quad (2.14)$$

где ρ_0 – плотность притекающего газа (кг/м³); b – длина линии контакта (м), s – расстояние от начала процесса до точки контакта.

По формуле (2.14) можно найти размер области ударно-сжатого газа на любой длине от точки инициирования в зависимости от параметров сварки и геометрических характеристик свариваемых листов. Видно, что размер области ударно-сжатого газа сильно зависит от длины линии контакта (ширины листа) и крайне слабо от скорости детонации [135].

На рисунке 2.9 приведен результат расчета протяжённости области УСГ (l) для сварки взрывом металлических листов со следующими начальными параметрами:

- Длина листа $L = 13$ м.
- Ширина листа $b = 0.5 - 4$ м.
- Сварочный зазор $\delta = 8$ мм (в расчетах не участвует).
- Скорость детонации, равная скорости точки контакта – 2200 м/с.
- Температура окружающей среды (воздух) – 273 К.

- Атмосферное давление – 101325 Па (1 атмосфера).

Анализ результатов расчетов показывает, что на длине до 1 метра длина l практически одинакова для любой ширины листа. Для листов шириной менее 1 м длина l на расстоянии 2 м от начала процесса становится практически постоянной, следовательно, условия сварки не будут изменяться при любой длине листа. По сравнению с листом шириной 0,5 м длина l возрастает: при ширине листа 1,5 метра на расстоянии 3 м - в 2 раза, а при ширине листа 4 м - в 3 раза. Таким образом, длина области УСГ на крупногабаритных листах сильно зависит от их ширины, что связано с затруднением истечения газа в боковые стороны. Такую закономерность стабилизации размеров области ударно-сжатого газа можно назвать масштабным эффектом [88, 135].

Определим параметры газа в области УСГ: давление P_1 , температуру T_1 и плотность ρ_1 . (таблица 2.2).

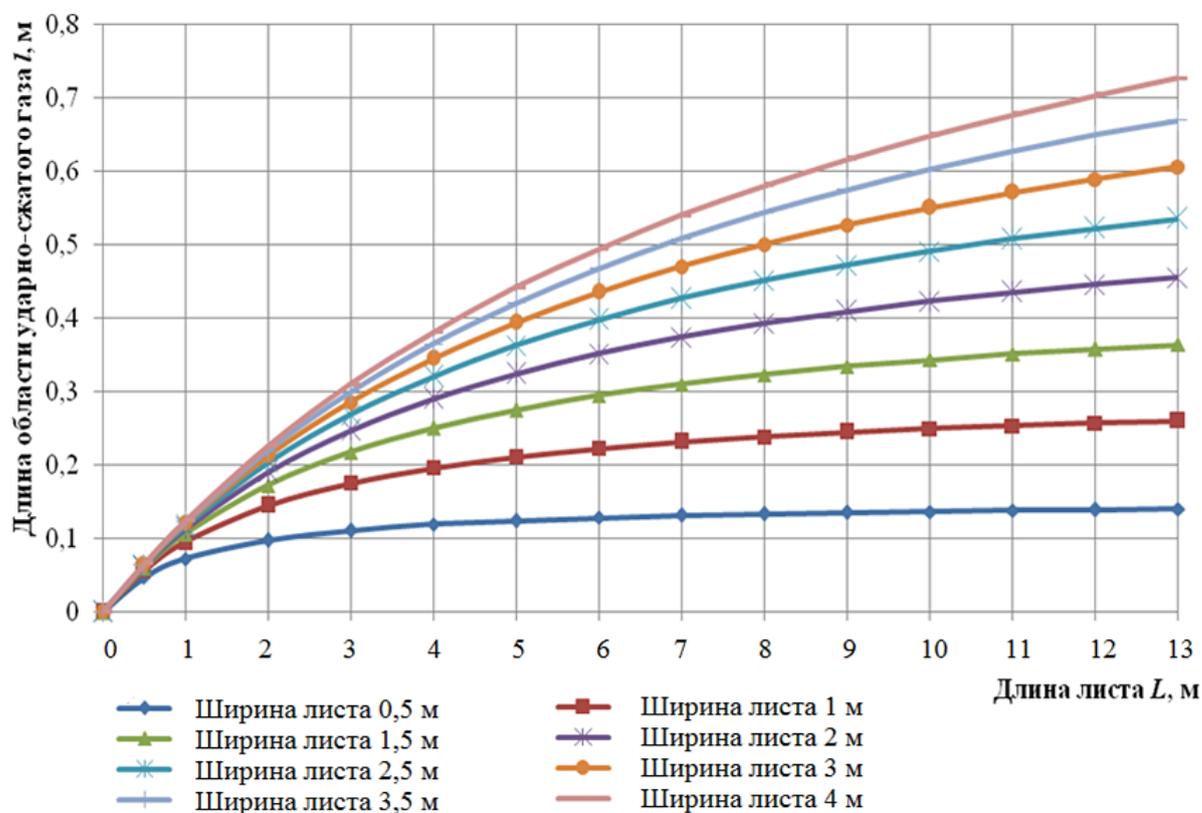


Рисунок 2.9 – Зависимость длины области ударно-сжатого газа от длины листа в **среде воздуха** при скорости точки контакта $V_k = 2200$ м/с и различной ширине листа (расчётная температура T_l , 2152 К) [1, 88].

Уравнения, связывающие между собой параметры газа по обе стороны разрыва и представляющие собой систему алгебраических уравнений, связывающих между собой термодинамические свойства газа перед разрывом и после, рассмотрены во многих источниках и имеют решения относительно различных величин. В работе [135] использованы уравнения ударной адиабаты, приведенные в [139] для температур за фронтом ударной волны, когда происходит возбуждение молекулярных колебаний:

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{6 - V_1/V_0}{8V_1/V_0 - 1}, \quad \frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{V_1}{V_0} = \frac{P_1/P_0 + 6}{8P_1/P_0 + 1}, \quad \frac{T_1}{T_0} = \frac{PV_1}{P_0V_0}, \quad (2.15)$$

где P_1 и P_0 – абсолютные давления в области ударно-сжатого газа и окружающей атмосферы, Па; V_1 и V_0 – объемы газа до и после сжатия; ρ_1 и ρ_0 – плотности газа за и перед разрывом.

Или, если выражать амплитуду ударной волны через число Маха, взяв за основу выражение $\frac{7}{8} M^2 = \frac{P_1/P_0 - 1}{1 - V_1/V_0}$, что удобнее для расчетов [135]:

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{6}{1 + 5M^{-2}}, \quad (2.16)$$

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{7}{6} M^2 - \frac{1}{6}, \quad (2.17)$$

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{1}{36} (7 - M^{-2})(M^2 + 5), \quad (2.18)$$

где ρ_1 и ρ_0 – плотности газа за и перед разрывом;

M – число Маха; $M = V_k/c$; V_k – скорость движения точки контакта; c – скорость звука в газе.

Полученные расчетные данные о наличии протяженной области УСГ перед точкой контакта подтверждаются экспериментальными результатами, полученными авторами [118]. Скоростной съемкой был зафиксирован процесс сварки взрывом, по которому отчетливо видно, что поршень из ударно-сжатого газа, нагретого до высоких температур, наблюдается впереди точки контакта в зазоре (gap) (рисунок 2.10), значительно опережая процесс детонации ВВ.

Таблица 2.2 – Расчетные параметры ударно-сжатого газа.

Газ в сварочном зазоре	Удельная теплоёмкость газа c_p Дж/(кг К)	Плотность газа, кг/м ³			Температура, К			
		Исходное состояние	УСГ		Пограничный слой			
Скорость точки контакта V_k			2200	2500	3000	2200	2500	3000
Число Маха			6,7	7,6	9,1	6,7	7,6	9,1
Азот	1051	1,2505	6,7511	6,9053	7,0758	5134	6540	9276
Аргон	523	1,7839	9,6307	9,8507	10,0940	7458	9542	13598
Воздух	1005	1,2928	6,9794	7,1388	7,3152	5239	6676	9472
Гелий	5296	0,1785	0,9635	0,9857	1,0100	3288	4157	5844
Кислород	913	1,42895	7,7145	7,8907	8,0856	5481	6990	9923
Давление в газе, МПа		0,101325	5,290	6,811	9,77			
Температура газа, К		293	2831	3567	4994			

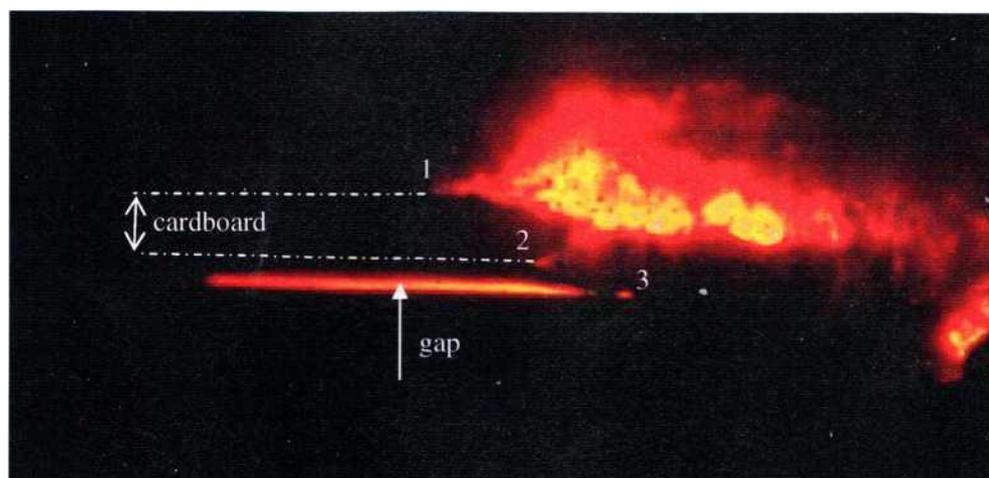


Рисунок 2.10 – Съемка процесса плакирования 1 и 2 верх и низ опалубки (cardboard), 3- сварочный зазор (gap) [из презентации доклада Role of Gas During Explosive Cladding / I. M. Richardson, E. P. Carton, Y. van der Drift, H. van der Linde // Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations, Lisse, Netherlands. – 2008].

Расчеты области УСГ (с учетом истечения газа в боковые стороны) позволяют оценить протяженность области УСГ и, тем самым, определить время его воздействия на свариваемые поверхности перед точкой контакта.

Выше речь шла о системах уравнений, которые с той или иной степенью идеализации позволяют рассчитать параметры области УСГ, но при расчетах не затрагивался вопрос о граничных условиях, которые возникают на поверхности свариваемых листов. Эти граничные условия на поверхности металла (как для скоростей, так и для температур) должны формально выражать характер взаимодействий УСГ с поверхностями листов. Эти поверхности (стенки) формируют общую структуру потока [135]. В работе [140] показано, что в условиях сверхзвукового течения газа в канале воздействие стенок не ограничивается созданием макроструктуры потока. Они организуют вблизи себя свою собственную динамическую структуру – «газовый пограничный слой», в пределах которого происходит согласование комплекса параметров, характеризующих поверхность листов с соответствующими параметрами основного потока (рисунок 2.11).

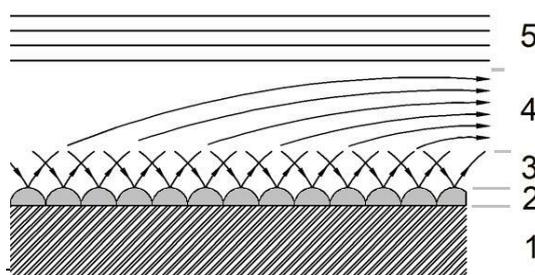


Рисунок 2.11 – Взаимодействие потока ударно-сжатого газа с поверхностями свариваемых листов [140]. Характерные слои гидродинамической пристеночной области: 1 – твёрдое тело; 2 – наружный "атомарный" слой металла; 3 – Кнудсеновский подслой; 4 – вязкостный пограничный слой, 5 – ядро потока.

Свойства этого «тонкого» слоя радикально отличаются от свойств основного потока УСГ [135]. При описанной выше схеме обтекания УСГ свариваемых листов пограничный слой не подчиняется гидродинамике Навье-Стокса, и, следовательно, не может быть рассчитан по уравнениям Прандтля-Блазиуса. И связано это не только с тем, что уравнение Навье-Стокса не описывает того, что происходит непосредственно вблизи твердого тела, но и с особенностью течения.

При сварке взрывом реализуется механизм течения, связанный, с одной стороны, с наличием толкающего поршня, а с другой, с функцией сжатия воздуха в зазоре и наличием второй границы – невозмущенного воздуха, поступающего в область УСГ. Нагрев от ударного сжатия, вычисленный для основных режимов сварки взрывом, дает температуру за фронтом ударной волны в области УСГ порядка 3000К [135, 141].

Высокотемпературный ударно-сжатый газ в сварочном зазоре движется со скоростью точки контакта и обтекает свариваемые поверхности со сверхзвуковой скоростью (6-9 Мах). В результате торможения на границах раздела между УСГ и поверхностью металла образуется газовый пограничный слой, параметры которого отличаются от параметров УСГ (рисунок 2.12).

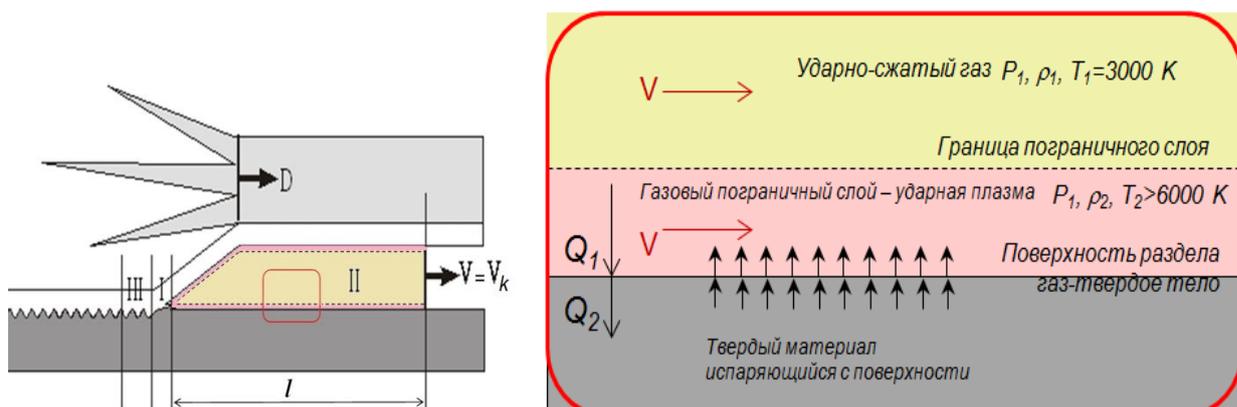


Рисунок 2.12 – Схема взаимодействия УСГ со свариваемыми поверхностями впереди точки контакта: I- зона точки контакта, II - зона УСГ впереди точки контакта, III - зона формирования соединения, D – скорость детонации, V- скорость движения УСГ, Q_1 и Q_2 - теплопередача от газового пограничного слоя к испаряющейся поверхности.

Для оценочного расчета температуры в газовом пограничном слое использовали формулу аэродинамического нагрева твердого тела при его обтекании набегающим газом, имеющим, в нашем случае, температуру порядка 3000 К, по методике [142].

$$T_{\text{погр}} = T_1 + \frac{v^2}{2c_p}, \quad (2.19)$$

$T_{\text{погр}}$ – температура в пограничном слое, близкая к температуре торможения,
 T_1 – температура набегающего воздуха (температура УСГ),
 $v = V_k$ – скорость полета тела (скорость обтекания свариваемых поверхностей УСГ),
 c_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении.

Оценочный расчет, с учетом температуры торможения УСГ (2.19), дает температуру в пограничном слое, в зависимости от скорости детонации и состава газа, порядка 6000 - 10000 К (таблица 2.2). Следует отметить, что толщина пограничного слоя соизмерима с высотой микронеровностей, что приводит к турбулентному течению и, как следствие, дополнительному увеличению его температуры. Этот факт подтверждается измерениями яркостной температуры вблизи точки контакта фотоэлектрическим методом [143, 144], где температура при скорости детонации $D = 4200$ м/с равна 7700 К, а при $D = 5300$ м/с – 10500 К.

Проведенная оценка температуры показала, что температура в газовом пограничном слое соответствует температуре неравновесной ударной плазмы. По данным работы [145] «ударная плазма имеет много общего с обычной разрядной плазмой, но существуют некоторые особенности: отсутствие внешнего электрического поля, высокие температуры ($T=3000-20000$ К) и наличие быстрых хемоионизационных реакций с участием возбужденных атомов и молекул».

При такой температуре в пограничном слое и непосредственно прилегающих к нему поверхностных слоях металла должны происходить процессы ионизации [141]. Так же как и диссоциация, ионизация атомов и молекул начинается при значениях температуры намного меньших, чем требует потенциал ионизации. Причиной этого является то, что статистический вес свободного состояния электрона очень велик [140, 146, 147]. Ионизация начинается тем раньше, чем ниже потенциал ионизации, и по мере повышения температуры её степень возрастает.

Как показывают опыты [140], коэффициент аккомодации при течении воздуха над металлической поверхностью имеет близкие к единице значения.

В работе [131] проведена оценка степени ионизации УСГ между пластинами и в пограничном слое на поверхности пластин, используя формулу Саха для однократной ионизации:

$$\frac{a^2}{1-a^2} = 2 \frac{u_1}{u_0} \frac{1}{\rho N} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{I}{kT}}, \quad (2.20)$$

где a – степень ионизации газа, u_0 и u_1 – статистические суммы нейтрального атома и иона, N – количество атомов в 1г газа, I – потенциал ионизации (эВ), m_e – масса электрона кг, h – постоянная Планка(эВ с), k – постоянная Больцмана (эВ/К), T и ρ – температура УСГ (К) и плотность УСГ (кг/м³).

Расчет показывает, что ионизация самой области УСГ для большинства режимов сварки взрывом крайне мала ($a \sim 10^{-10}$) и не достаточна для оказания существенного влияния на процесс сварки, что справедливо отмечено в работах [148, 149].

В работе [150] для железа, титана и алюминия теоретически оценили возможность разрушения оксидной плёнки и приповерхностных слоёв металла за счёт возникновения температурных напряжений в результате разогрева поверхностей свариваемых пластин ударно-сжатым газом. За основу исследования было взято решение динамической задачи термоупругости о тепловых напряжениях в упругом полупространстве при тепловом ударе на его поверхности, приведённое в трудах [151, 152]. Используя это решение, исследовали пары полупространств, металлов и их оксидов и определили, при какой температуре эквивалентные температурные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ в рассматриваемых материалах превысят предел прочности σ_B . Сделан вывод о возможности очистки от слоя окислов металла при сварке взрывом ударно-сжатым газом, движущимся впереди области образования сварного соединения.

Однако, при взаимодействии атомов УСГ (и, в нашем случае, не только их) с поверхностью твердого тела возможно появление так называемой по-

верхностной ионизации, при которой атом, упавший на поверхность твердого тела, отражается в виде иона [153]. Это явление проявляется тогда, когда работа выхода больше потенциала ионизации атомов, поэтому энергетически более выгодной является эмиссия положительных ионов. Степень ионизации зависит от работы выхода и температуры поверхности металла. При поверхностной ионизации энергия, необходимая для отрыва электрона от атома, берется еще и от нагретой УСГ пластины [131].

Рассматривая термодинамическое равновесие смеси идеальных атомного, ионного и электронного газов у поверхности металла, используя статистическое выражение для константы равновесия и полагая, что равновесная концентрация электронного газа определяется эмиссией термоэлектронов из металла, степень ионизации поверхности можно рассчитать по формуле Саха-Ленгмюра [154]:

$$a = \frac{1-r_+}{1-r_0} \frac{g_+}{g} \exp \frac{\varepsilon}{kT} (\phi - I) , \quad (2.21)$$

где $\frac{g_+}{g}$ - отношение статистических весов ионного и атомного состояния адсорбированного атома, ε – заряд иона (Кл), ϕ – работа выхода (эВ), r_+ и r_0 – коэффициенты отражения для ионов и атомов соответственно.

Расчет степени поверхностной ионизации листов, с единичной аккомодацией по зависимости (2.21), показывает, что для поверхностного (пограничного) слоя степень ионизации близка к единице ($a \sim 1$). Это означает, что любое столкновение молекулы УСГ с металлом вызывает его как минимум однократную ионизацию.

Таким образом, рассматривая процесс воздействия потока УСГ на свариваемые поверхности в условиях их обтекания потоком газа со сверхзвуковой скоростью, необходимо учитывать влияние аэродинамического нагрева и взаимодействие потока УСГ с поверхностями, имеющими микронеровности, соизмеримые с толщиной пограничного слоя на рисунке 2.12.

2.3 Разработка механизма очистки и преактивации свариваемых поверхностей при сварке взрывом с учетом аэродинамики потока ударно-сжатого газа впереди точки контакта

Важнейшим вопросом получения соединения при сварке давлением в твердой фазе является очистка и активация свариваемых поверхностей до их вступления в контакт, т.е. до схватывания. Процессу образования соединения препятствуют окислы и загрязнения, которые всегда присутствуют на технической поверхности металла (рисунок 2.13), особенно при больших габаритах листов, когда практически невозможно удалить поверхностный слой. Профиль технической поверхности характеризуется определенной шероховатостью, которая определяется характеристиками механической обработки поверхности перед сваркой взрывом. Обычно шероховатость составляет 40-80 мкм. Поверхностный слой металла во время механической обработки наклёпывается, пронизан окислами и имеет различного вида дефекты. Свариваемые поверхности покрыты поверхностными пленками, которые состоят из оксидного слоя, слоя адсорбированных газов, слоя молекул воды, слоя или плёнки жировых молекул и пыли. Жировые загрязнения и пыль как правило скапливаются во впадинах микронеровностей. Свойства окисла (твёрдость, температура плавления) существенно отличаются от свойств металла, из которого они образовались. Прочность соединения окисла с металлом зависит от его природы.

Для образования соединения металлических поверхностей при сварке давлением в твёрдой фазе необходимо:

- Удалить со свариваемых поверхностей поверхностные окисные плёнки и загрязнения (жировые, пыль, влагу и т.п.);
- Обнажить и активировать ювенильные (свежеобразованные, свободные от оксидов и других загрязнений) поверхности.

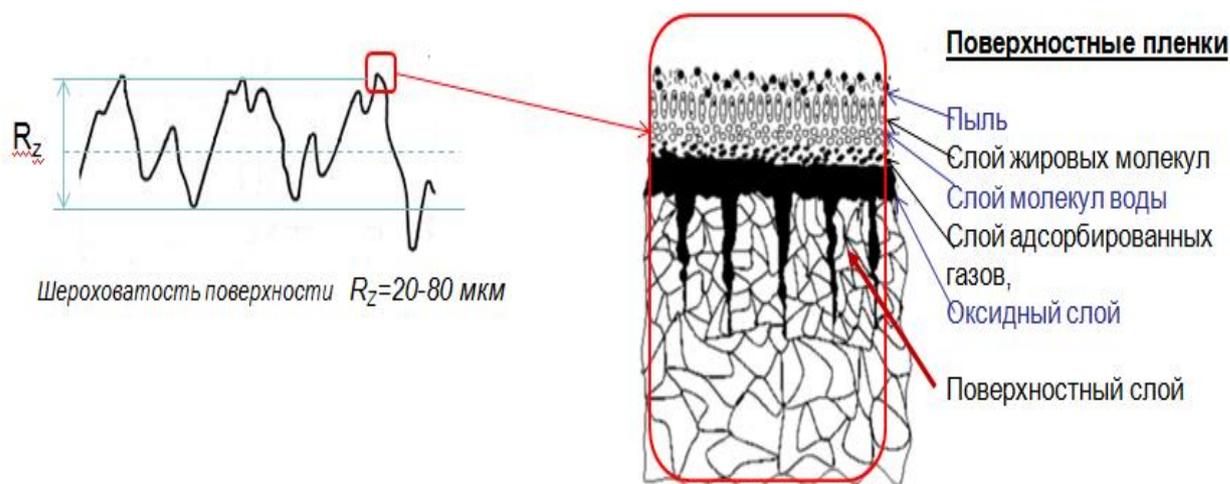


Рисунок 2.13 – Техническая (реальная) поверхность металлических тел <http://www.vevivi.ru/best/Osnovy-teorii-i-tehnologii-kontaktnoi-tochechnoi-svarki-ref148846.html>

При сварке взрывом соединение образуется между поверхностями, находящимися в твёрдом состоянии. Исследованиями тонкой структуры межфазных границ различных пар металлов, проведенном в ВолгГТУ [14, 155] с применением методов просвечивающей микроскопии высокого разрешения (HR-TEM), установлено, что границы раздела между фазами изученных композитов имеют конечную толщину порядка 60 нм. При этом состав материала плавно изменяется от состава, соответствующего одному из компонентов композита, до состава, соответствующего второму компоненту. На контакте межфазных границ выявлена прослойка толщиной до 5-7 нм, имеющая кристаллическое или аморфное строение. Состав и строение граничных фаз зависит от химического состава и от кристаллографической ориентировки фаз, располагающихся по обе стороны от межфазной границы.

Следовательно, соединение (химическая связь) образуется непосредственно между атомами свариваемых материалов, при этом в зоне соединения не выявлено диффузии элементов одного материала в другой.

Рассмотрим процесс образования соединения на основании классической теории сварки давлением в твёрдой фазе, предусматривающей необходимость создания активных центров на свариваемых поверхностях [88, 103,

156, 157]. Эта теория распространяется на сварку давлением в твёрдой фазе любых кристаллических тел. При наличии активных центров на металле время их непосредственного химического взаимодействия (образования связи) мало или практического значения не имеет. Если атомы уже сближены до расстояния, равного периоду решётки, то образование связей между ними произойдёт мгновенно и с выделением энергии. Образование активных центров обусловлено разрывом хотя бы части связей поверхностных атомов с их соседями, нарушающими стабильные электронные конфигурации этих атомов [158].

При сварке давлением разрушение связей (активация) возможно [84]:

а) механически - при удалении с поверхности части самого металла (обнажение так называемых чистых ювенильных поверхностей) или химически связанного с ним инородного вещества (например, оксидов); при движении дислокаций, сопровождающих пластическую деформацию;

б) термически - при нагреве, сопровождаемом заметной диффузией и самодиффузией, движением вакансий и другими процессами, изменяющими положение атомов в кристаллической решётке;

в) бомбардировкой поверхности ионами или быстро движущимися частицами с достаточно высокой энергией.

Следует отметить, что если прекращают действовать условия, необходимые для поддержания активного центра в возбуждённом состоянии, то в результате обменного взаимодействия с соседними атомами возбуждённые атомы возвратятся в нормальное, неактивное состояние - система релаксирует. Продолжительность процесса релаксации различна в зависимости от природы вещества, состояния его поверхности, температуры и других факторов [158].

Образованию активных центров мешают имеющиеся на поверхности металла хемосорбированный слой, плёнка окислов, слой адсорбированных газов и влаги и слой органических загрязнений (масляная плёнка). Состав и толщина окисной плёнки зависит от рода металла или сплава, от состава,

давления, температуры газовой фазы и продолжительности взаимодействия с ней металла. На поверхности самих окисных плёнок возможно наличие адсорбированных газов, влаги и органических веществ [156, 158].

Для образования соединения в процессе сварки взрывом основной и плакирующий листы располагаются с зазором, величина которого обычно составляет 6-8 мм, т.е. образуется своеобразный канал, из которого в процессе сварки взрывом должен быть вытеснен газ. При метании плакирующего листа в сварочном зазоре происходит ударное сжатие газа с образованием ударной волны, которая распространяется по газу впереди точки контакта. Газ нагревается до температуры порядка 3000 К [135, 141] и вытесняется из сварочного зазора со скоростью точки контакта (2400-3000 м/с), что является сверхзвуковой скоростью свыше 5 Мах [145]. Следовательно, ударно-сжатый газ, нагретый до высокой температуры (УСГ), обтекает свариваемые поверхности со сверхзвуковой скоростью. Между УСГ и поверхностью металла образуется пограничный слой газа, параметры которого отличаются от свойств основного потока газа [140] в связи с наличием сил трения при торможении воздуха о свариваемые поверхности и возникновения из-за наличия микронеровностей (шероховатости поверхности) турбулентности в приповерхностном слое. В этих условиях температура в пограничном слое может в несколько раз превышать ее в основном потоке УСГ, что подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями работы [135, 136]. В случае сварки взрывом крупногабаритных металлических листов, достигающих нескольких квадратных метров, удаление газа из сварочного зазора величиной 6-8 мм затруднено, и это может сказаться на качестве и структуре получаемых соединений.

В аэродинамических исследованиях [159] определение взаимодействия между газовой средой и движущимся в ней телом основывается на принципе обращенного движения, в соответствии с которым взаимодействующая система «неподвижная газовая среда (воздух) – движущийся объект» заменяется системой «движущаяся газовая среда – неподвижный объект». В случае за-

мены одной системы на другую должно быть соблюдено условие, при котором скорость набегающего на неподвижное тело газового потока была бы равна скорости движения этого тела в неподвижной среде. В нашем случае задача прямая: движущийся со сверхзвуковой скоростью газ и неподвижное твёрдое тело (свариваемые поверхности, которые образуют своеобразный канал).

В работе [145] показано, что при полете летательного аппарата со сверхзвуковой скоростью и взаимодействии его с воздухом за ударной волной возникают различные плазмохимические неравновесные процессы. Эти процессы настолько интенсивны, что сопровождаются химическим и механическим взаимодействием, а также эрозией и уносом материала конструкции. Интенсивность и спектр излучения плазмы за ударной волной определяют электронно-возбуждённые атомы и молекулы. Для ионизации возбуждённой частицы требуется меньше энергии, то есть присутствие электронно-возбуждённых атомов и молекул может ускорить ионизацию.

Одним из первых об образовании плазмы в сварочном зазоре сообщено в работе [160], где были определены зависимости уровня теплового потока и глубины проплавления свариваемых поверхностей от детонационных характеристик заряда ВВ и во взаимосвязи с технологическими параметрами: величиной зазора, шероховатостью, временем действия давления. На основании данных по измерению теплового потока было сказано, что «процесс теплопередачи будет осуществляться наиболее эффективно, если в зазоре реализован турбулентный режим течения, а уровень теплового потока, поступающего из плазмы в металл, будет лежать в пределах $1,3 \cdot 10^9$ до $4,1 \cdot 10^{10}$ Дж/(м²·с)». Полученные результаты авторы [160] излагают следующим образом: «Воздушная ударная волна формирует в зазоре высокотемпературную плазму. Поток тепла от плазмы разогревает поверхностный слой пластин до температуры плавления, обеспечивая при последующем контакте сварку пластин между собой». Подобные результаты по измерению теплового потока получены в работе [124]. По измерению яркостной температуры, с помощью

свето-фоторегистратора СФР-2М, показано, что тепловой поток из газа в металл составляет $10^8 - 10^9$ Дж/(м²·с). Эксперименты были проведены на различных режимах сварки. На основании полученных данных был произведён расчёт температуры относительно яркости свечения и получено следующее [83]: температура на режиме D=3500 м/с равна 5000 К; на режиме D=4200 м/с – 6500 К; на режиме D=4500 м/с – 8300 К.

Рассматривая воздействие на свариваемые поверхности в зоне, ограниченной областью УСГ, можно рассчитать, что теплового воздействия только ударно-сжатого газа на свариваемые поверхности недостаточно для их очистки и термоактивации на режимах сварки взрывом, используемых при промышленном производстве биметалла. Следует отметить, что наличие шероховатостей свариваемых поверхностей приводит к неравномерному нагреву металла в микрообъёмах, в частности, возможно оплавление вершин микронеровностей и их унос потоком УСГ. В то же время подогрев поверхностей интенсифицирует процессы поверхностной ионизации металла.

Облучение поверхности твердых тел ионными или плазменными потоками обычно вызывает те или иные изменения. Основным же процессом при взаимодействии плазмы с поверхностью твёрдого тела является разрушение приповерхностного слоя, который представляет собой окислы и органические загрязнения [5].

Под воздействием плазменного потока все известные оксиды металлов и другие химические соединения диссоциируют, ионизируются и испаряются (сублимируют) с поверхности. Положительные ионы металлов, образовавшиеся в результате диссоциации оксидов и их ионизации, возвращаются на очищенную поверхность, а атомы кислорода образуют простейшие газообразные соединения O₂, CO₂ и H₂O [135], которые выносятся из сварочного зазора. Следует подчеркнуть, что не окалина и ржавчина являются отходами очистки, отходами являются именно газифицированные углекислый газ и молекулы воды [161]. Диссоциация окислов приводит к резкому повышению активации свариваемых поверхностей перед точкой контакта.

В работе [162] приведены результаты экспериментальных исследований воздействия газовых потоков, получаемых с помощью трубчатых зарядов ВВ, на внутренние поверхности цилиндрических деталей, изготовленных из различных металлов. Выявлена модификация поверхности деталей с увеличением в несколько раз содержания углерода и азота, что связывается авторами с перемешиванием расплава с газовой плазмой. Показано, что высокая концентрация потоков энергии на поверхности создаёт условия для расплавления и испарения материала стенки детали, а значительные касательные напряжения - для переноса расплава вдоль по потоку.

Аналогичные процессы наблюдаются при плазменно-дуговой очистке металлопроката (рисунок 2.14). При плотности энергии 1011 Вт/м^2 тепловой поток будет составлять $1011 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с}$, а температура достигнет $(5-10) \cdot 10^3 \text{ К}$, при этом скорость очистки составляет $4,5 \text{ м/мин}$ (таблица 2.3) [163]. Конечно же, скорость очистки при плазменно-дуговой очистке несоизмеримо меньше, чем при сварке взрывом, но тепловой поток при сварке взрывом больше в 106 раз. Толщина же удаляемого слоя в этом случае составит всего $5-7 \text{ мкм}$ [73].

Таблица 2.3 – Расчетные параметры плазменной очистки металлопроката.

Метод	Температура, К	Плотность энергии, Вт/м ²	Время воздействия плазмы, сек	Толщина удаляемого слоя, мкм
Плазменно- дуговая очистка [147]	$(5-10) \cdot 10^3$	10^3	5-10	200-300
Ударная плазма	$(3,5-6) \cdot 10^3$ [107, 108, 124]	10^{10} [107, 145]	$2,4 \cdot 10^{-5} - 1,12 \cdot 10^{-4}$ при $D=2000-2500 \text{ м/с}$	5-7 [89]

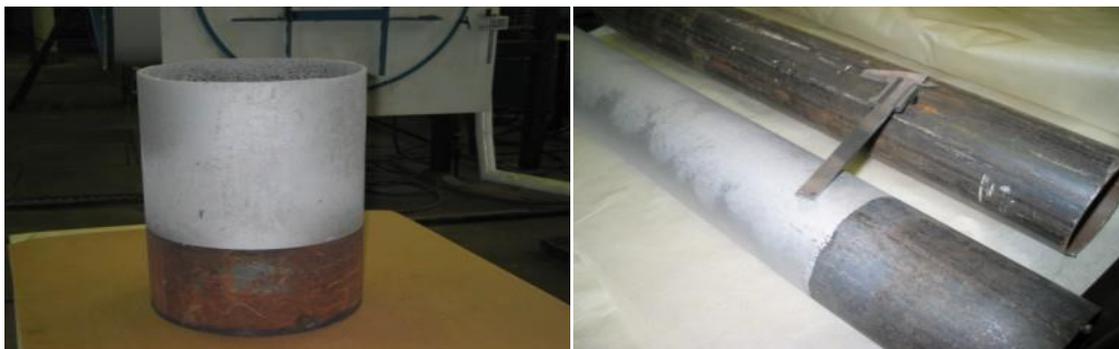


Рисунок 2.14 – Результат плазменной очистки деталей

Образование ударной плазмы в пограничном слое при сверхзвуковом обтекании высокотемпературным УСГ позволяет рассмотреть процессы очистки по аналогии с очисткой металлопроката плазмой [163].

Измерением потери веса стальных пластин в работе [106] было установлено, что с каждой из свариваемых поверхностей удаляется слой толщиной 5-7 мкм. Если рассмотреть площадь реальной поверхности по линии, огибающей микронеровности (при абразивной зачистке $HRz = 40$ мкм), то при потере 5-7 мкм металла с единицы поверхности с учётом микронеровностей удаляется слой толщиной не более 0,1-0,3 мкм. Эта толщина равна толщине окидных пленок, присутствующих на поверхности металла, удаление которых за счет диссоциации обеспечивает очистку и активацию поверхностей.

Проведенные исследования и расчёты позволили предложить следующий механизм очистки и активации свариваемых поверхностей перед точкой контакта при сварке взрывом крупногабаритных изделий [131]. Впереди точки контакта в сварочном зазоре образуется область УСГ, при сверхзвуковом обтекании которой свариваемых поверхностей на границе их раздела с поверхностью металла (в пограничном слое) образуется ударная плазма (рисунок 2.15). Под воздействием УСГ происходит нагрев поверхностных слоёв, а под воздействием плазмы - очистка от оксидов и загрязнений и преактивация поверхности. Время воздействия плазмы, исходя из размеров области УСГ, составляет порядка 10^{-5} сек. Чистые и активные поверхности вступают

в контакт в точке соударения и образуют соединение, формирование которого продолжается за точкой контакта и сопровождается интенсивной пластической деформацией [5].

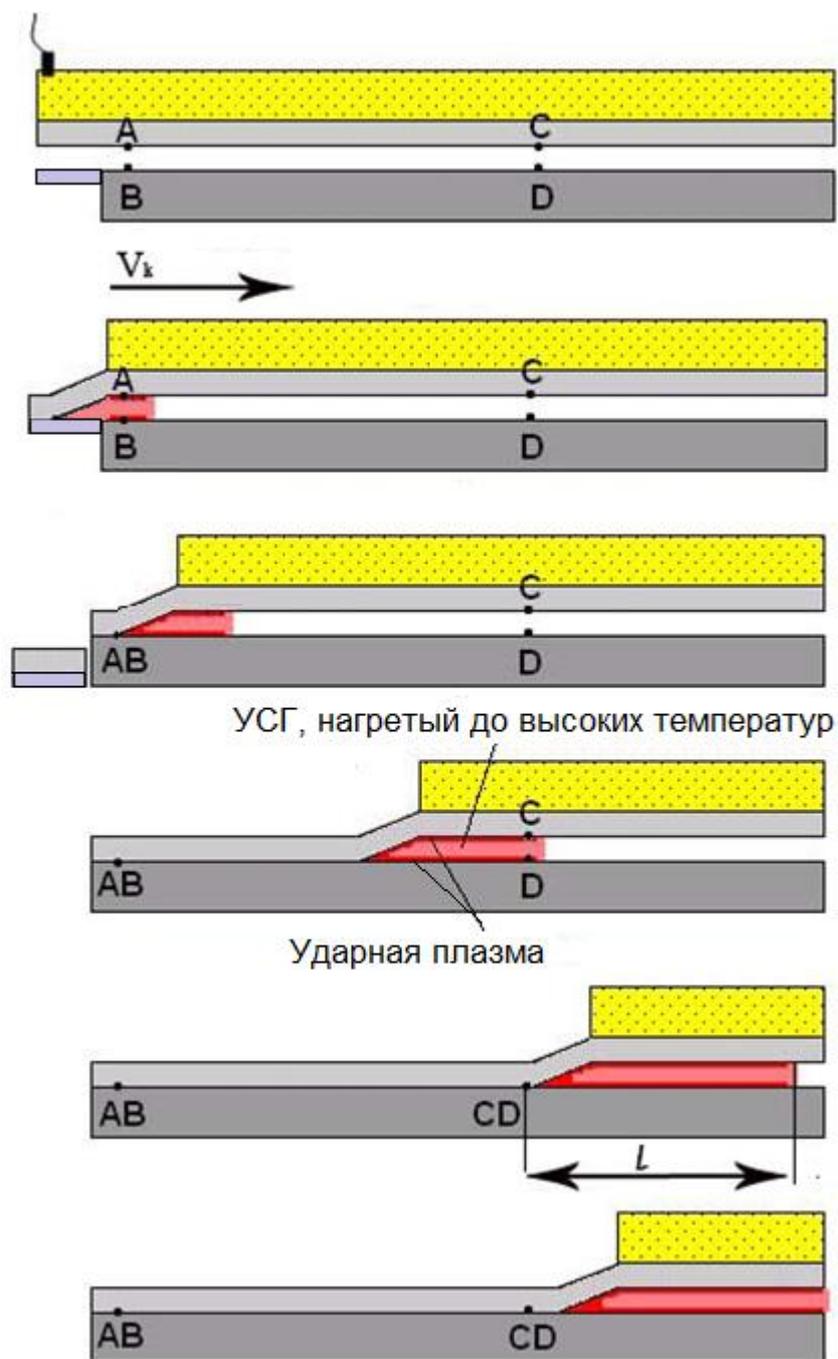


Рисунок 2.15 – Схема образования области ударно-сжатого газа [157].

Следует остановиться на роли пластической деформации в процессе образования соединения. Проведено много экспериментальных исследований пластической деформации в зоне соединения различными методами: координатная сетка, реперные линии, двойники и т.п. В работе [164] утверждается,

что условием образования прочного соединения тел в области нижней границы сварки взрывом является создание зоны интенсивной пластической деформации с полосой локализации вдоль границы соединения. Тип деформации, представляющий собой сдвиг со сжатием, характерный для сварки взрывом, изучен при осесимметричном взрывном нагружении полых толстостенных цилиндров [164-167]. Показано, что механизмы образования полос локализации пластической деформации при высокоскоростных нагружениях, включая проявления ротационной неустойчивости, зависят от размеров зерен и исходного состояния материалов [165, 166]. Структура поля деформаций околошовной зоны в сваренных взрывом образцах определяется градиентом сдвиговой деформации, хорошо выявляемой по изменению формы двойников, входящих в шов [165]. Авторами [168] методом реперных линий установлено, что существенное влияние на деформированное состояние околошовной зоны сваренных взрывом металлов оказывает скорость соударения. Значительная локализация деформации в более прочном металле приводит к сосредоточению тепловой энергии, выделившейся в результате пластической деформации, что можно считать одной из причин образования участков структурной и химической неоднородностей на границе соединения [5].

Недостаток этих методик заключается в трудности определения деформаций и смещений непосредственно на поверхности соударения в точке контакта, где происходит образование соединения. Отсутствие информации о деформационных процессах на поверхности соударения не позволяет оценить справедливость феноменологических построений, на которых базируется аналогия между сваркой взрывом и различными способами соединения в твёрдой фазе [169].

В результате теоретических и экспериментальных исследований временных параметров сварки металлов взрывом [170] установлено, что время пластического деформирования металла за точкой контакта в зависимости от скорости соударения для исследуемых материалов (Ст 3 и алюминий) лежит в диапазоне от 1,5 до 2,3 мкс. Согласно предложенной деформационно-временной физической модели рост параметров волн, образующихся в зоне

соединения (объема продеформированного металла в приконтактных областях), обусловлено увеличением времени действия давления p , превышающего динамический предел текучести свариваемого материала [110]. Показано, что величина деформирующего импульса давления определяет энергетику процесса сварки взрывом, затрачиваемую на пластическую деформацию металла околошовной зоны, определяя ее структуру (размеры волн, деформация зерен, образование ПЛПД, двойников), однако не влияет на состояние свариваемых поверхностей перед точкой контакта.

В ряде работ [6, 76] показана возможность образования бугра деформации перед точкой контакта. Следовательно, перед вступлением в контакт свариваемых поверхностей происходит дополнительная активация за счёт пластической деформации при образовании бугра деформации в локализованной зоне, ограниченной изобарой высоких давлений ($p \gg \sigma_0$). Степень относительной поверхностной деформации можно оценить как отношение длины линии, огибающей волну в соединении, к её проекции. Оценка по результатам измерения размеров волн в соединении показывает, что она колеблется от 15 до 80% [169].

Таким образом, при образовании соединения при сварке взрывом одновременно действуют два механизма активации свариваемых поверхностей перед вступлением их в контакт: разрушение окислов и загрязнений и преактивация свариваемых поверхностей под воздействием ударно-сжатого газа и плазменных потоков, а также активация при поверхностной деформации при образовании бугра деформации. Например, если сварка проводится в глубоком вакууме, то преобладает второй механизм активации, при сварке без волн – первый [169].

На основании проведенного комплекса исследований в [131] предложена следующая последовательность образования прочных связей между атомами соединяемых металлов в твердой фазе при сварке взрывом:

- очистка и преактивация свариваемых поверхностей происходит впереди точки контакта до соударения за счёт воздействия сверхзвукового потока ударной плазмы и пластической деформации в процессе образования бу-

гра деформации в локализованной зоне, ограниченной изобарой высоких давлений в окрестности точки контакта;

- образование физического контакта с активацией свариваемых поверхностей и соединение в точке соударения;

- объёмное взаимодействие с формированием соединения с пластической деформацией за точкой контакта.

Качество сварки взрывом определяется в первую очередь процессами, идущими впереди точки контакта, то есть очисткой и активацией соединяемых поверхностей. Следовательно, для обеспечения прочного соединения в начале процесса сварки взрывом, исключения начальных непроваров и участков пониженной прочности необходимо к моменту начала сварки обеспечить требуемые параметры УСГ и образования слоя плазмы для очистки и активации свариваемых поверхностей [169].

Таким образом, с позиций аэродинамики [145] при сварке взрывом в сварочном зазоре при обтекании УСГ свариваемых поверхностей со сверхзвуковой скоростью (больше 5М) в пограничном слое между свариваемыми поверхностями и УСГ возможно образование неравновесной ударной плазмы. Облучение поверхности твердых тел ионными или плазменными потоками обычно вызывает те или иные изменения. Основным же процессом при взаимодействии плазмы с поверхностью твёрдого тела является разрушение приповерхностного слоя, который представляет собой окислы и органические загрязнения [131].

Возможны два варианта взаимодействия пограничного слоя с поверхностью твёрдого тела в процессе обтекания [88, 156]:

1. Ударная плазма взаимодействует с твердым телом, при этом происходит разрушение и испарение поверхностных слоёв твёрдого тела, диссоциация окислов и насыщение ими УСГ;

2. Ударная плазма взаимодействует с жидкостью, которая образуется при оплавлении в первую очередь вершин микронеровностей. Жидкий слой вовлекается в поток и насыщает УСГ частицами и парами расплавленного металла, тем самым изменяя его параметры.

Следует подчеркнуть, что в процессе сварки взрывом на крупногабаритных листах в сварочном зазоре могут протекать оба варианта взаимодействия плазмы со свариваемой поверхностью. С точки зрения получения качественного прочного соединения без литых включений желателен первый вариант. Однако полностью исключить процесс оплавления поверхностей практически невозможно, поэтому режим взаимодействия чаще всего смешанный, и он может изменяться по мере продвижения процесса сварки взрывом по поверхности.

Перед точкой контакта два пограничных слоя, насыщенных ионизированными и расплавленными частицами, сходятся и при определенных условиях нарушения стационарного процесса сварки взрывом, например, искривления и замыкания фронта детонации ВВ, могут образовать единую плазменную струю. Воздействие этой струи на поверхность плакирующего листа в условиях образования замкнутого объёма в сварочном зазоре приводит к прожигу металла плазменным потоком и образованию свища характерной формы (рисунки 1.10 и 2.16).



Рисунок 2.16 – Дефект биметалла: прожиг (свищ) поверхности плакирующего слоя.

Кроме того, из точки контакта в УСГ непрерывно генерируются ударные волны, которые усиливают турбулентность. Эта область УСГ на рентге-

новских снимках фиксируется как облако дисперсных частиц [6], в ряде работ называется «плазменная струя» (plazmajet) [171].

С изложенной точки зрения [131, 135] предложено новое теоретическое представление о процессах очистки и преактивации свариваемых поверхностей при сварке взрывом крупногабаритных листов. Предлагается рассматривать процесс сварки взрывом, идущий при ударном сжатии и сверхзвуковом истечении газа из сварочного зазора, с позиций аэродинамики. В сварочном зазоре впереди точки контакта за ударной волной при сверхзвуковом обтекании высокотемпературным ударно-сжатым газом свариваемых поверхностей на границе их раздела в пограничном слое происходит термическая ионизация газа с образованием неравновесной ударной плазмы [5]. Роль газа в сварочном зазоре заключается в модификации свариваемых поверхностей впереди точки контакта перед сваркой взрывом: их очистке и преактивации плазменными потоками, возникающими в пограничном слое. Ювенильные поверхности, образующиеся в зоне соударения, сближаются до сил межатомного взаимодействия в точке соударения и образуют соединение, формирование которого продолжается за точкой контакта и сопровождается интенсивной пластической деформацией [5].

2.4 Выводы по главе

1. Для исследования процессов, происходящих в сварочном зазоре при производстве двухслойных листов промышленных размеров сталь+сталь, сталь+титан разработали методику, предусматривающую установку ловушек в виде пластин в конечных зонах основного и плакирующего листа, анализ их поверхности после сварки взрывом.

Экспериментально установлено, что на режимах сварки взрывом со скоростью точки контакта 2000-2500 м/с отсутствует устойчивый кумулятивный процесс, способный очистить и преактивировать перед точкой контакта свариваемые поверхности. Экспериментально, по наличию на поверхности ловушек слоя окислов титана толщиной 20-80 мкм, подтверждено, что в сва-

рочном зазоре при сварке взрывом титана со сталью при заполнении его активным газом идут процессы горения, в первую очередь микронеровностей.

2. Разработана методика расчёта параметров ударно-сжатого газа в сварочном зазоре впереди точки контакта путём решения аэродинамической задачи о сверхзвуковом обтекании свариваемых поверхностей с учетом истечения газа из сварочного зазора в боковые стороны. Показано, что размер области УСГ ограничен и зависит от ширины, длины листов, скорости точки контакта и свойств газа, заполняющего сварочный зазор. При прочих равных условиях увеличение ширины листов приводит к росту длины области УСГ.

3. Предложен механизм очистки и преактивации свариваемых поверхностей перед точкой контакта при сварке взрывом крупногабаритных изделий: очистка и преактивация свариваемых поверхностей происходит перед точкой контакта, в первую очередь, за счет воздействия на поверхностный слой металла сверхзвукового потока неравновесной ударной плазмы, образующейся в пограничном слое между УСГ и свариваемыми поверхностями при их сверхзвуковом обтекании. Взаимодействие ударной плазмы с поверхностью твёрдого тела приводит к диссоциации окислов, разрушению органических загрязнений и резкому повышению активации свариваемых поверхностей перед точкой контакта.

3. Особенности сварки взрывом крупногабаритных изделий в среде защитных газов

Методика исследований влияния газов в сварочном зазоре на процесс образования соединения стали с титаном при сварке взрывом предусматривала:

1. Анализ результатов исследований структуры соединений титана с титаном, полученных при заполнении сварочного зазора воздухом, кислородом, азотом, аргоном и гелием, что позволяет исключить образование интерметаллидов, и влияние на эволюцию структуры соединения режима термической обработки.
2. Выполнение расчётов параметров УСГ для воздуха, аргона, гелия при сварке взрывом крупногабаритных листов титана со сталью при положительных и отрицательных температурах по методике, изложенной в главе 2.
3. Исследование распределения прочности и структуры соединения сталь+титан по площади биметаллической заготовки промышленных размеров, в том числе в зонах неприваров.

3.1 Влияние состава газа в сварочном зазоре на структуру и прочность соединения на примере сварки взрывом титана с титаном с последующим термическим воздействием

Известно, что при сварке взрывом титана со сталью качество соединения стремительно падает по мере удаления от начала процесса [128]. Авторы [18, 110] в опытах по сварке длинномерных образцов титаново-стальных заготовок отмечали постепенное увеличение объема оплавленного металла от 0% (на удалении 30 мм от края заготовки) до 100% в конечной её части. Прочность на отрыв плакирующего слоя уменьшилась с 300 МПа в начале заготовки до 10 МПа в конце. В работе [22] теоретически показана возможность возгорания частиц титана в сварочном зазоре с образованием оксидов.

Однако большинство авторов связывает снижение прочности с образованием в зоне сварки интерметаллидных соединений [12, 72, 92, 172].

В работах [173, 174] были проведены эксперименты для изучения влияния масштабного фактора и атмосферы сварки по изменению структуры сварного соединения титан+титан. Применение однородных металлов позволило избавиться от структурных изменений, связанных с взаимодействием различных по химическому составу металлов и затеняющих изменения в структуре металла сварного соединения, происходящих в связи с воздействием на процесс газа, находящегося в объёме между свариваемыми поверхностями. Из листового титана марки ВТ1-0 были изготовлены при помощи аргонодуговой сварки специальные образцы с герметизированным объёмом между свариваемыми поверхностями метаемой и неподвижной пластин (размерами 500×1900 мм). Герметизированный сварочный зазор заполняли различными газами (азот, кислород, аргон и гелий). После сварки взрывом в диапазоне скоростей $V_k=1750\div 3950$ м/с были изучены сварные соединения на содержание газа (кислород, азот, аргон и гелий) методом масс-спектрального анализа на лазерном масс-спектрографе ЭМАЛ-2 (исследования проведены в АлтГТУ г. Барнаул). Темплеты для исследования отбирали от каждого образца, сваренного в различной газовой среде, на различном удалении от начала процесса сварки (30...60 мм, 800...900 мм, 1550 ...1700 мм и 1800...1900 мм). В структуре этих соединений в литых включениях были выявлены газы, концентрация которых по длине листов изменяется (рисунки 3.1 и 3.2). Установлено, что концентрация кислорода и азота в металле литых включений соединения титан-титан, сваренного в среде воздуха, растёт с увеличением скорости точки контакта V_k и удалением от начала процесса сварки L (см. рис. 3.1). Содержание кислорода и азота в металле вихревых зон в десятки раз превышает предельно допустимое значение для титана марки ВТ1-0.

Исследование химического состава металла литых включений сварных соединений, полученных в среде кислорода и азота, на лазерном масс-

спектрографе показало, что он насыщен тем газом, в среде которого производилась сварка (рисунок 3.2). Абсолютная величина и характер изменения концентрации этих газов в литых включениях с удалением от начала процесса сварки идентичны подобным зависимостям для образцов, сваренных в среде воздуха, при той же скорости точки контакта.

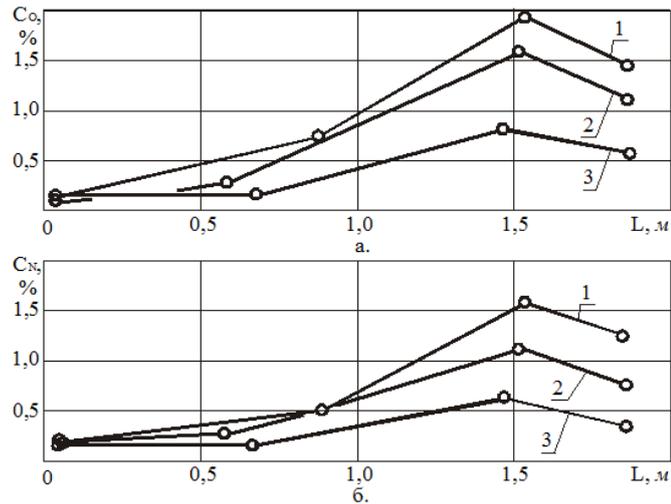


Рисунок 3.1 – Зависимость концентрации газов (кислорода C_O и азота C_N) в литых включениях от V_k , после сварки взрывом на воздухе (1 – 1880 м/с, 2 – 2680 м/с, 3 – 3950 м/с) [175, 176]

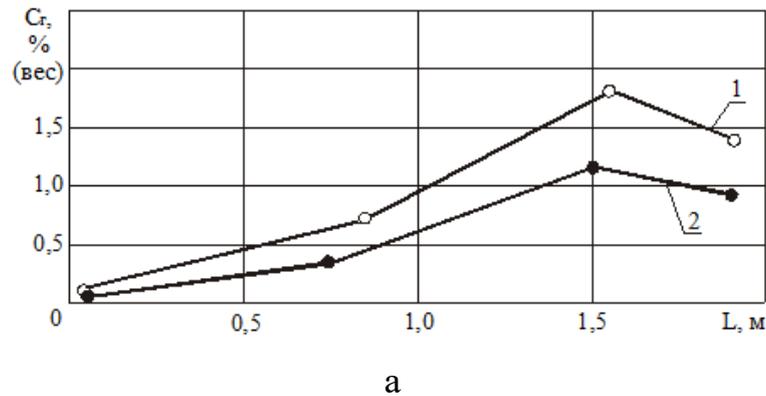
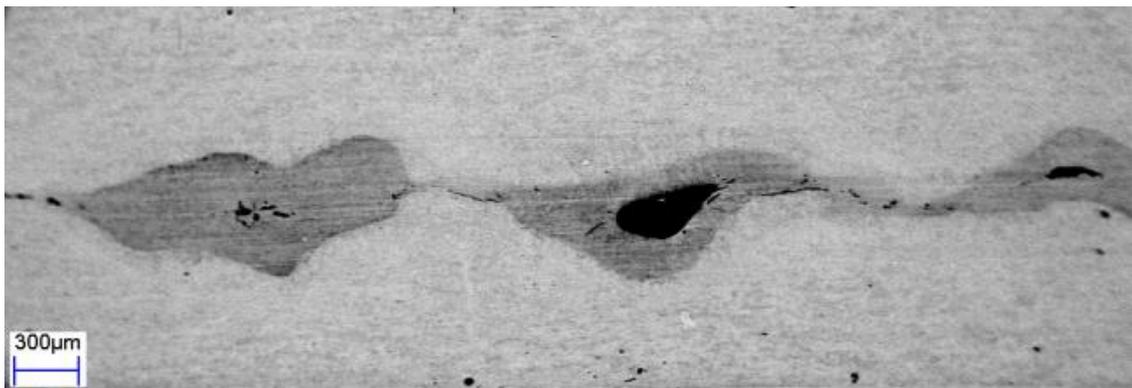


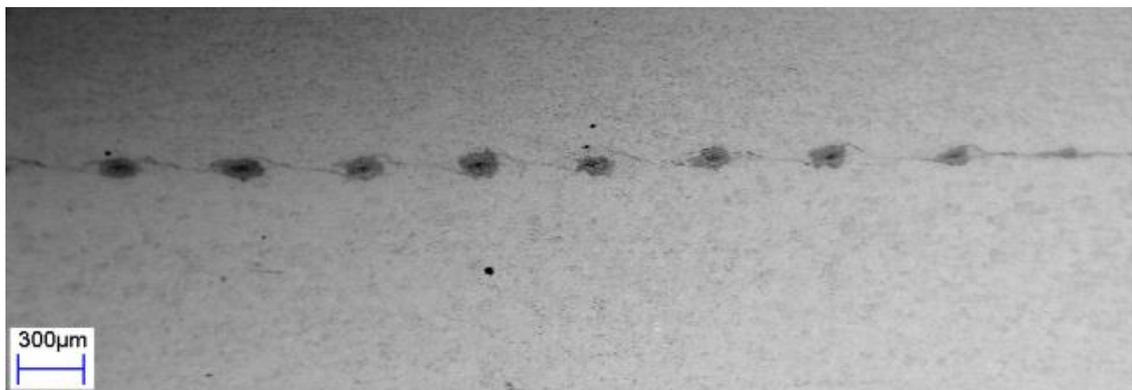
Рисунок 3.2 – Изменение концентрации газа (C_G) в литых включениях сварных соединений, полученных при $V_k=2690$ м/с в среде 1- кислорода и 2- азота (а). [175, 177]

Для уточнения влияния газов в сварочном зазоре были проведены дополнительные исследования структуры соединений образцов полученных сваркой взрывом в атмосфере воздуха в диапазоне скоростей

$V_k=1750\div 3950$ м/с, в других газах - при $V_k=2680$ м/с [178, 179]. Темплеты для исследования структуры соединения отбирали из середины последней трети образца по направлению хода детонации заряда ВВ. На рисунке 3.3 представлены структуры сварного соединения титан+титан, полученные сваркой взрывом в атмосфере воздуха. По всей длине они имели ярко выраженные тёмноотравающиеся литые включения с чёткими границами. В зависимости от скорости нагружения меняется размер дефектов.



а



б

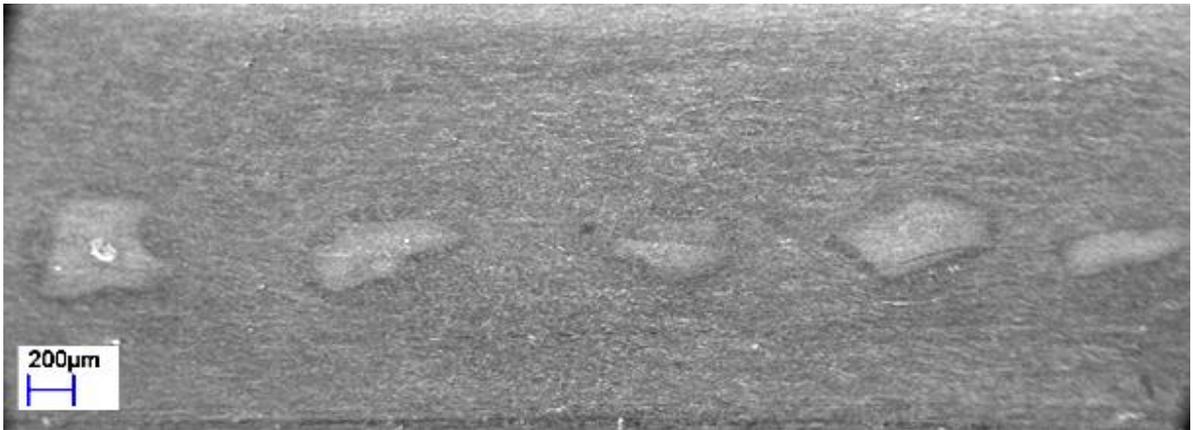
Рисунок 3.3 – Структура сварного соединения титан+титан после сварки взрывом на воздухе $V_k=3950$ м/с (а), $V_k= 1880$ м/с (б) [178].

Соединения, сваренные в среде кислорода и азота, по своей структуре близки к соединениям, полученным в среде воздуха. По всей длине они имели ярко выраженные литые включения с чёткими границами (рисунок 3.4). Исследование химического состава металла литых включений, полученных в среде кислорода и азота, показало, что он насыщен тем газом, в среде которого производилась сварка. Микротвёрдость материала в литых включениях

растёт с удалением от начала процесса сварки и, достигнув 5000...5500 МПа на расстоянии 1,4...1,6 м, что выше, чем при сварке в воздухе, немного снижается у конца образца. Причём наличие в сварочном зазоре кислорода повышает твёрдость литых включений [178].



а



б

Рисунок 3.4 – Структура сварного соединения титан+титан после сварки взрывом в среде кислорода (а) и азота (б), $V_k=2690$ м/с [178].

Особенностью взаимодействия газов с воздухом является то, что атмосфера в сварочном зазоре при сварке взрывом оказывает влияние в первую очередь на структуру и состав вихревых зон, при этом вихревые зоны насыщены газами [1]. При высоком давлении растворимость газов увеличивается: кислород образует соединение, а азот не образует, при кристаллизации растворимость азота уменьшается, и он образует поры (рисунок 3.5). Рост концентрации газов сопровождается возникновением структурной и химической неоднородности и трёх-, четырёхкратным повышением твёрдости

металла вихревых зон, что значительно снижает пластические свойства сварного соединения [175]. Структура литых включений содержит также большое количество округлых включений повышенной травимости диаметром 0,3...0,7 мкм и микротвердостью 2200...3500 МПа.

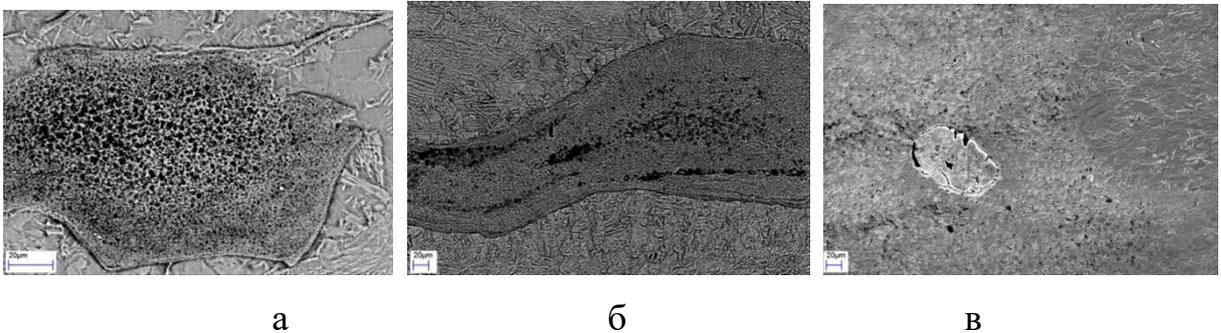


Рисунок 3.5 – Темнотравящиеся литые включения при сварке взрывом в атмосфере: воздух (а), кислород (б), азот (в) [158].

Особенностью структуры в соединения титан+титан после сварки взрывом является наличие рекристаллизованной области (рисунок 3.6 – структура 4), окружающей деформированный металл вокруг литых включений (рисунок 3.6 – структура 3). Средняя ширина рекристаллизованной области зависит от размера вихревой зоны и достигает в области исследованных режимов сварки 180 мкм, размер зерна - 10...30 мкм (что в 2-3 раза меньше размеров зерна исходного металла) и микротвердость - 1400...1600 МПа (2000...2500 МПа в деформированной области) [176, 177]. Малый размер зерна в титане, прошедшем $\beta \rightarrow \alpha$ -превращение, обычно связывают с высокими скоростями охлаждения и степенью деформации в β -области. [180, 181]. Причём рекристаллизация проходит уже после снятия давления и прохождения деформации, о чем свидетельствует отсутствие следов пластического течения металла, его низкая микротвёрдость, а уменьшение размера зерна – о предшествующей пластической деформации металла. По мнению авторов [176], в момент образования соединения свариваемые поверхности подвергались деформации в α -области (рисунок 3.7), а затем

под воздействием тепла от литого включения прошла рекристаллизация деформированного металла.

Отсутствие столь ярко выраженного эффекта при сварке других пар металлов связано с тем, что титан, обладая малой энергией дефекта упаковки, в большей мере склонен к протеканию процесса рекристаллизации [181, 182]. Низкая теплопроводность титана также способствует этому, так как высокая температура в локально нагретых областях вихревых зон сохраняется дольше, а пограничные с ними слои металла нагреваются до более высоких температур [176, 177]. Между литой и рекристаллизованной структурой по границе сварки расположена микрозернистая полоса (рисунок 3.6 – структура 1) шириной 0,02...0,08, мм, возникшая в результате динамической рекристаллизации. Характерной особенностью пластической деформации высокоскоростного нагружения титана является также наличие полос адиабатического сдвига, расходящихся от границы рекристаллизованной зоны металла под углом 30...60° к ней (рисунок 3.6 – структура 2) [183]. Полосы адиабатического сдвига состоят из зёрен диаметром 0,1...0,2 мкм, ориентированных в одном направлении. Микротвёрдость титана в этой зоне составляет 1700...2000 МПа.

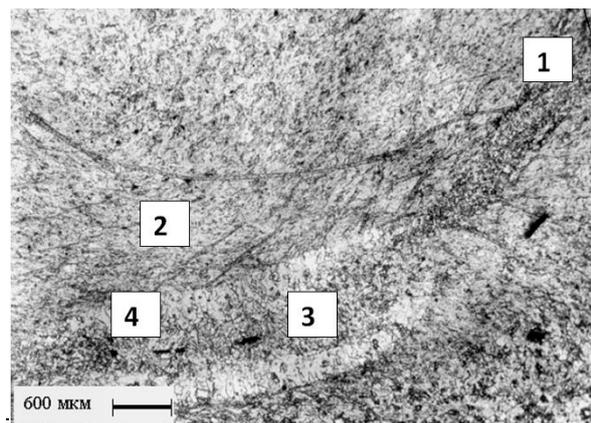


Рисунок. 3.6 – Структура волнообразного сварного соединения титан+титан, где а – граница раздела, включающая микрозернистую полосу адиабатического сдвига (1), зону пластической деформации (2), литое включение (3) и зону рекристаллизации (4) [158, 159].

Соединение, полученное сваркой взрывом, подвергается термической обработке для снятия остаточных напряжений, режим которой зависит от структурных изменений в зоне соединения. Необходимо знать эволюцию структуры зоны соединения пары титан+титан, полученного сваркой взрывом, при температурном воздействии. В работах [175, 176, 177] выявлено, что термообработка соединения титан+ титан, полученного сваркой взрывом на воздухе в интервале температур 400...800°С, не приводит к изменениям структуры материала литых включений и окружающего их рекристаллизованного металла, в то время как в зоне металла со следами пластической деформации примерно с 550...600 °С начинаются рекристаллизационные процессы (рисунок 3.8). На месте деформированного зерна возникает мелкое, порядка 8...10 мкм в диаметре, полиэдрическое зерно [175, 176]. Микро-твёрдость металла снижается до 1400...1600 МПа. Повышение температуры отжига до 800°С приводит к росту зерна до 15...30 мкм, причём опережающими темпами растёт зерно в областях, наиболее приближённых к зоне рекристаллизованного металла, и в областях наблюдаемой ранее мелкозернистой структуры. Измельчение зерна деформированной зоны относительно исходного в результате отжига свидетельствует о том, что деформация этой зоны металла проходила при температурах α -области [175, 177].

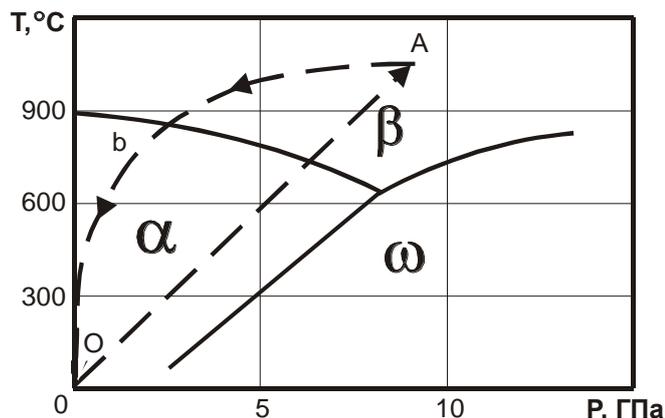


Рисунок. 3.7 – Оценка фазового состояния титана вблизи точки контакта во время образования сварного соединения при сварке взрывом [176, 184].

Перегрев соединения выше температуры полиморфного превращения (882°C) приводит к обычному для титана в этих условиях образованию крупного (100 мкм и более) зерна α -фазы с пластинчатой внутризёрненной структурой [180, 181]. Зона соединения при такой термообработке становится неразличимой. Отыскать её удастся только по порам, иногда наблюдаемым внутри вихревых зон (рисунок 3.8 а). В литых включениях (рисунок 3.8 б) выделяются зерна диаметром 3...5 мкм, приобретающие при травлении более тёмный оттенок [175], микротвердость области повышается до 4500 МПа [176, 177]. Столь значительное повышение твёрдости титана нельзя объяснить фазовой перекристаллизацией при $\alpha \leftrightarrow \beta$ -переходе. Фазовый наклёп в титане мал вследствие сравнительно небольшой величины упругой энергии роста зародыша новой фазы при полиморфном превращении, обусловленной относительно малой разностью удельных объёмов кристаллических решёток α и β -модификаций 0,17% (в 20 раз меньше, чем у железа) и малой величиной модуля упругости (при всех температурах в 2 раза меньше, чем у железа) [180, 181]. $\alpha \leftrightarrow \omega$ -переход (см. рис. 3.7) также не может приводить к наблюдаемым результатам, так как сохраняющаяся при быстром охлаждении в α -область метастабильная ω -фаза уже при низкотемпературной термообработке (отжиг при 200°C) переходит в α -фазу титана [175, 176, 184].

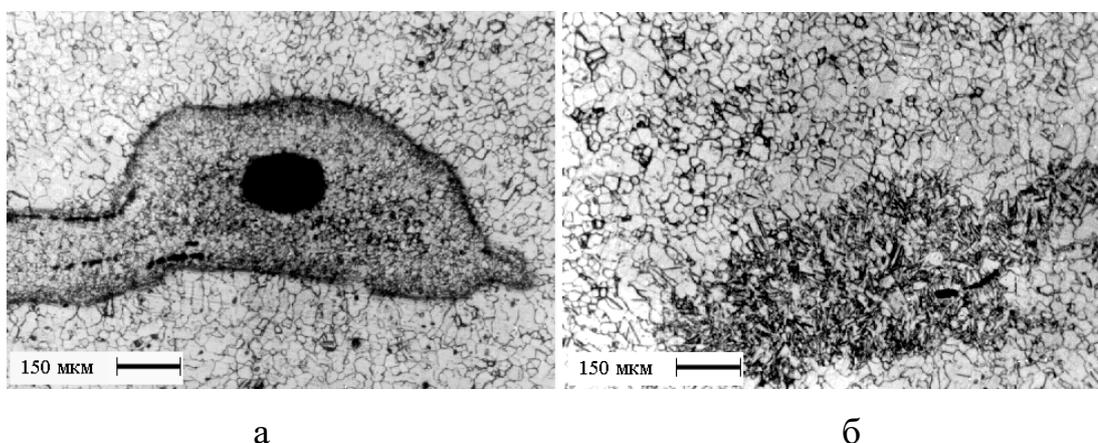


Рисунок 3.8 – Структура сварного соединения титан+титан после отжига 800°C [185].

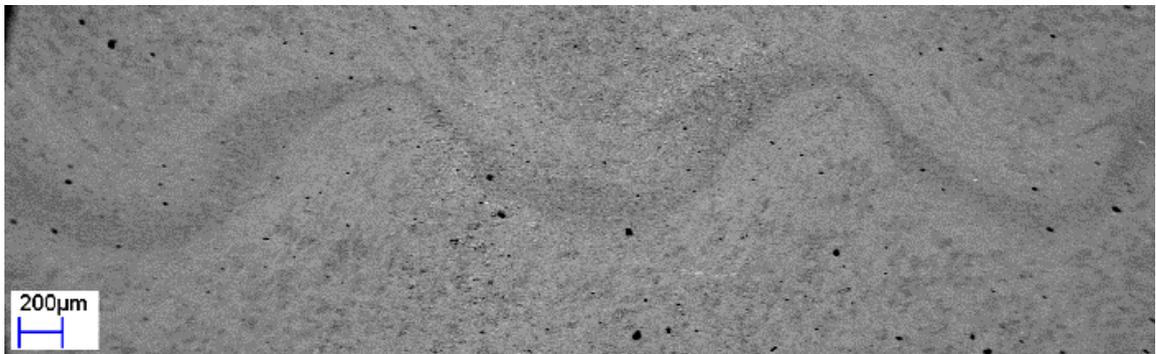
Значительное повышение твёрдости титана обычно является следствием насыщения его газами как на уровне образования твёрдых растворов внедрения, так и при образовании новых фаз, являющихся оксидами, нитридами, гидридами и карбидами титана [180, 181]. При температуре выше температуры полиморфного превращения резко повышается коэффициент диффузии газов в титане. Например, коэффициент диффузии кислорода растёт с $5,08 \times 10^{-3}$ см²/с до $3,14 \times 10^4$ см²/с [181]. Поэтому упрочнение окружающего вихревые зоны металла, зарегистрированное после нагрева соединения до температуры выше 882°C связано, по-видимому, с диффузией газа из металла вихревых зон. Этот факт служит косвенным подтверждением повышенной концентрации газов в вихревых зонах [175, 176].

Таким образом, увеличение параметров соударения при сварке взрывом титана приводит к насыщению металла литых включений газами атмосферы [176]. Для получения при сварке взрывом титана соединений без наличия в литых включениях оксидов и нитридов титана (участков химической неоднородности) необходимо исключить взаимодействие титана с воздухом, например, путем проведения сварки взрывом в среде защитных газов [186].

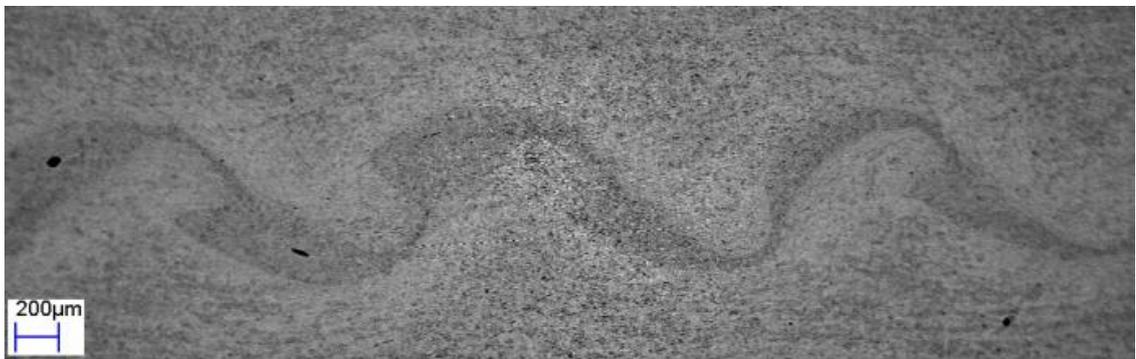
Сварные соединения, полученные в среде аргона и гелия (рис. 3.9), не имеют тёмноотравающихся вихревых зон с чёткими очертаниями по всей длине соединения [178]. Наличие в сварочном зазоре аргона приводит к исчезновению чёткой границы между рекристаллизованной зоной и металлом вихревой зоны. Металл середины литых включений имеет пористую структуру, однако микротвёрдость этой структуры низка и не превышает 200 МПа.

Сварка в среде гелия делает структуру металла литых включений ещё более однородной (рисунок 3.10 б), хотя они состоят из несколько более мелкого зерна. Металл литых включений не имеет пор и усадочных раковин, а его микротвёрдость не отличается от микротвёрдости металла рекристаллизованной зоны. При удалении от начала процесса сварки не наблюдается рос-

та микротвёрдости материала литых включений. Волнообразный характер соединения не нарушается на всей длине образцов.

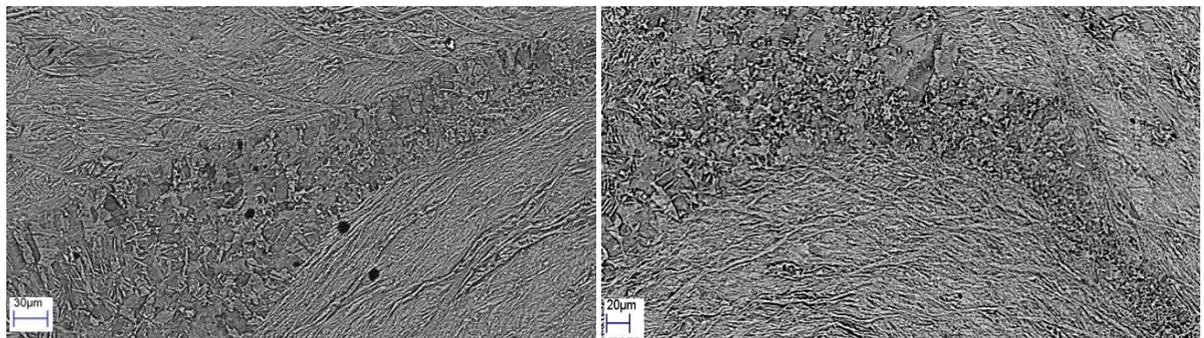


а



б

Рисунок 3.9 – Структура сварного соединения титан+титан после сварки взрывом в среде аргона (а) и гелия (б), $V_k=2690$ м/с [178].



а

б

Рисунок 3.10 – Микроструктура вихревых зон, полученная в среде аргона (а), гелия (б) [178].

Отжиг соединения титан + титан, полученного сваркой взрывом в среде гелия при температуре 550...600 °С, делает структуру металла литых включений практически неотличимой от структуры окружавшего их металла [187]. Таким образом, проведение процесса сварки взрывом в среде защитного газа (аргона или гелия) позволяют получить соединения без пор и других дефектов структуры.

Физические свойства газа, заполняющего объём между свариваемыми поверхностями, параметры УСГ, образование ударной плазмы на границе раздела УСГ со свариваемыми поверхностями оказывают влияние на размеры литых включений. В описанных экспериментах сварочный зазор герметизировался электросваркой, что затрудняло истечение УСГ из сварочного зазора в процессе сварки взрывом. Это приводило к росту его параметров и как следствие к увеличению размеров литых включений с удалением от начала процесса сварки. Причиной роста размеров литых включений с удалением от начала процесса сварки может быть выделение дополнительной энергии, выделяющейся при протекании химических реакций между металлом и активными газами (кислородом и азотом), отмеченной в работе [22]. Сварка в среде инертных газов аргона и особенно гелия значительно улучшает структуру сварного соединения, повышает его пластичность и стабилизирует качество сварного соединения по всей площади независимо от его размеров [134].

Сравнением структур литых включений соединений титан+титан, полученных при заполнении сварочного зазора различными газами, установлено:

1. На воздухе и в активных газах (кислороде, азоте) в литых включениях наблюдается образование пор и резкое повышение твердости за счет реакции расплавленного титана с кислородом и азотом с образованием оксидов и нитридов титана. С увеличением скорости детонации растут размеры литых включений, в которых образуются поры.

2. Заполнение сварочного зазора инертными газами (аргоном, гелием) исключает образование пор и структурных неоднородностей с высокой микротвердостью в литых включениях.

3. При термической обработке образцов, сваренных в среде воздуха, наблюдается диффузия растворенных газов из литых включений в титан с образованием химических соединений и соответствующим повышением твердости. При сварке в аргоне и гелии в соединении проходят диффузионные процессы, которые при высокой температуре термообработки делают металл однородным. При этом не наблюдается повышения твердости.

3.2 Зависимость расчётного времени воздействия ударно-сжатого газа перед точкой контакта от состава газа в сварочном зазоре

Структуру и свойства соединения при сварке взрывом определяет состояние свариваемых поверхностей в момент соударения в точке контакта. Для оценки температуры в этой зоне необходимо определить зависимость времени воздействия УСГ на свариваемые поверхности в зависимости от длины и ширины листа и газа в сварочном зазоре.

Начальные параметры:

- Длина листа $L = 13$ м.
- Ширина $b = 0.5 - 4$ м.
- Сварочный зазор – 8 мм (в расчетах не участвует).
- Скорость детонации, равная скорости точки контакта – 2200 м/с.
- Температура окружающей среды – 273 К.
- Атмосферное давление – 101,325 кПа (1 атмосфера).

С учетом формулы 2.14 расчёт времени воздействия УСГ t проводим из допущения, что скорость точки контакта V_k равна скорости движения газового поршня по формуле:

$$t = \frac{l}{V_k} = \frac{s\rho_0 b}{V_k \rho_1 b + 2s \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1} P_1 \rho_1 \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{2}{\gamma-1}}}} \quad (3.1)$$

Для оценки влияния различных газов на параметры ударно-сжатого газа были построены зависимости времени воздействия области УСГ впереди точки контакта. Как видно из серии кривых, представленных на рисунке 3.11, время воздействия прямо пропорционально длине области ударно-сжатого газа. Основная масса листов биметалла сталь+коррозионностойкая сталь, которые производятся сваркой взрывом, имеет размеры 1,5 х 6 м. Время воздействия УСГ в конечных зонах в этом случае составляет 130 мкс. При этом в соединении имеются только локальные включения в гребнях волн (см. глава 5). Аналогичную структуру следует ожидать при сварке биметаллических плит сталь+титан шириной 3 м при длине 3-3,5 м.

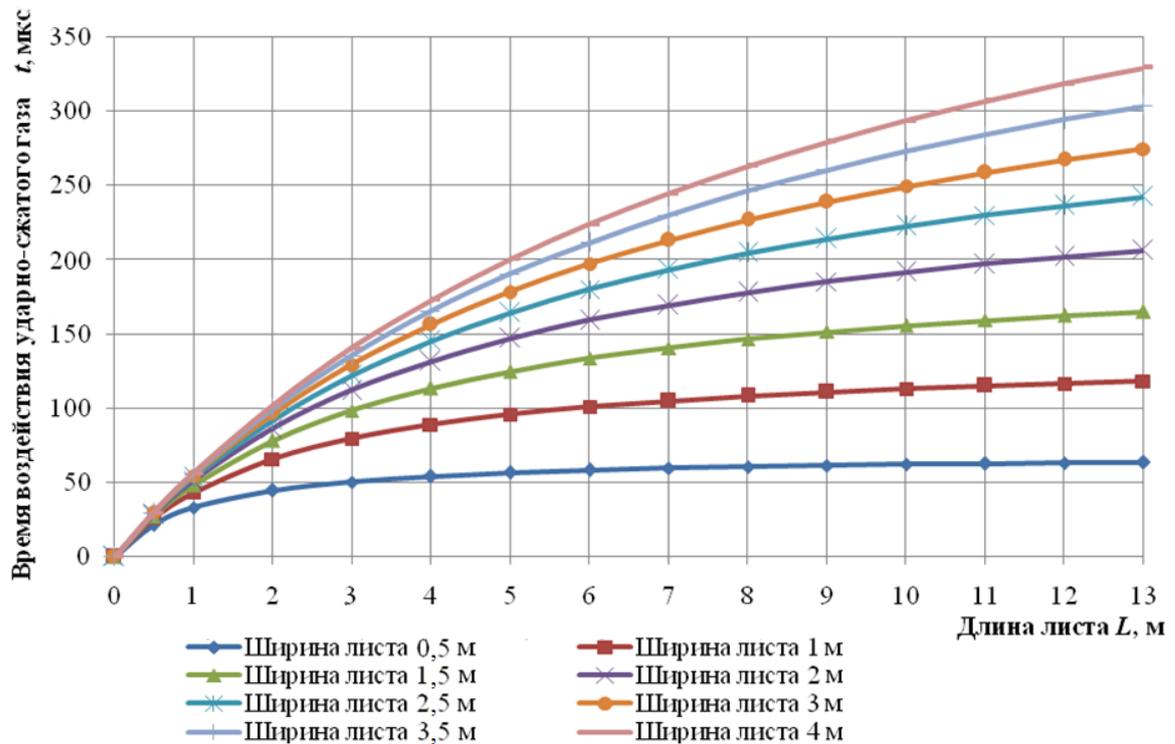


Рисунок 3.11 – Зависимость времени воздействия ударно-сжатого газа от длины листа в среде воздуха при скорости точки контакта $V_k = 2200$ м/с и различной ширине листа [1].

Расчеты показали, что температура и время воздействия области УСГ при заполнении воздухом и аргоном примерно одинаковы. Следовательно, термическое воздействие должно быть одинаковым. Однако, горение титана в сварочном зазоре, заполненном воздухом, приводит к резкому возрастанию температуры и лавинообразному увеличению литых включений в соединении [22]. Протяжённость области УСГ и время воздействия УСГ в гелии в 2 раза больше, чем при заполнении сварочного зазора воздухом или аргоном. Температура УСГ в гелии будет ниже, чем на воздухе (рисунок 3.12, таблица 2.2). Следовательно, количество литых включений должно быть меньше.

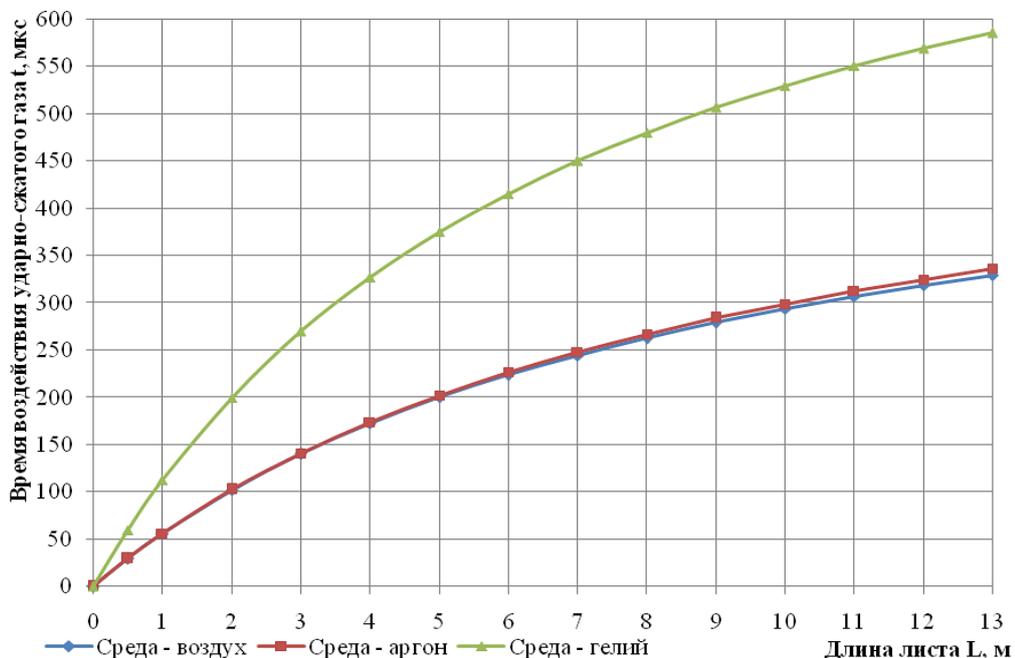


Рисунок 3.12 – Зависимость времени воздействия ударно-сжатого газа от длины листа в среде воздуха, аргона и гелия при скорости точки контакта $V_k = 2200$ м/с и ширине листа 4 мм.

По этой причине за рубежом сварка взрывом титана со сталью производят при заполнении сварочного зазора гелием. Однако использование гелия затруднено из-за необходимости тщательной герметизации сварочного зазора при заполнении гелием и его последующим удержанием.

Таким образом, увеличение габаритов свариваемых листов увеличивает время воздействия потока УСГ на свариваемые поверхности, а следовательно увеличивает количество литых включений.

3.3. Исследование распределения прочности соединения сталь+титан по площади биметаллической заготовки

Основное применение биметалла сталь+титан - это изготовление трубных решеток для конденсаторов АЭС и атомных судов, где производится сверление нескольких тысяч отверстий, что требует обеспечения заданной прочности и сплошности соединения по всей поверхности [188]. Испытания прочности соединения слоёв, как правило, производятся на образцах, вырезанных из концевых участков этих заготовок, и относятся ко всей поверхности [189]. Опубликованные данные по распределению прочности соединения по поверхности заготовки отсутствуют. Для практики важно получение объективного ответа на два основных вопроса:

1. Как распределяется прочность соединения сталь+титан по площади крупногабаритной биметаллической заготовки, изготовленной методом сварки взрывом в среде защитных газов?
2. Возможно ли по результатам ультразвукового контроля сплошности соединения сталь+титан объективно оценить качество соединения, включая его прочность?

Для ответа на поставленные вопросы была разработана методика комплексных исследований [190, 191]:

1. Изготовление модельных биметаллических плит сталь+титан марки 09Г2С+ВТ1-0 размерами 30(25+5)х3300х3700 мм по следующей технологии. Плакирующий слой представлял собой сварную карту, изготовленную из 5 частей аргонодуговой сваркой. Сварные швы (помечены пунктирной линией, рисунок 3.13) располагались по направлению детонации заряда. На сварном шве №4 была выявлена коробоватость, которую не удалось выровнять при

сборке пакета. Сварку взрывом производили в среде аргона, далее термообработка по режиму: нагрев 520 °С, выдержка 2 часа, охлаждение на воздухе. Затем были произведены холодная правка на вальцах с обеспечением плоскостности 3 мм на площади 1000x1000 мм и ультразвуковой контроль сплошности соединения.

2. Ультразвуковой контроль сплошности соединения по всей поверхности с настройкой чувствительности прибора по стандартному образцу предприятия (СОП) с плоскодонным сверлением диаметром 5 мм (20 мм²) и 3,5мм (10 мм²) (рис. 3.14). Участки поверхности, на которых появились шумы при сканировании с чувствительностью D5 (рисунок 3.15 в), сканируются при чувствительности D3,5. Эти участки фиксируются и отмечаются несмываемой краской как дефект сплошности.

3. Исследование структуры и прочности соединения в различных зонах биметаллической заготовки, включая зоны, прилегающие к дефектам сплошности, определенные методом УЗК.

4. Сравнительный анализ результатов экспериментального определения глубины оплавления в зоне соединения, распределения волновой структуры и прочности соединения и их связь с остаточными деформациями в процессе образования соединения при сварке взрывом.

Биметаллическая модельная плита была разрезана на 2 равные части размерами 30(25+5)x1860x3280 мм [190]:

- из части, не имеющей дефектов сплошности, по длине листа в направлении распространения детонации вырезали темплет размером 100x3200 мм, из которого изготовили макрошлиф для исследования волновой картины соединения (рисунок 3.13). Для предотвращения значительного искажения структуры темплеты отрезали гидрорезкой.

- из части, имеющей дефекты сплошности, в продольном и поперечном направлении листа, а также непосредственно вблизи дефектов были отобраны темплеты размером 50x50 мм для исследования прочности соединения и структуры (рисунок 3.16).

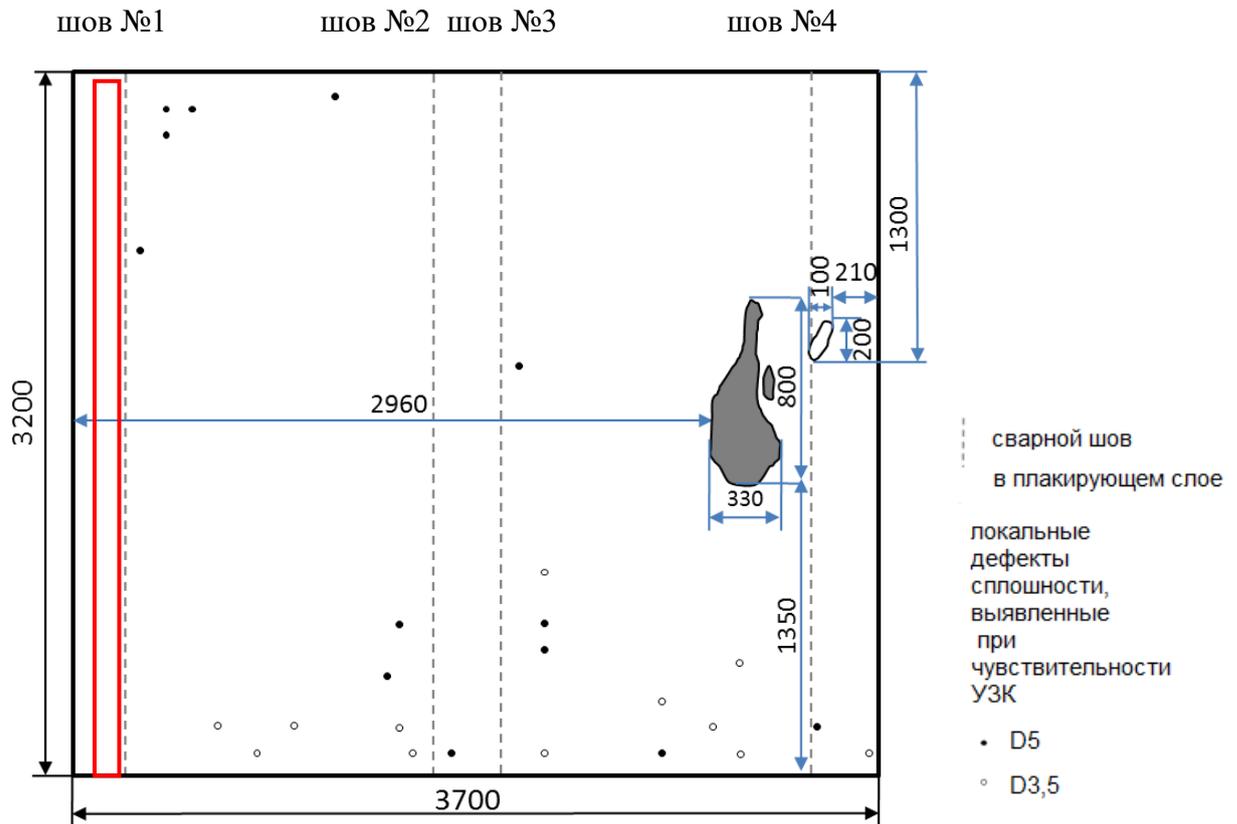


Рисунок 3.13 – Карта УЗК биметаллической моделирующей плиты 09Г2С+ВТ1-0 с дефектом сплошности. (тёмная область). Темплет для исследования стабильности волнообразования на границе соединения сталь+титан (красная линия). Пунктирной линией обозначены сварные швы в плакирующем слое. Дефект сплошности более 1 см^2 (темная область). Локальные дефекты сплошности менее 1 см^2 , выявленные УЗК при чувствительности D5 (●) D 3,5 (○).

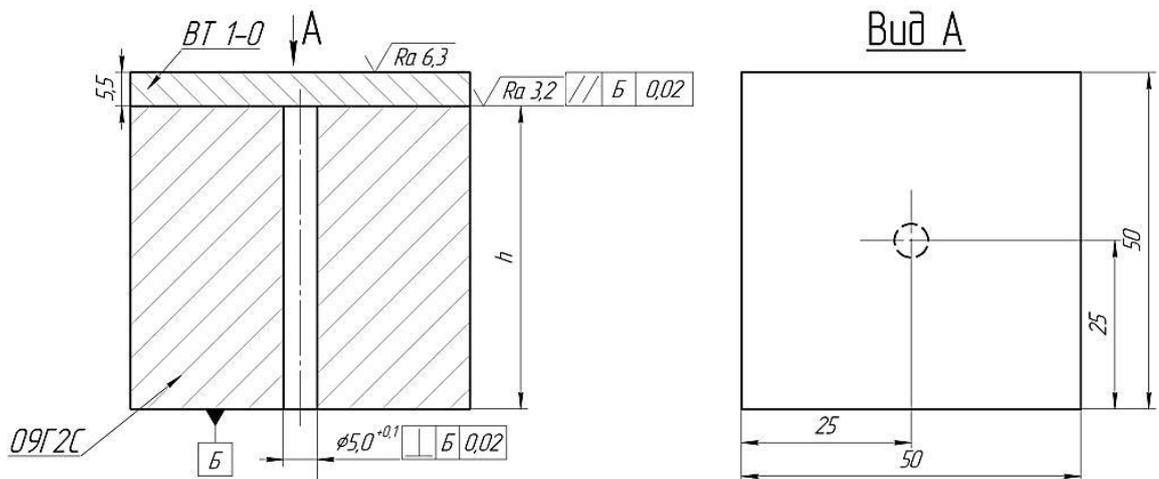


Рисунок 3.14 – Стандартный образец предприятия СОП.

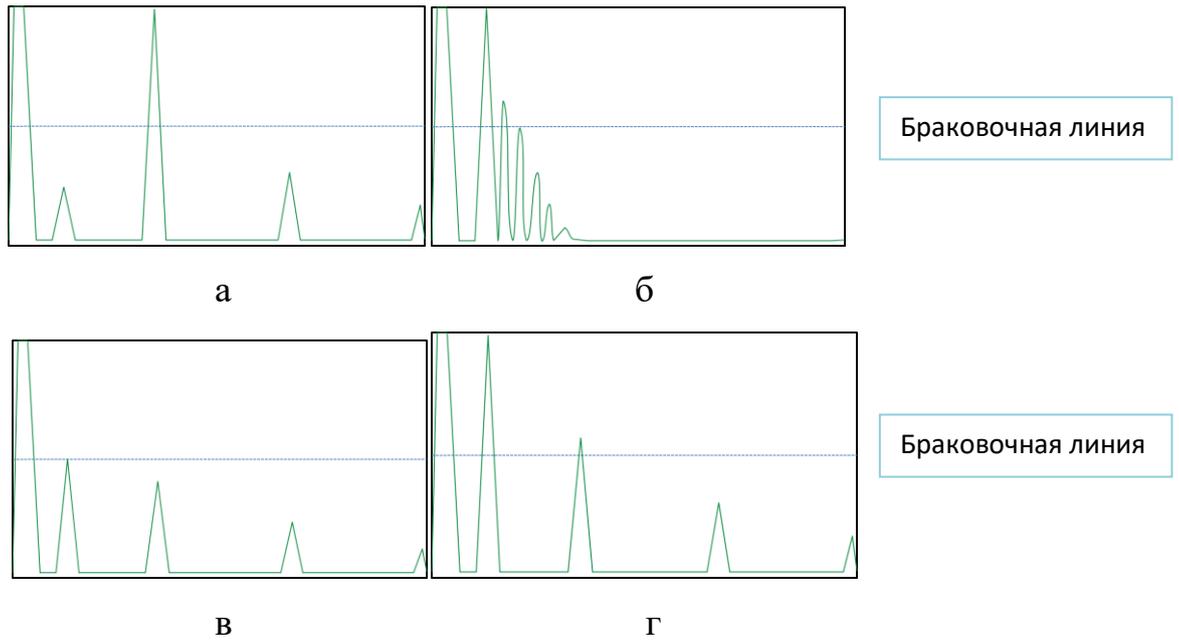


Рисунок 3.15 – Показания прибора при различной чувствительности: отсутствие расслоения (а), расслоение (б), появление шумов при чувствительности D5 (в), наличие дефектов сплошности при D3,5 в зоне шумов при D5 (г).

По результатам ультразвукового контроля на биметаллической модельной плите выявлены дефекты сплошности площадью $330 \times 800 \text{ мм}^2$ (см. темная область на рис. 3.15) и участок «полупривара», площадью $100 \times 200 \text{ мм}^2$, определенный с помощью изменения чувствительности прибора (D5, D3,5) (см. светлая область на рис. 3.15).

Отбор образцов производился попарно (чётная нумерация - для исследования структуры, нечётная - прочности соединения):

- по длине плиты в направлении сварки и по ширине в начальной и конечной зонах;
- в зонах, прилегающих к дефекту сплошности, выявленных при сканировании на уровне чувствительности, настроенной по отверстию диаметром 5 мм, включая точечные дефекты;
- из участка полупривара, выявленного при сканировании на уровне чувствительности, настроенной по отверстию диаметром 3,5 мм, включая точечные дефекты [190 - 192].

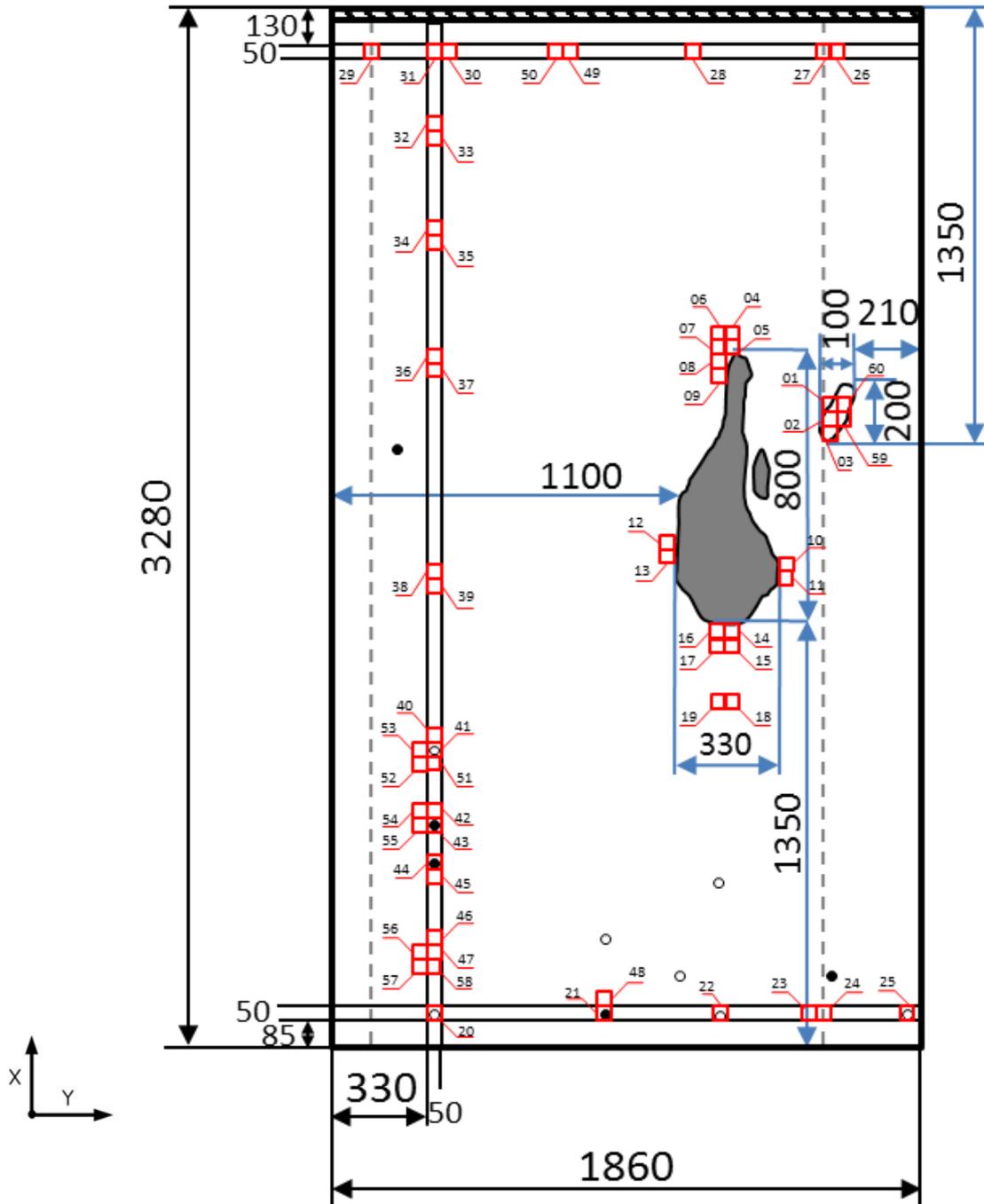


Рисунок 3.16 – Схема разрезки биметаллического модельного образца 09Г2С+ВТ1-0, красной линией обозначены парные образцы (50x50 мм) - образцы для исследования структуры (чётная нумерация); для исследования прочности соединения (нечётная нумерация).

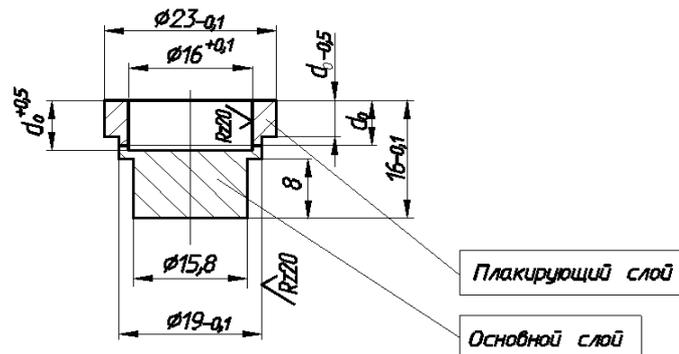
Прочность соединения в различных зонах биметаллических модельных образцов. Испытания на отрыв плакирующего слоя проводили с помощью разрывной машины INSTRON (эскиз, схема испытаний и общий вид образ-

цов на рисунках 3.19 - 3.21). Напряжения отрыва определяются по формуле [193]:

$$\sigma_{отр} = \frac{4P}{\pi(d_2^2 - d_1^2)}, \quad (3.2)$$

где P – прилагаемая нагрузка; d_1 и d_2 – внутренний и наружный диаметры разрывной части образца, замеренные с точностью до 0,05 мм.

Результаты испытаний прочности соединения на отрыв плакирующего слоя приведены в таблице 3.1.



d_0 - толщина плакирующего слоя

Рисунок 3.17 – Образец для испытаний на отрыв плакирующего слоя [193].

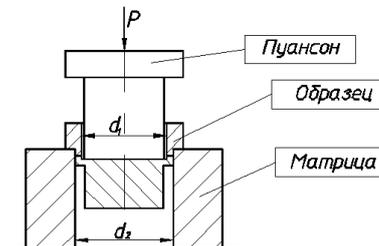


Рисунок 3.18 – Схема испытаний на отрыв плакирующего слоя [193].



Рисунок 3.19 – Образцы биметалла 09Г2С+ВТ1-0 до и после испытаний прочности соединения слоёв на отрыв.

Анализ результатов испытаний показал:

1. Прочность соединения в зонах, где ультразвуковым контролем не выявлено локальных и точечных дефектов сплошности, составляет 302-424

МПа (рис. 3.20). По всей поверхности соединения поверхность разрыва имеет серебристый цвет и чётко выраженные волны.

2. Прочность соединения образцов с точечными дефектами сплошности (№41, 43, 47, 29) составляет 133-154 МПа. Испытания образцов показали, что снижение прочности соединения имеет локальный характер и связано с точечными дефектами сплошности соединения, которые попадают в зону отрыва.

3. В зоне дефекта сплошности, выявленного при ультразвуковом сканировании с настройкой чувствительности по отверстию диаметром 3,5 мм, прочность образцов составила меньше 100 МПа (№1, 3, 59, 60). Образец №3 расслоился до приложения нагрузки, поверхность разрыва тёмная, волны отсутствуют. На половине поверхности разрыва образца №1 непровар, схожий по внешнему виду с поверхностью образца № 3, волны нет. На второй половине поверхности разрыва волна четко выраженная, цвет темновато-серебристый.

4. Прочность соединения на участках, вырезанных из зон, прилегающих к дефекту сплошности, не стабильна и меняется в диапазоне от 65 МПа до 355 МПа (образцы № 5, 7, 9, 11, 13, 14, 17). На образце № 5 половина поверхности разрыва гладкая, без волн, светлая, на другой половине - волна серебристого цвета. На образце №17 - волна маленькая слабо выраженная, есть участки отсутствия волны (не более $1,5 \text{ мм}^2$), цвет поверхности провара серебристый, имеются малые темные участки (меньше 1 мм^2) в количестве 4 шт.

Исследование прочности соединения образцов, отобранных по всей поверхности биметаллической плиты размерами $30(25+5) \times 3300 \times 3700$ мм, показало, что сварка взрывом в среде аргона с последующей термической обработкой и холодной правкой обеспечивает стабильность процесса образования соединения слоёв по всей поверхности с прочностью свыше 300 МПа [190, 191] (рисунок 3.20).

Таблица 3.1 – Результаты испытаний прочности соединения 09Г2С+ВТ1-0 на отрыв лакирующего слоя.

№ образца	Координаты темплета		Прочность соединения на отрыв $\sigma_{отр.}$, МПа	Примечание по УЗК
	х, мм	у, мм		
1	2030±5	1100±5	<u>101</u>	участок полупривара
3	1930±5	1100±5	0	участок полупривара
5	2280	1315	<u>65</u>	вокруг дефекта сплошности
7	2280	1215	201	вокруг дефекта сплошности
9	2180	1215	339	вокруг дефекта сплошности
11	1530	1430	267	вокруг дефекта сплошности
13	1620	1050	323	вокруг дефекта сплошности
14	1310	1315	355	вокруг дефекта сплошности
17	1260	1215	188	вокруг дефекта сплошности
19	1080	1215	246	вокруг дефекта сплошности
21	85	800	424	Чувствительность к D5
23	85	1150	342	
25	85	1800	212	Чувствительность к D 3,5
27	3100	1640	347	Сварной шов
29	3100	<u>90</u>	<u>144</u>	Сварной шов
31	3100	330	302	
33	2830	330	368	
35	2430	330	402	
37	1970	330	382	
39	1370	330	384	
41	910	330	<u>133</u>	Чувствительность к D 3,5
43	650	330	194	Чувствительность к D5
45	520	330	401	

47	270	330	153	
49	3100	730	371	
51	860	330	218	Доп.образец к № 41
52	860	280	426	Доп.образец к № 41
53	910	280	401	Доп.образец к № 41
54	700	280	361	Доп.образец к № 43
55	650	280	404	Доп.образец к № 43
56	270	280	408	Доп.образец к № 47
57	220	280	358	Доп.образец к № 47
58	220	330	343	Доп.образец к № 47
59	1930±5	1150	0	<i>участок полупривара</i>
60	2030±5	1150	51	<i>участок полупривара</i>

Прочность соединения слоев в зонах, прилегающих к дефекту сплошности, и зоне полупривара (зафиксированных УЗК при изменении чувствительности прибора: на одной чувствительности - есть соединение, на другой - нет соединения), ниже 150 МПа. Установлено, что в случае отсутствия дефектов сплошности соединения по данным ультразвукового контроля правомерно относить результаты испытаний прочности соединения на образцах отобранных из конечных участков крупногабаритного листа, на всю его поверхность [190 - 192].

Рекомендовано ультразвуковой контроль сплошности соединения проводить при настройке прибора по плоскодонному отверстию D 5 мм и отмечать участки, в которых фиксируются шумы вблизи браковочного уровня. Эти участки дополнительно контролировать при настройке по отверстию D 3,5 мм.

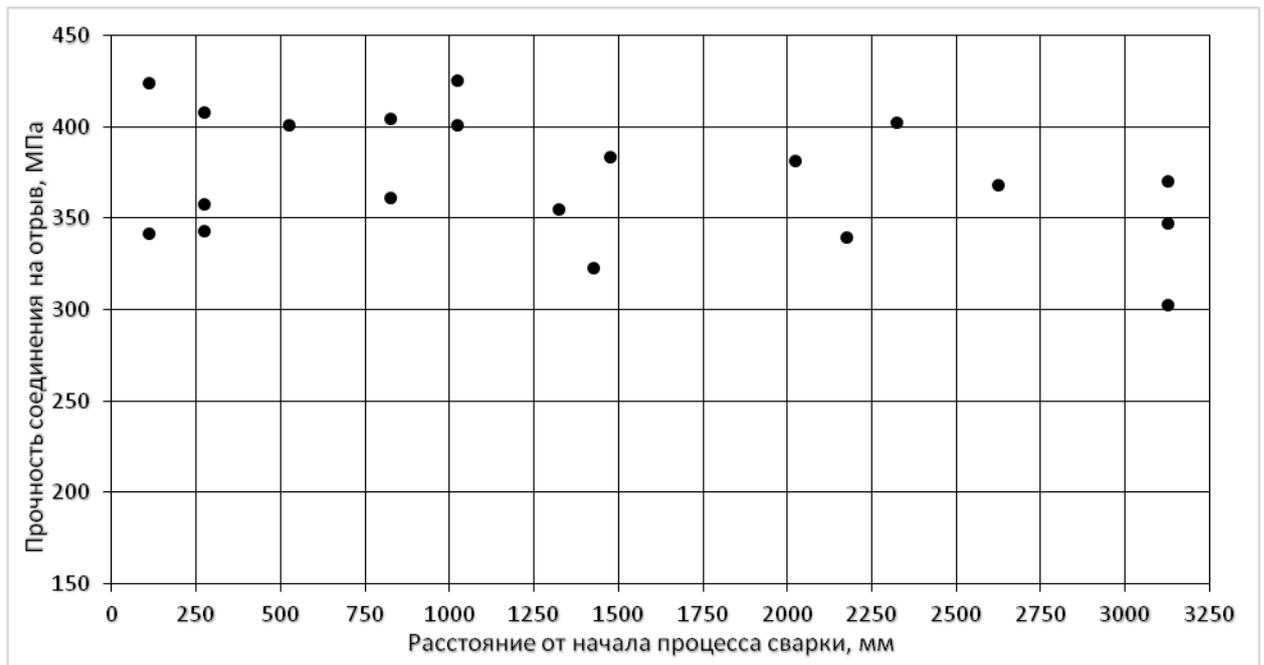


Рисунок 3.20 - Изменение прочности на отрыв плакирующего слоя соединения 09Г2С+ВТ1-0 по длине листа **без учета зоны дефекта** [190].

3.4. Особенности структуры соединения сталь+титан в различных зонах крупногабаритного листа, в том числе в зонах неприваров

Структурные исследования включали измерение размеров волн по длине листа, определение количества литых включений, их химического состава, изучение структуры в зоне дефектов сплошности. Для исследования использовали методы оптической и электронной микроскопии. Определяли форму и размер кристаллических зерен; микродефекты металла; неметаллические включения; присутствие различных фаз. Одновременно была изучена микротвёрдость зоны сварного соединения [190, 192].

Для исследования волновой структуры соединения макрошлиф размерами 100x3280 разбивался на участки длиной 100 мм, на которых с помощью лупы Бринеля при увеличении 24 измерялась высота и длина волн (6-8 волн). На график наносили минимальное и максимальное значение размеров волн на каждом участке [192].

При исследовании микроструктуры соединения на парных образцах (рисунок 3.16) измеряли усредненную толщину расплавов в соединении, как

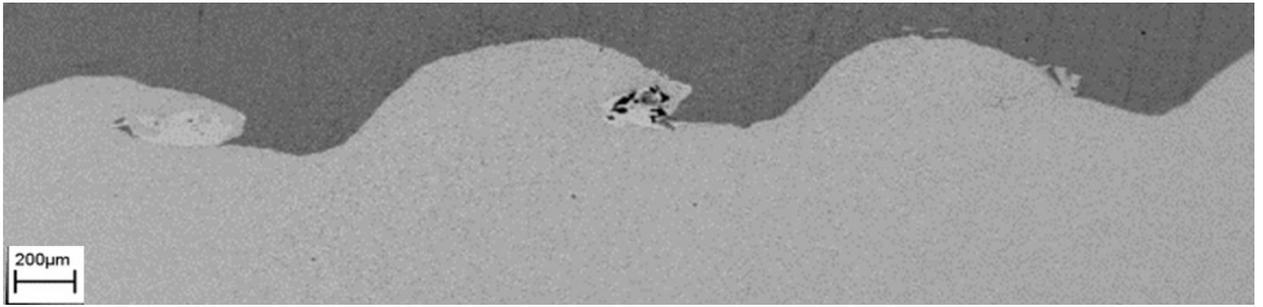
отношение суммарной площади литых включений к длине измеряемого участка, с нанесением результатов на теоретическую кривую глубины проплавления поверхности листов. Усредненную толщину металла вихревых зон δ_B определяли по зависимости (3.3) [194]

$$\delta_B = \frac{\sum_{n=1}^k S_n}{L} \quad (3.3)$$

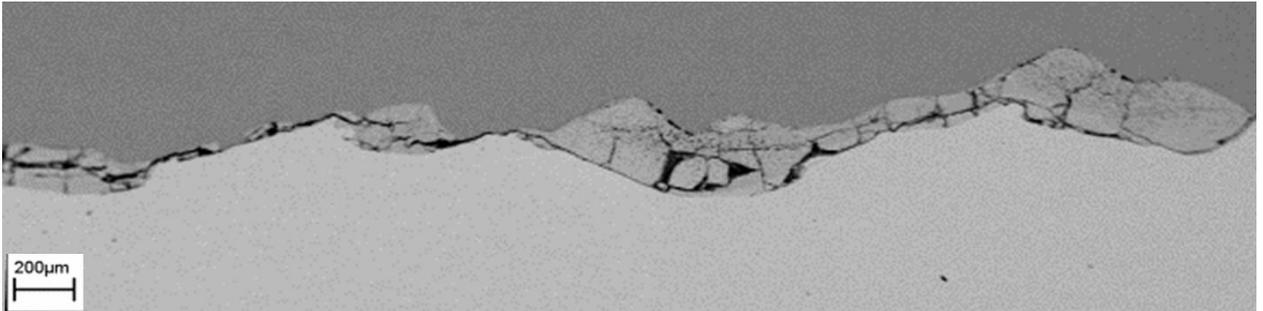
где S_n – площадь n -ой из k вихревых зон в плоскости шлифа; L – длина участка соединения.

Исследования макрошлифа выявили по всей его длине четкую волнообразную границу раздела между основным и плакирующим слоем, а также наличие локальных литых включений в гребнях волн (рисунок 3.21 а). Дискретный характер распределения включений, не превышающий размер допустимого дефекта (1 см^2 согласно ТУ 5.961-11917-2015 «Плиты биметаллические «Сталь-Титан»») не влияет на прочностные свойства сварного соединения, о чем свидетельствуют результаты испытаний прочности (см. рис. 3.20).

Измерения высоты волны (рисунок 3.22) показали, что стабильное волнообразование наблюдается по всей длине шлифа, в том числе и в начале процесса сварки. Длина волны колеблется в широких пределах, и её размеры зависят от того, насколько нормально к плоскости измерений она попала. Высота волн мало зависит от направления разрезки. В волновой структуре соединения по высоте волн можно выделить три зоны. В первой зоне (0-2000 мм) высота волн колеблется в пределах от 0,09 до 0,21 мм, длина волн - от 0,9-1,3 мм. Во второй зоне (соответствующей 70-80% длины листа) размеры волн возрастают: длина до 1,4 мм, высота до 0,25 мм. Протяжённость третьей зоны - 200-250 мм, размеры волн в этой зоне заметно снижаются [190 - 192].



а



б

Рисунок 3.21 – Микроструктура зоны соединения на участке с прочностью соединения слоёв 302-424 МПа (а), в зоне полупривара с прочностью соединения слоёв меньше 100 МПа.

В зонах, прилегающих к дефекту сплошности, и зоне полупривара литые включения и трещины в них расположены практически непрерывно вдоль контактной границы, волнообразование нарушено, соединение имеет ситовый характер (рисунок 3.21 б), что определяет прочность ниже 150 МПа.

Измерениями микротвёрдости зоны сварного соединения, проведёнными на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 200 г, выявлена повышенная микротвердость литых включений (таблица 3.2) по сравнению с основным и плакирующим слоем (рисунок 3.23), что связано образованием в них химических соединений при интенсивном перемешивании в процессе сварки взрывом.

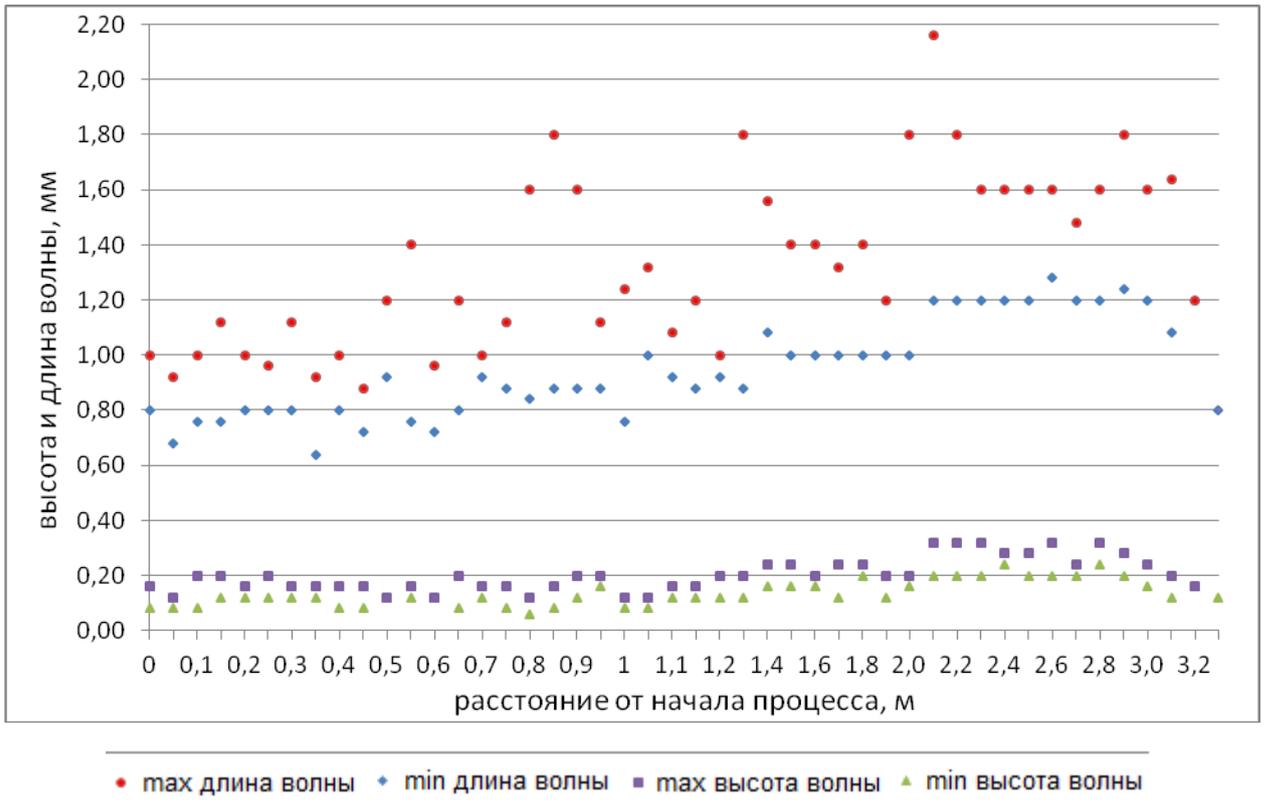


Рисунок 3.22 – Изменение размеров волн в соединении по длине макрошлифа



Рисунок 3.23 – Отпечатки микротвердомера в зоне соединения.

Таблица 3.2 – Значения микротвердости

Измерение	09Г2С	Литое включение	ВТ 1-0
Микротвёрдость, HV	280-290	1610-1620	220-230

На рисунке 3.24 приведена зависимость усреднённой толщины литых включений δ от начала процесса сварки взрывом L , построенная по данным металлографического исследования размера включений [190] и формуле (3.3). Как видно, площадь литых включений колеблется в относительно узких пределах, что свидетельствует о стабильности процесса сварки взрывом при данных условиях.

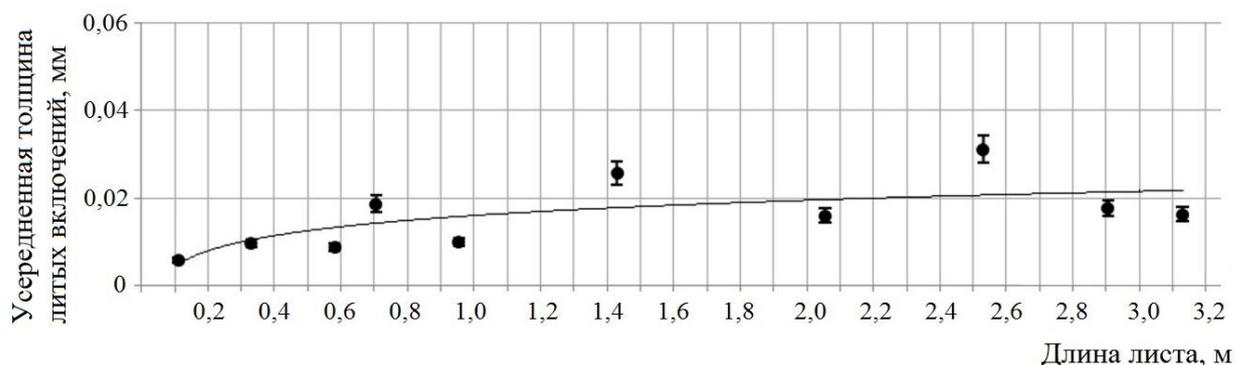


Рисунок 3.24 – Изменение усреднённой толщины литых включений с удалением от начала процесса сварки [190].

Результаты построения карт распределения элементов, в том числе и в зоне полупривара с пониженной прочностью соединения, свидетельствуют о наличии в литых включениях железа и титана (рисунок 3.25). В зависимости от расстояния от точки инициирования и близости зоны полупривара размеры включений изменяются. В зоне полупривара литые включения имеют вытянутую форму, размер включений и трещин значительно увеличивается (рисунок 3.26) [195].

Микроанализ включений **в соединении** (рисунок 3.27) показал, что в составе литых включений (вес.%) содержатся титан и железо, их соотношение соответствует интерметаллидам $TiFe$, $TiFe_2$, Ti_2Fe . В состав литых включений входят также основные элементы соединяемых материалов в различных соотношениях, что, по-видимому, обусловлено интенсивным перемешиванием [195].

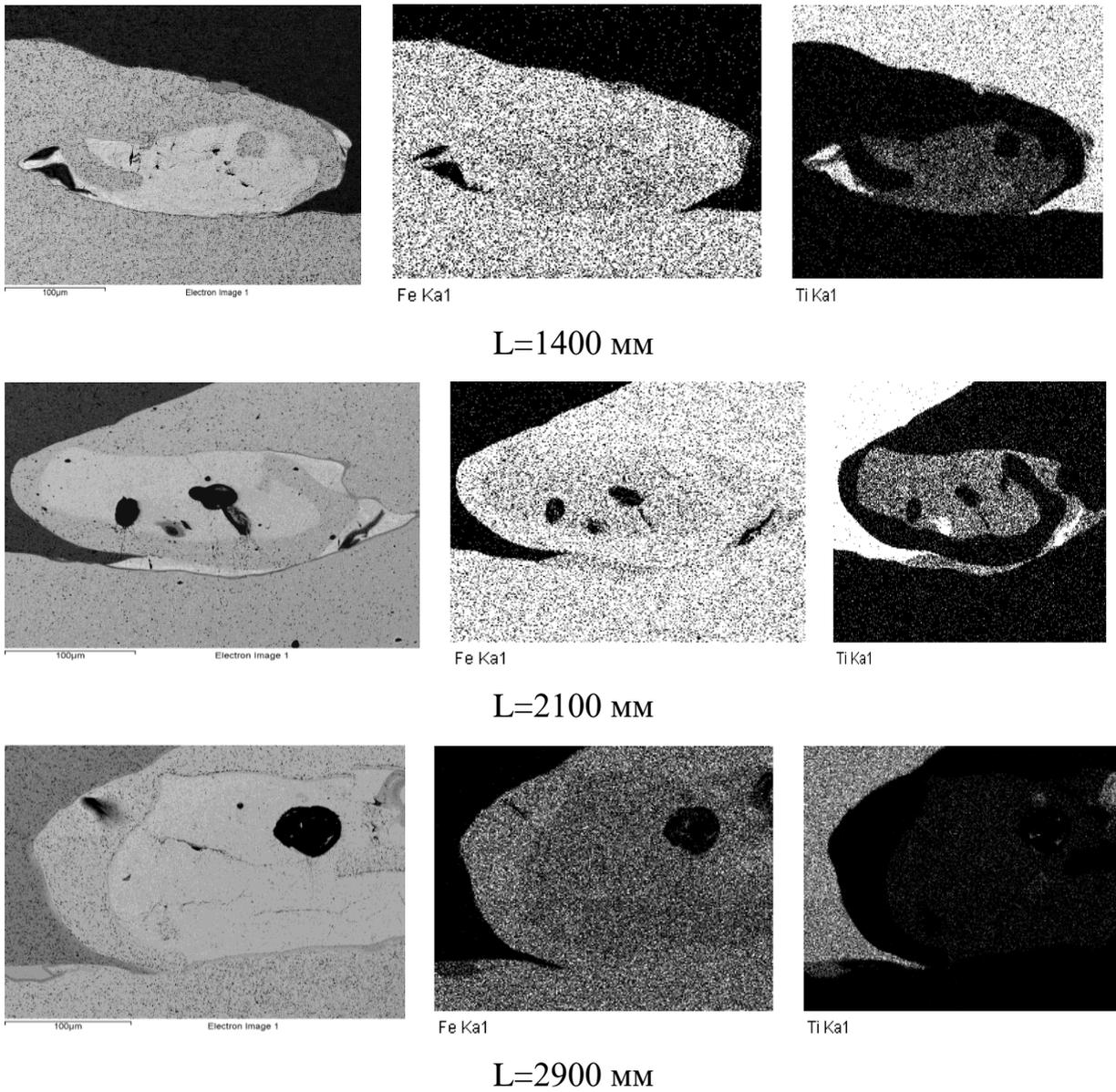


Рисунок 3.25 – Характерная карта распределения элементов в литом включении на расстоянии L от точки инициирования [190].

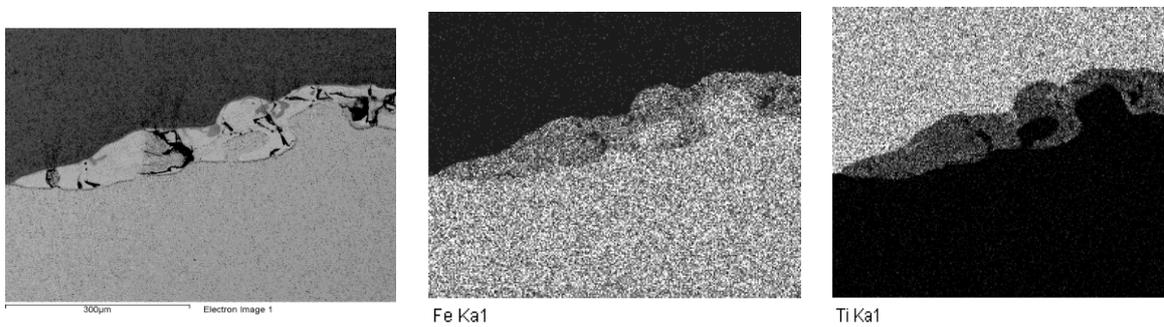
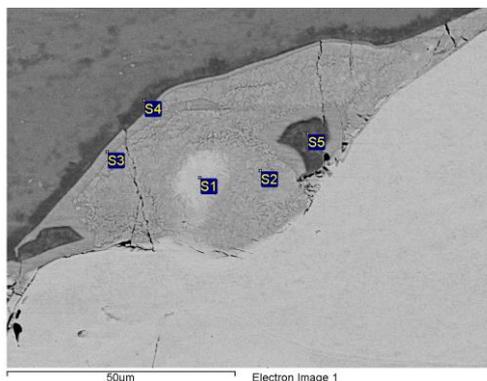


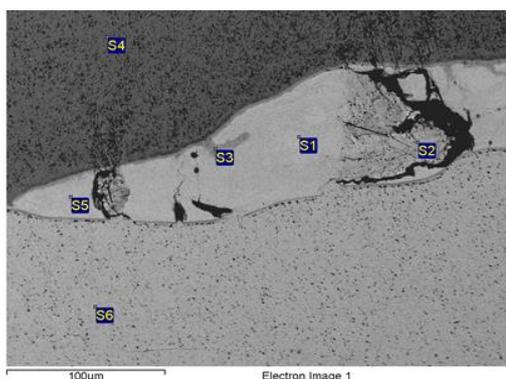
Рисунок 3.26 – Характерная карта распределения элементов в литом включении в зоне полупривара.

Микроанализ включений на участках пониженной прочности (**зоне полупривара**) показал, что кроме интерметаллидов в составе включений зафиксирован кислород, что предполагает наличие оксидов (рисунок 3.28). Включения расположены практически непрерывно вдоль поверхности соединения, определяя низкие прочностные свойства этого участка биметалла.



Spectrum	C	Si	Ti	Mn	Fe
S1	7.10	0.60	33.40		58.91
S2	4.81		47.79	1.00	46.41
S3	4.11		66.95		28.94
S4	3.96		96.04		
S5	1.93		98.07		

Рисунок 3.27 – Характерный локальный элементный состав включений в зоне соединения [195].



Spectrum	O	Si	Ti	Mn	Fe
S1		0.48	30.30	1.05	68.17
S2	2.42	0.50	29.12	1.30	66.66
S3	2.71		56.93		40.36
S4			100		
S5		0.58	33.85	0.97	64.60
S6		0.65		1.71	97.64

Рисунок 3.28 – Характерный локальный элементный состав включений в зоне полупривара [195].

Из зоны «непривара» (дефект сплошности на рисунках 3.17 и 3.18) был вырезан фрагмент размером 28x24 мм основного слоя из стали с покрытием, который был исследован на оборудовании ООО «Исследовательский инженерный центр конструкционных материалов «Прометей-Атом». На поверхности фрагмента был обнаружен сплошной слой интерметаллида, покрытого сетью трещин (рисунок 3.29). Толщина слоя со стороны железа в приконтактной зоне превышает 200 мкм. Вид поверхности разрушения и результаты локального элементного состава представлены на рисунке 3.30. В зоне не-

провара – «Спектр 1» - элементный состав близок к составу интерметаллида со стехиометрией FeTi, видны многочисленные трещины. Методом EBSD интерметаллидная фаза была идентифицирована как FeTi кубической сингонии с параметрами решетки $a=3,18$, $b=3,18$, $c=3,18$. Изображение решения дифракционной картины (Кикучи-линий с наложенными на них положениями кристаллографических плоскостей, соответствующих указанному соединению, приведенных в базе данных PDF-4), представлено на рисунке 3.30 б.

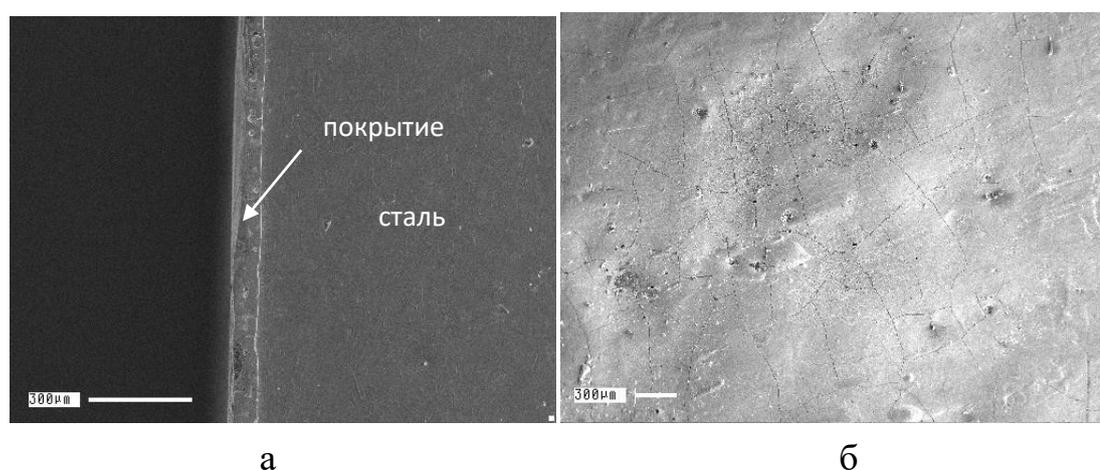
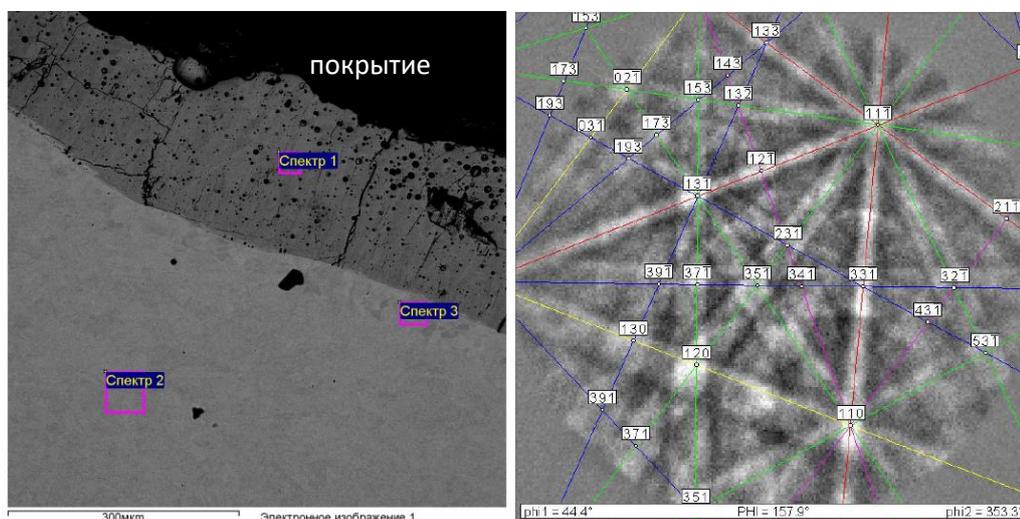


Рисунок 3.29 – Покрытие в зоне несплошности на поверхности стали 09Г2С: поперечный шлиф (а), поверхность стали (б).

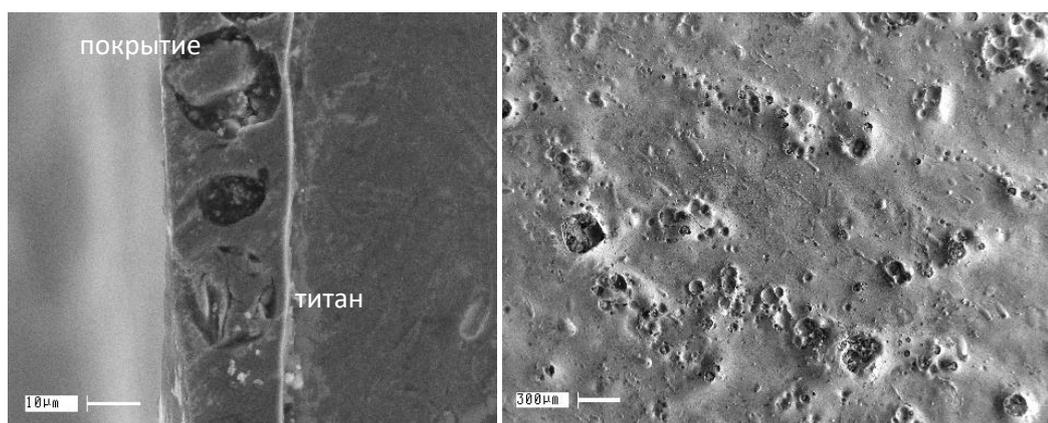
На фрагменте плакирующего слоя из титана из зоны «непривара» обнаружено покрытие толщиной 20-50 мкм (рисунок 3.31). Внешний вид покрытия аналогичен покрытиям, выявленным в [69] на поверхности ловушек, при сварке взрывом стали и титана с заполнением сварочного зазора воздухом (см. глава 2, рис. 2.4 а). Рентгенофазовый анализ покрытия (рисунок 3.32 а) выявил сложную рентгенограмму, на которой нет пиков металлического титана, т.е. покрытие достаточно толстое. Выявлен смешанный карбид-нитрид титана (обозначено стрелками). Наиболее сильная линия с межплоскостным расстоянием 2,19 ангстрем характерна для некоторых нитридов титана, кубическая фаза с параметром $a=0,3694$ нм. Для сравнения провели рентгенофазовый анализ поверхности титана с обратной стороны фрагмента и

установили, что все пики принадлежит фазе металлического титана, имеет место преимущественная ориентация (текстура) с преобладанием ориентации блоков типа $\langle 0001 \rangle$ (рисунок 3.32 б).



Спектр	Si	Ti	Mn	Fe
Спектр 1	0.41	46.93	0.70	51.96
Спектр 2	0.60		1.51	97.89
Спектр 3	0.70		1.84	97.46

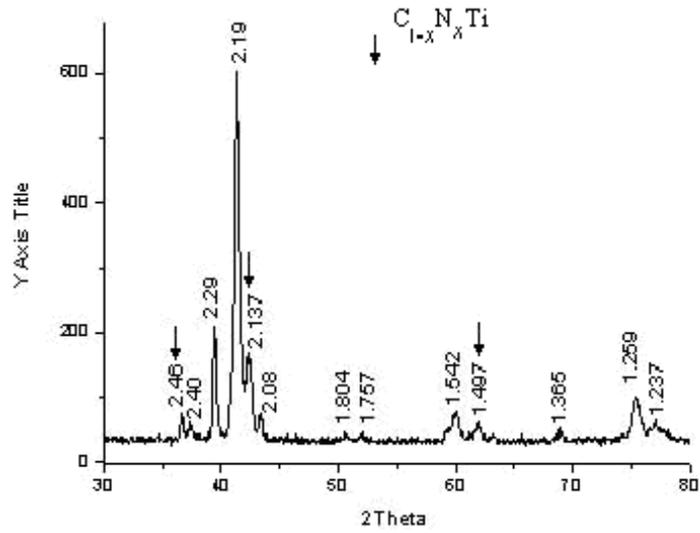
Рисунок 3.30 – Микроструктура дефекта со сплошным слоем интерметаллида FeTi. Локальный элементный состав по сечению в зоне интерметаллида (а) и дифракционная картина интерметаллида FeTi (б). (Данные ООО «Исследовательский инженерный центр конструкционных материалов «Прометей-Атом»).



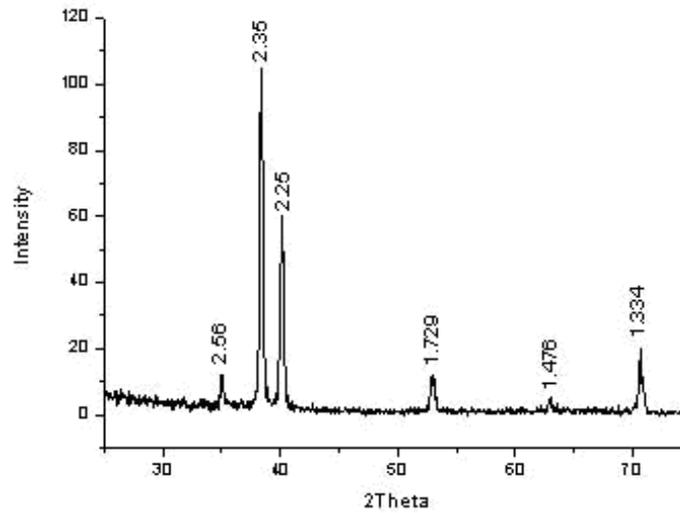
а

б

Рисунок 3.31 – Микроструктура покрытия в зоне несплошности на поверхности титана: шлиф (а), поверхность (б).



a



б

Рисунок 3.32 – Рентгенофазовый анализ поверхности в зоне несплошности на поверхности титана: после сварки взрывом (а), исходное состояние (б).

Отметим, что участки непроваров и пониженной прочности располагаются около сварных швов плакирующего слоя, где возможны резкие колебания сварочного зазора из-за местной деформации листа при электродуговой сварке карты из титана. При заполнении сварочного зазора аргоном в этих зонах не происходит полной замены воздуха, наличие которого приводит к возгоранию титана и локальному повышению температуры в этих зонах и, как следствие, к расплавлению свариваемых поверхностей на глубину 50-80

мкм, прекращению процесса волнообразования. Прочность этих зон падает до нуля из-за наличия сплошной полосы интерметаллидов.

3.5 Выводы по главе

1. При сварке взрывом титана с титаном:

- На воздухе и в активных газах (кислороде, азоте) в литых включениях наблюдается образование пор и резкое повышение твердости за счет реакции расплавленного титана с кислородом и азотом с образованием оксидов и нитридов титана. Установлено, что с увеличением скорости детонации растут размеры вихревых зон, в которых образуются поры.

- Заполнение сварочного зазора инертными газами (аргоном, гелием) исключает образование пор и структурных неоднородностей с высокой микротвердостью в литых включениях.

2. Исследование структуры и прочностных свойств соединения слоёв в различных зонах по площади двухслойного листа сталь+титан размерами 30(25+5)x3300x3700 мм после сварки взрывом с заполнением сварочного зазора аргоном и последующих технологических переделов (термообработки, правки) показало, что принятая технология обеспечивает стабильность процесса образования соединения слоёв с прочностью не менее 300 МПа по всей поверхности листа. В зонах прилегающих к дефекту сплошности, и зоне полупривара, зафиксированного УЗК, прочность соединения не превышает 150 МПа.

3. Установлено, что в случае отсутствия дефектов сплошности соединения по данным ультразвукового контроля правомерно относить результаты испытаний прочности соединения на образцах, отобранных из конечных участков крупногабаритного листа, на всю его поверхность. Рекомендовано ультразвуковой контроль сплошности соединения проводить при настройке прибора по плоскодонному отверстию D5 мм и отмечать участки, в которых фиксируются шумы вблизи браковочного уровня. Эти участки дополнительно контролировать при настройке по отверстию D3,5 мм.

4. На основании комплекса исследований структуры и свойств биметаллических модельных образцов сталь+титан выявлено, что газовая среда в сварочном зазоре при сварке взрывом оказывает ключевое влияние на структуру зоны соединения слоев. Показано, что усредненная толщина литых включений при сварке взрывом титана со сталью в среде аргона практически не зависит от длины листа.

5. Установлено, что при сварке взрывом стали с титаном в среде аргона появление дефектов сплошности и зон пониженной прочности с литыми включениями из оксидных и интерметаллидных соединений обусловлено неполным вытеснением воздуха инертным газом аргоном вследствие возможных колебаний величины сварочного зазора из-за местной деформации листа при электродуговой сварке плакирующего листа из титана.

4. Деформация крупногабаритных листов при сварке взрывом

Сварка взрывом крупногабаритных листов производится на песчаных опорах. В процессе сварки взрывом листы деформируются, при этом выделяют три вида деформаций: прогиба, растяжения и узких граней [36]. Деформации прогиба могут быть устранены последующей правкой листов. Деформации растяжения приводят к неисправимым изменениям габаритных размеров листов, а также образованию трещин и разрушений [1]. При этом утверждается, что удлиняется и основной и плакирующий листы [62, 196]. Учитывая, что работы по производству биметалла должны проводиться круглогодично, в том числе при отрицательных температурах, исследование процесса деформации листов для создания технологических основ актуально.

4.1 Экспериментальное исследование процессов деформации основного и плакирующего слоев крупногабаритных листов

Для выявления особенностей деформации листов в процессе сварки взрывом провели эксперимент, в котором совместили окончание плакирующего листа с окончанием основного листа, инициирование заряда ВВ происходило с противоположной стороны (рисунок 4.1) [61, 197].

Эксперимент проводился на листах: метаемый лист толщиной 4 мм, материал листа сталь 08Х18Н10Т, толщина листа основания составляла 26 мм, длина листа - 5900 мм, материал листа основы – сталь 09Г2С.

Соотношение толщины основного и плакирующего слоя от 3:1 до 10:1. В качестве заряда использовали смесь микропористой аммиачной селитры с дизельным топливом в соотношении 96:4. Инициирование заряда проводили из одной точки с центра листа или со середины узкой грани листа. Замер полученных баз производили с точностью 0,1 мм дважды: до и после сварки взрывом [61, 197]. Величину продольных остаточных деформаций оценивали по зависимости:

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \frac{L_{\text{общ}} - L'_{\text{общ}}}{L_{\text{общ}}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

где $L_{\text{общ}}$, $L'_{\text{общ}}$ – длина листа до и после сварки взрывом.

На торцах основного листа были нанесены метки на расстоянии 50 и 100 мм от края листа, а на поверхности плакирующего листа были сделаны насечки на таком же расстоянии. Метки на торец наносили ударным методом, на поверхность плакирующего листа методом царапания и несмываемой краской. Эксперимент показал, что в процессе сварки взрывом происходит удлинение основного листа на 25 мм, а метаемый лист остался той же длины, что и до сварки взрывом (рисунки 4.2 б–в). Это хорошо видно на фотографии, где на рисунке 3, а положение листов до сварки, торцы листов совмещены. После сварки на фотографии (рисунок 4.2 б) видим, что плакируемый лист стал длиннее плакирующего на 25 мм. Торцец основного листа удлиняется по всей ширине одинаково (рисунок 4.2 з) [61].

Эти опыты подтвердили правомерность определения продольных остаточных деформаций по изменению расстояния между метками. Таким образом, деформация растяжения (сдвига) основного слоя идёт по всей толщине основного листа, а плакирующий лист в изученном диапазоне толщин не претерпевает деформации удлинения [61, 197].

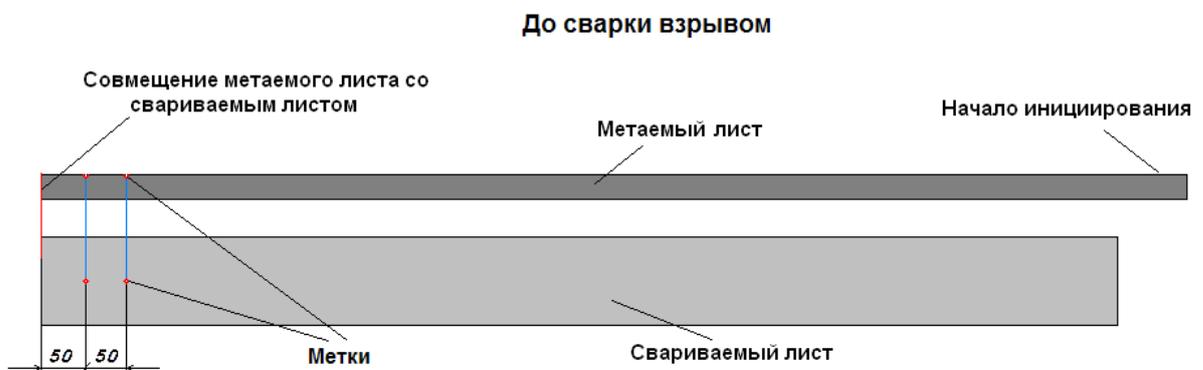


Рисунок 4.1 – Схема выявления особенностей деформации листов после сварки взрывом [61]

Указанная деформация приводит к удлинению листов и уменьшению их толщины, что необходимо учитывать при промышленном производстве двухслойных листов, а именно: заказывать листы с заранее увеличенными размерами толщины приблизительно от 1 мм [61].

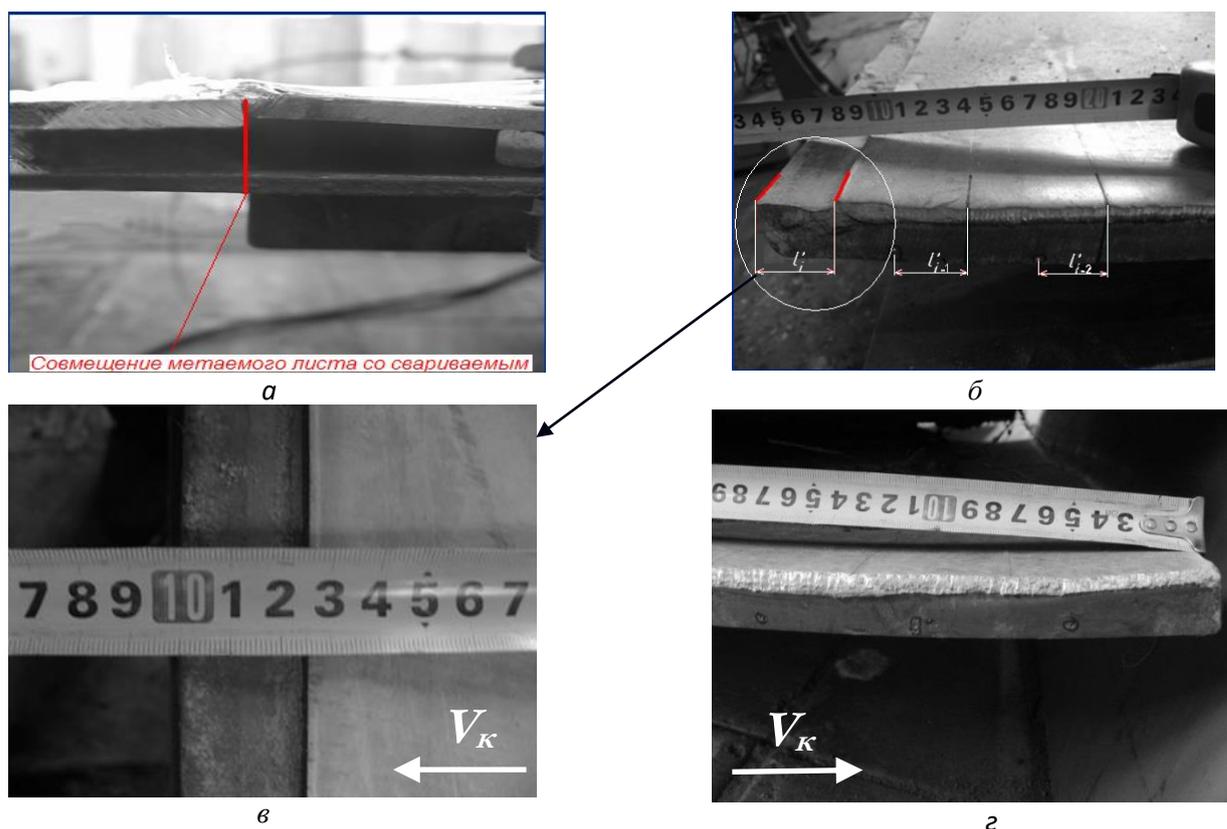


Рисунок 4.2 – Фотографии эксперимента с совмещёнными торцами плакирующего и основного слоя до и после сварки взрывом: до сварки взрывом (а); после сварки взрывом (б); вид сверху полученного удлинения (в); торец основания после сварки взрывом (г) [61, 198].

Результаты этих экспериментов совпадают с результатами компьютерного моделирования изменения геометрической формы изделия после сварки взрывом [199, 200]. Процесс сварки взрывом осуществляется в системе, включающей метаемый плакирующий лист, неподвижный основной лист, заряд ВВ и песчаное основание. Входящие в рассматриваемую систему тела имели следующие геометрические размеры: плакирующий лист 4x1500x6000 мм, основной лист 26x1400x5900 мм, технологический (сварочный) зазор 8 мм, заряд ВВ 50x1500x6000 мм, песчаное основание 100x1400x5900 мм.

Были заданы следующие характеристики физико-механических свойств материала стальной пластины: плотность $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$; модуль Юнга $E = 192 \text{ ГПа}$; предел текучести $\sigma_T = 350 \text{ МПа}$; временное сопротивление $\sigma_B = 500 \text{ МПа}$; относительное удлинение $\delta = 21\%$; коэффициент термического

расширения $\alpha = 11,4 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (при 100°C). Взрывчатое вещество имело заданную насыпную плотность $\rho_{\text{ВВ}} = 740 \text{ кг/м}^3$ и скорость детонации $D = 2100 \text{ м/с}$. Песок - $\rho_{\text{пес}} = 2800 \text{ кг/м}^3$ и прочность при сжатии $\sigma_{\text{сж}} = 140 \text{ МПа}$ [199].

Моделирование было выполнено в Пензенском государственном университете с помощью многоцелевой программы LS-DYNA [201] с использованием конечно-элементной сетки [202] для следующих вариантов:

1) основной и плакирующий листы рассмотрены как твёрдое тело со свойствами стали, технологический зазор (вакуум), пористый грунт;

2) плакирующий лист в процессе метания, ведёт себя как жидкость, основной лист - как твёрдое тело со свойствами стали, технологический зазор (вакуум), пористый грунт.

Для описания поведения материалов с учетом уравнения состояния были использованы: модель Джонсона-Кука для плакирующего и основного листов при 1 варианте моделирования для основного листа при 2 варианте; модель Уилкинса – Гейроуха для взрывчатого вещества. Для описания поведения песка и материала плакирующего листа при 2 варианте моделирования была использована модель пористого материала NULL с учетом уравнения состояния. Определено, что удлинение листов неоднородно по всей длине: максимальное значение деформации растяжения достигается на максимальном удалении от точки инициирования. В варианте 1 удлинение плакирующего листа больше, чем основного (61 и 71 мм соответственно). В варианте 2 при отсутствии сдвиговых напряжений плакирующий лист не удлиняется, в то время как удлинение основного листа составляет 30 мм [199]. Таким образом, прогнозирование деформации растяжения по варианту 2 хорошо согласуется с экспериментальными наблюдениями для двухслойных листов близких размеров. При этом характер деформационного процесса и фактическое изменение длины листов будут зависеть от размера и механических свойств исходных заготовок, их взаимного расположения, типа ВВ и размера зазора.

Методом меток (рисунок 4.3) исследовали деформацию растяжения крупногабаритных листов промышленных размеров при производстве двух-слойного листа с основой марки 09Г2С, 12ХМ и плакирующим листом марки Тр321, Тр316Тi ASTM А240 [61, 198].

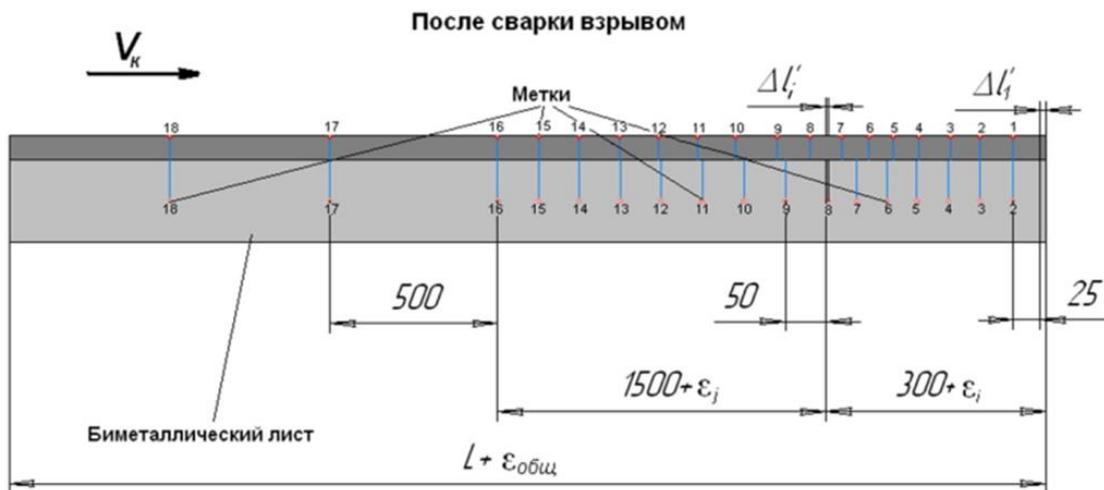
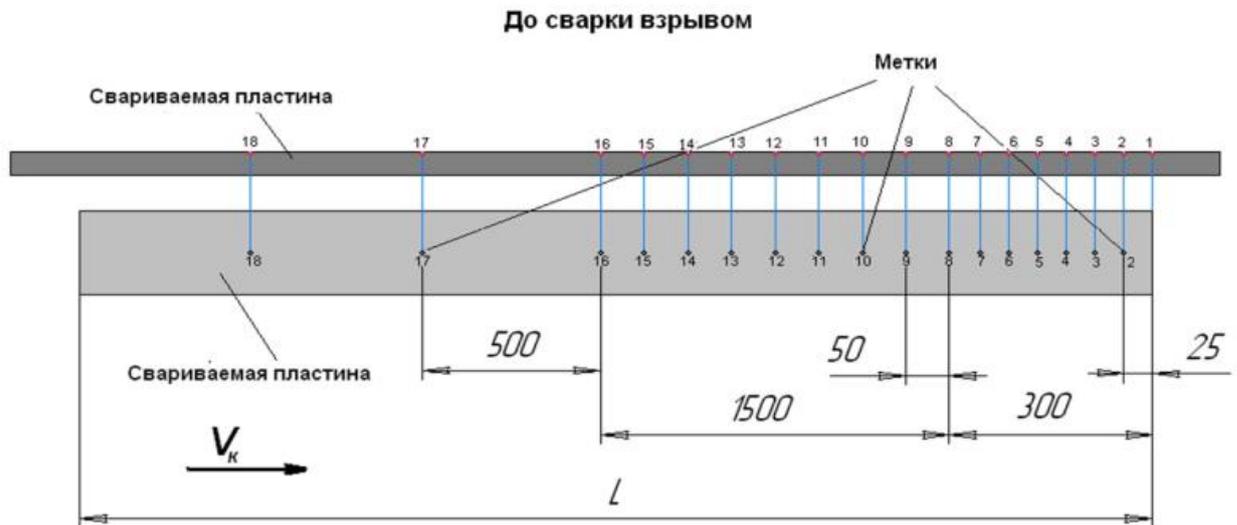


Рисунок 4.3 – Методика выявления деформации листов. Схема положения меток до (а) и после сварки взрывом (б). Направление скорости точки контакта V_k указано стрелкой [61, 198].

На верхнюю плоскость метаемых и боковые поверхности неподвижных пластин до сварки наносили метки в собранном пакете с шагом 50 мм на расстоянии 1800 мм, в зоне окончания сварки на длине 300 мм шаг уменьшали

до 25 мм, а также в месте окончания основного листа на плакирующем листе ставили насечку 1 (рисунок 4.3 *a*). На оставшейся длине листа метки наносили с шагом 500 мм. Используемая в экспериментах длина листов находилась в пределах от 4000 мм до 5900 мм, ширина - от 1400 мм до 2000 мм. [61, 198].

Вдоль и поперёк листа от края листа, где было окончание сварки, на расстоянии 25 мм проводили измерение толщины листа. Затем с шагом 50 мм на расстоянии 1500 мм от края листа проводили замеры толщины, а на оставшейся длине листа - с шагом до 500 мм. Толщину основного листа до сварки взрывом и двухслойного листа после измеряли ультразвуковым толщиномером марки УТ-301 с точностью до 0,01 мм. Кроме того, исследовали структуру металла в различных зонах основного листа [61].

Результаты исследований показали, что в зависимости от толщины листа имеется различное относительное удлинение $\varepsilon_{\text{общ}}$ этого листа после сварки взрывом (рисунок 4.4). Величина деформации растяжения зависит от длины плакируемого листа. При этом максимальное относительное удлинение $\varepsilon_{\text{общ}}^{\text{max}}$ наблюдается при соотношении 5,25 – 5,5 толщинах 20-22 мм, а при толщинах меньше или больше данной наблюдается уменьшение относительного удлинения [61, 198].

Исследован характер распределения продольных остаточных деформаций по длине сваренных взрывом крупногабаритных листов [176], определяемых как изменение расстояния от начала инициирования до одноимённых меток (*i*-базы) [61]:

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

где ε_i — величина продольной остаточной деформации от начала инициирования;

l_i и l'_i — размеры *i*-базы соответственно до и после сварки.

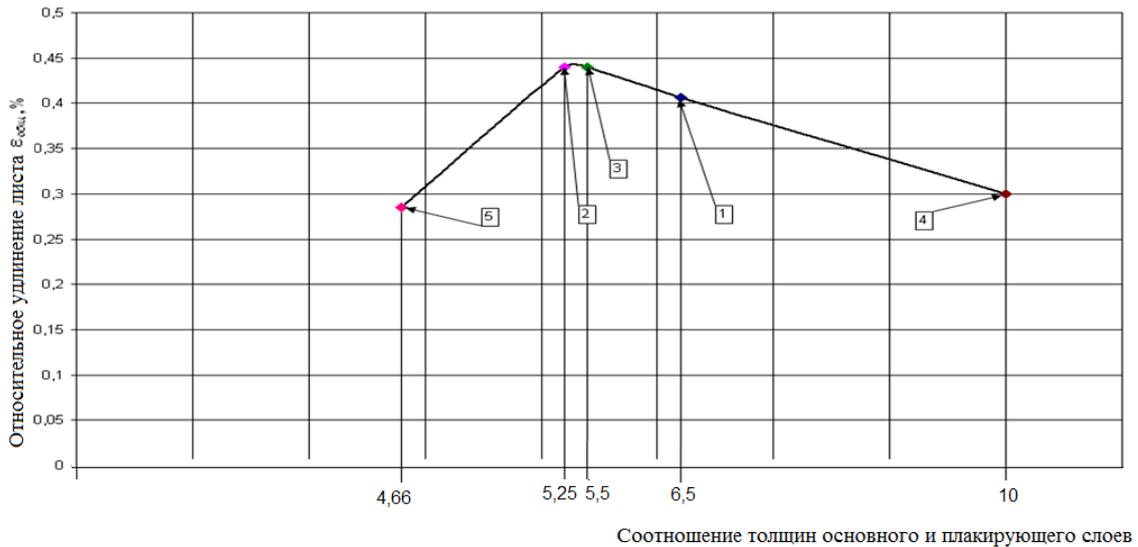


Рисунок 4.4 – График зависимости удлинения основного слоя от соотношения толщин основного и плакирующего слоев;

- 1–09Г2С+08Х18Н10Т, длина 5900 мм, толщина 30(26 +4) мм - 6,5
- 2–12ХМ+08Х18Н10Т, длина 5000 мм, толщина 25(21 +4) мм - 5,25
- 3–12ХМ+08Х18Н10Т, длина 5000 мм, толщина 26(22 +4) мм - 5,5
- 4–09Г2С+08Х18Н10Т, длина 4000 мм, толщина 44(40 +4) мм - 10
- 5–09Г2С+08Х18Н10Т, длина 5900 мм, толщина 17(14 +3) мм - 4,66

Анализ зависимостей показывает, что удлинение ε_i начинается не сразу после начала сварки взрывом (рисунок 4.5 а), а только с 78–82% от начала инициирования. Заметная деформация растяжения основного слоя по длине наблюдается в зоне окончания сварки на расстоянии 500-1150 мм от торца листа. При этом величина деформации возрастает по мере приближения к месту окончания сварки. После сварки взрывом длина листов увеличилась на 15-25 мм в зависимости от соотношения толщины основного и плакирующего слоя и расположения точки инициирования [61].

Относительное изменение расстояния между одноимёнными метками (рисунок 4.5 б) рассчитывалось по формуле

$$\varepsilon' = \frac{l' - l'_{i-1}}{l'} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

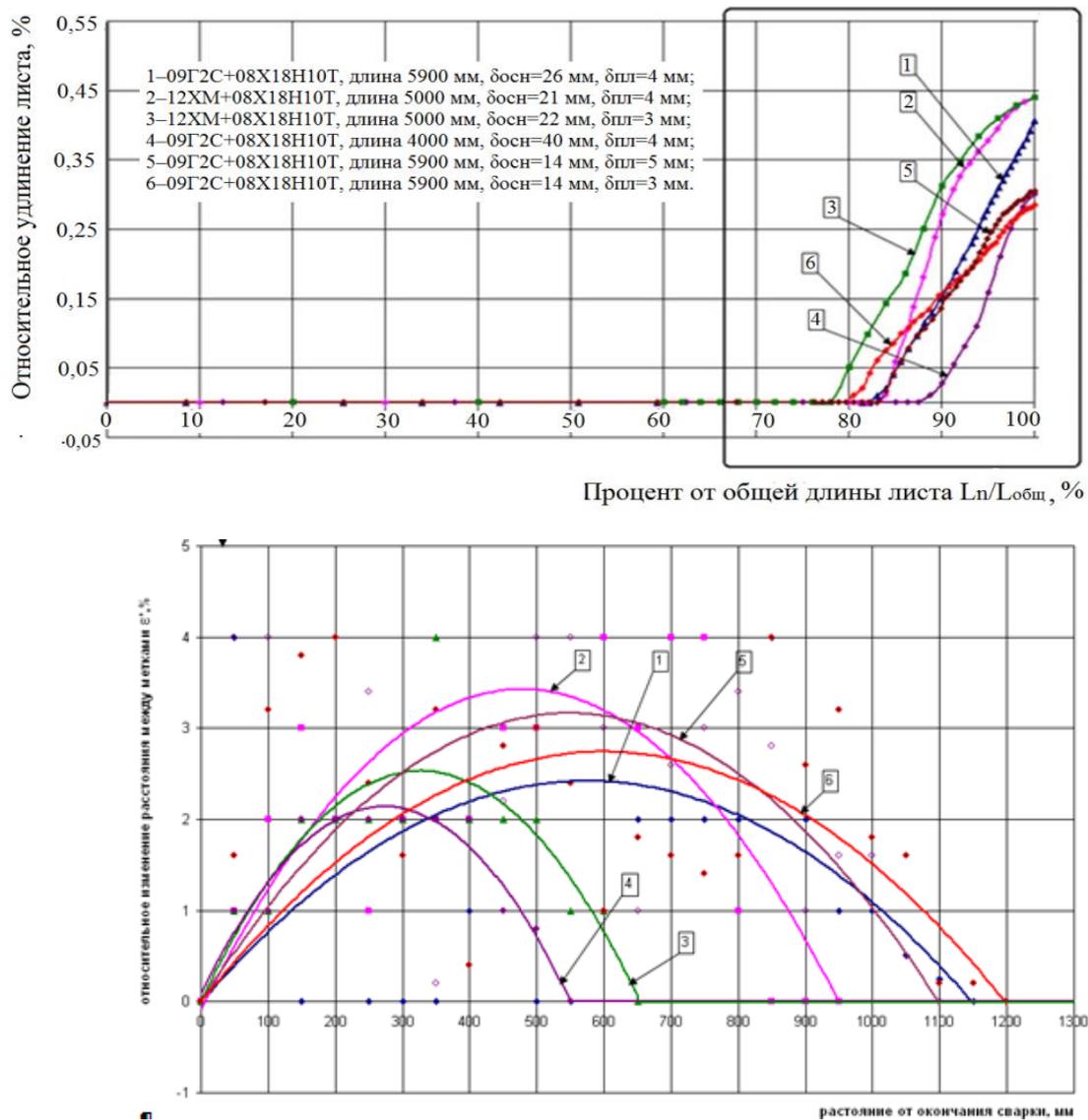


Рисунок 4.5 – Распределение удлинения основного слоя на листах: *a* – суммарное относительное удлинение листов от начала иницирования после сварки взрывом; *б* – относительное изменение расстояния между одноимёнными метками после сварки взрывом;

- 1-09Г2С+08Х18Н10Т, длина 5900 мм, δосн=26 мм, δпл=4 мм;
 2-12ХМ+08Х18Н10Т, длина 5000 мм, δосн=21 мм, δпл=4 мм;
 3-12ХМ+08Х18Н10Т, длина 5000 мм, δосн=22 мм, δпл=3 мм;
 4-09Г2С+08Х18Н10Т, длина 4000 мм, δосн=40 мм, δпл=4 мм;
 5-09Г2С+08Х18Н10Т, длина 5900 мм, δосн=14 мм, δпл=5 мм;
 6-09Г2С+08Х18Н10Т, длина 5900 мм, δосн=14 мм, δпл=3 мм.

Характер изменения удлинения конечного участка выглядит так: в начальный момент идёт увеличение изменения расстояния между метками $l'_{i-1} < l'_i$, до середины полного участка удлинения.

$$\Delta l'_i = l'_i - l'_{i-1} > 0 \quad (4.4)$$

Затем изменение расстояния между метками начинает уменьшаться, и последние изменения между метками становятся практически равными друг другу $l'_{i-1} \leq l'_i$.

$$\Delta l'_i = l'_i - l'_{i-1} \leq 0 \quad (4.5)$$

После соударения под углом метаемого листа с основным в основном листе формируются ударная волна и волна сжатия, которые распространяются в направлении сварки [61, 198]. Так как соударение идет непрерывно со скоростью точки контакта, напряжения на фронте волны сжатия постоянно растут. Фронт ударной волны доходит до торца противоположного начала процесса и должен отразиться в виде волны разгрузки. Однако распространение волны разгрузки не происходит из-за непрерывно набегающих ударных волн. По мере продвижения фронта сжатия напряжения в металле начинают превышать предел текучести, что приводит к пластической деформации растяжения материала в сторону свободной поверхности. Напряжения сначала растут (см. экспериментальную кривую, рис. 4.5 б). Затем, по мере реализации растяжения, напряжения начинают уменьшаться, и процесс растяжения постепенно затухает. Это соответствует графику изменения расстояния между метками на рисунке 4.5. Максимальное растяжение в основном происходит на середине участка растяжения и зависит от толщины основного металла.

Как видно на рисунке 4.6, резкое уменьшение толщины основного слоя совпадает с началом его интенсивного удлинения на расстоянии около 20% от конца листа. На конечных участках уменьшение толщины листа шириной 100 мм достигало 1-1,6 мм.

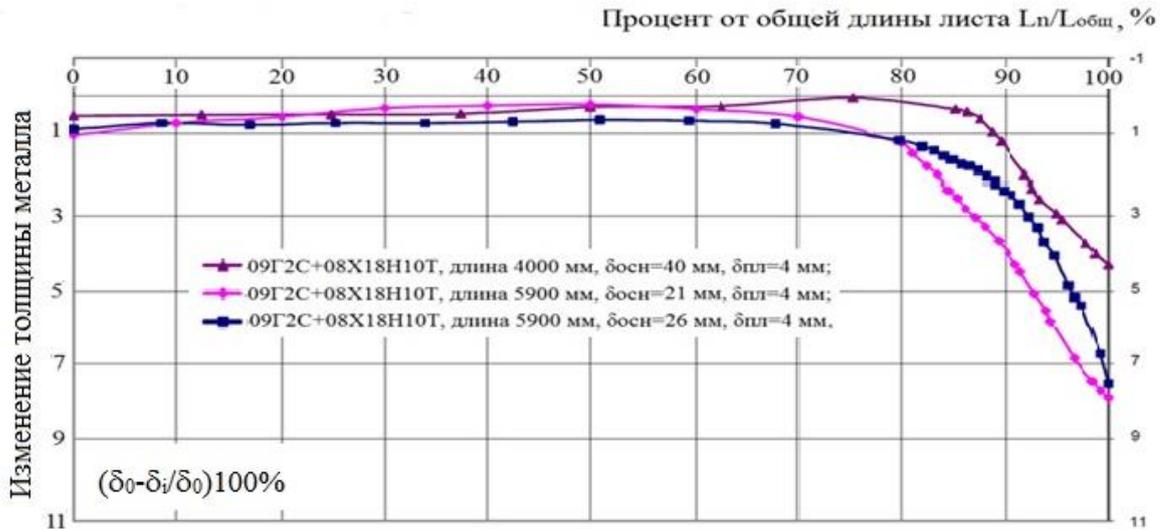


Рисунок 4.6 – Утонение листов в зависимости от первоначальной толщины листа [198].

В начальной зоне сварки взрывом структура металла основного слоя на глубине до 2 мм от границы соединения не выявлено изменений по сравнению с первоначальной структурой металла. В зоне окончания сварки взрывом, где наблюдается удлинение основного слоя, фиксируется измельчение зерна и выраженное вытяжение зерен в направлении сварки, что указывает на наличие деформации растяжения (рисунок 4.7).

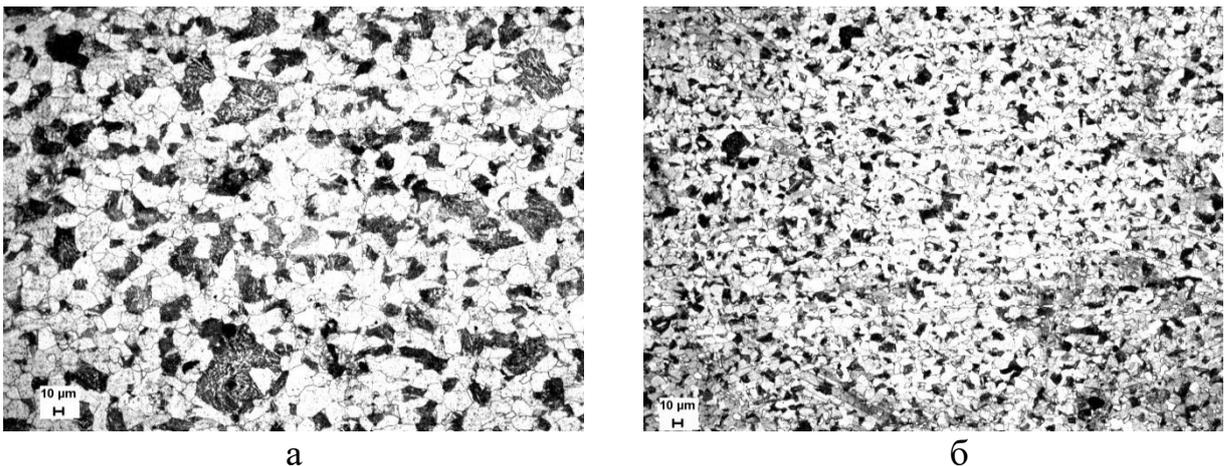


Рисунок 4.7 – Структура основного металла 09Г2С в начале (а) и в окончании (б) сварки взрывом листа размером 30 (26+4)×1400×5900 мм [198].

Таким образом, экспериментально, путем совмещения торцов основного и плакирующего листов до сварки взрывом установлено, что основной

лист после сварки взрывом удлиняется по сравнению с плакирующим листом на 15-40 мм в зависимости от его длины, толщины и режима сварки. При этом на начальном участке длиной не более 1000-1200 мм наблюдается деформация изгиба корытообразной формы в поперечном направлении.

Экспериментально, методом реперных точек, нанесенных на основной и плакирующий лист, установлено, что в процессе сварки взрывом крупногабаритных листов после прохождения точкой контакта примерно 80 % длины листа в основном листе появление деформации растяжения в направлении сварки, величина которой непрерывно возрастает до окончания сварки. Аналогичные данные были получены в работе [12] на образцах размером 50x500 мм. Однако в случае сварки взрывом крупногабаритных листов величина деформации растяжения плакирующего листа между одноименными реперными точками в несколько раз меньше, чем в основном листе.

4.2 Особенности деформации в краевых зонах листов с плакирующим слоем из титана

Биметалл сталь+титан используется для изготовления трубных решеток конденсаторов и другого ответственного оборудования. Как правило, промышленности требуются крупногабаритные заготовки шириной до 3,5 и длиной до 4 метров [203]. Производство такого биметалла включает следующие операции: подготовка поверхности, сборка пакета, непосредственно процесс сварки взрывом, термообработка и правка биметалла [204]. Сварка взрывом крупногабаритных листов осуществляется на открытых площадках (полигонах), в том числе в средней полосе России и на Урале. Температура воздуха в этих районах зимой нередко опускается до -20°C . Производственные опыты показали, что поведение титана в процессе сварки взрывом изменяется при отрицательных температурах окружающего воздуха [205]. В этих условиях на боковых кромках и в краевых зонах плакирующего листа после сварки взрывом наблюдаются обрывы «зубчатой формы» (рисунок 4.8 а) и система трещин (рисунок 4.8 б), а также вырывы в углах и в отдельных мес-

тах по кромке плакирующего слоя заготовки (см.рис.1.10). Вырыв плакирующего слоя на конечных участках заготовок, наблюдается на расстоянии до 100 мм от края.

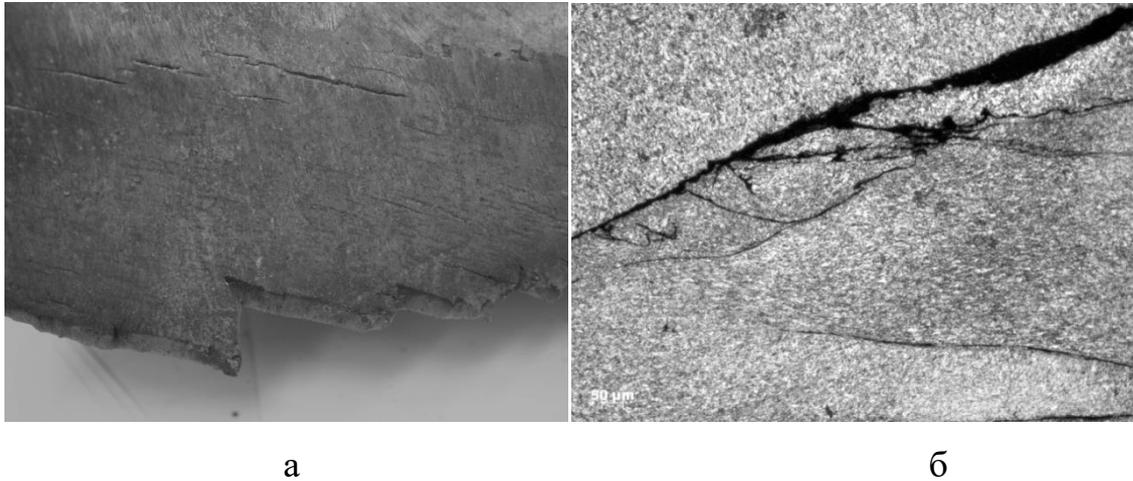


Рисунок 4.8 – Микроструктура краевых зон после сварки взрывом: зубчатый скол (а) и трещины (б) плакирующего слоя [205].

Известно, что титан не имеет порога хладноломкости, в то же время при сварке взрывом в этих же условиях аустенитных и ферритных сталей, имеющих порог хладноломкости, подобные эффекты не отмечены. В связи с этим исследованы особенности поведения титана в условиях отрицательных температур и высокоскоростных деформаций [205, 206]. Исследования проводили на двухслойных листах марки сталь 09Г2С + титан ВТ1-0, полученных методом сварки взрывом в среде аргона по параллельной схеме сварки, размерами 3250×3700 мм, толщиной 30 мм (25+5мм). Сравнивались листы биметалла, сваренные при температурах +15, –15 °С по следующим показателям:

- Наличие остаточных деформаций, определяемое методом реперных меток, наносимых на боковую поверхность основного листа из низколегированной конструкционной стали и поверхность плакирующего листа из титана по схеме рисунка 4.3 а.
- Результаты механических испытаний на отрыв плакирующего слоя и ультразвукового контроля сплошности соединения.

- Результаты исследования структуры в зонах, прилегающих к местам обрывов титана.

Произведён расчёт параметров в области УСГ в сварочном зазоре в зоне установившейся сварки и краевых зонах, определение протяжённости УСГ, сравнение данных расчёта с экспериментом и результатами опубликованных работ.

После сварки взрывом проводили измерения от начала сварки до каждой реперной метки (рисунок 4.9) и между реперными метками (рисунок 4.10). Полученное значение относили к расстоянию между метками до сварки взрывом на рассматриваемом участке.

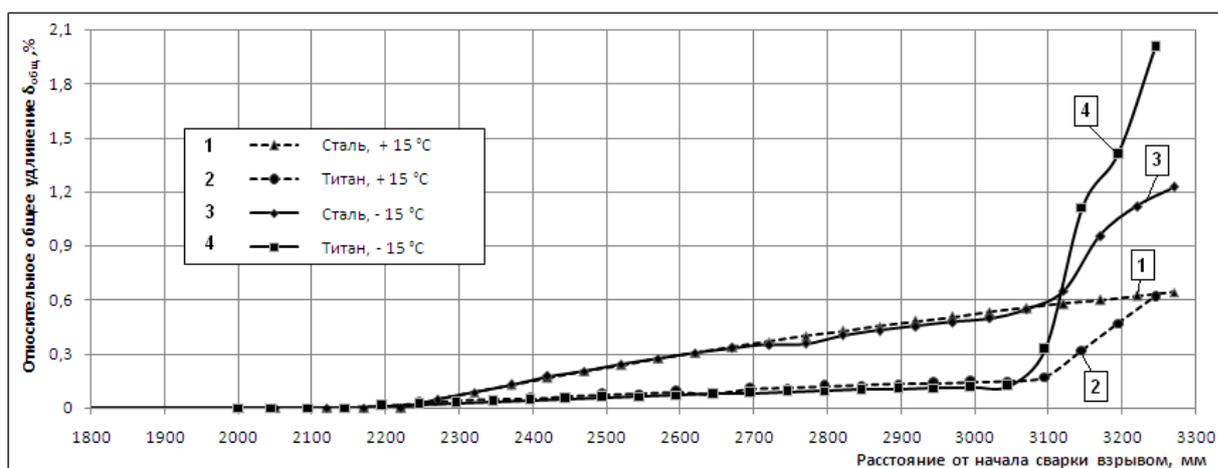


Рисунок 4.9 – Изменение относительной деформации удлинения вдоль основного (сталь) и плакирующего листов (титан) от начала инициирования [205, 206].

При сварке титана со сталью в зависимости от температуры окружающего воздуха выявлена различная общая деформация удлинения как основного листа из стали, так и плакирующего листа из титана (рисунок 4.9). На расстоянии 2100 мм от начала сварки взрывом деформации удлинения листов не наблюдается. Затем начинается удлинение листа основного металла, что фиксируется по изменению расстояний от начала сварки до текущей реперной точки (кривая 1 и 3), и связано, по-видимому, с движением массы листа впереди точки контакта. Удлинение плакирующего листа незначительное и может быть связано с влиянием на общую деформацию удлинения основного

листа. На конечных участках сварки (150 мм от окончания листа) наблюдается резкий рост общего относительного удлинения плакирующего листа из титана до $\delta_{\text{общ}} = 0,6\%$ (при $t = +15^\circ\text{C}$, кривая 2) и до $\delta_{\text{общ}} = 2\%$ (при $t = -15^\circ\text{C}$, кривая 4). Эти данные свидетельствуют о том, что на конечном участке сварки плакирующий лист, так же как и основной лист, начинает удлиняться до воздействия взрыва, т.е. до осуществления непосредственно процесса детонации. Несовпадение графиков свидетельствуют о разной скорости продольной деформации основного и плакирующего листов впереди точки контакта.

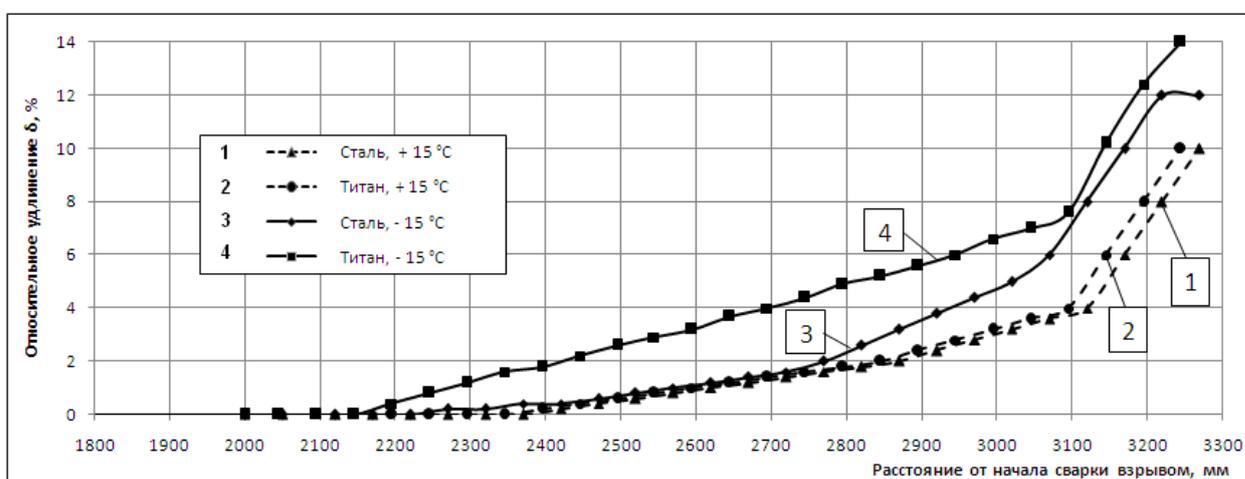


Рисунок 4.10 – Изменение относительной деформации удлинения участков между реперными метками по длине листа [205].

Как видно из рисунка 4.9 и таблицы 4.2 на процесс удлинения существенное влияние оказывает температура окружающего воздуха перед сваркой взрывом. Величина относительного удлинения растет с понижением температуры окружающей среды. В абсолютных величинах удлинение плакирующего листа толщиной 5 мм при температуре -15°C составило 65 мм (при исходной длине 3250 мм).

Изменение относительного удлинения участков между реперными метками (рисунок 4.10) при положительной температуре происходит одновременно для основного и плакирующего слоя, увеличиваясь до $\delta = 10\%$ на ко-

нечном участке сварки (кривая 1 и 2). Деформация основного и плакирующего листов при отрицательной температуре идет с разной скоростью, увеличиваясь до $\delta = 14\%$ на конечном участке сварки (кривая 3 и 4).

Механические испытания на отрыв плакирующего слоя, проведенные по методике ТУ 5.961-11917-2007, не выявили существенных отличий для биметаллов, полученных при отрицательных и положительных температурах окружающей среды (см. табл. 4.2). Предел прочности находится в пределах 255 – 350 МПа, что соответствует требуемому качеству биметалла (не менее 150 МПа). Ультразвуковой контроль сплошности соединения не выявил отслоений. Дефектами биметалла, полученного при отрицательных температурах, было уменьшение толщины биметалла за счет утонения и удлинения плакирующего слоя, трещины и вырывы на конечных участках сварки (см. рис. 1.10).

Таблица 4.2 – Результаты измерений относительного удлинения и прочности на отрыв плакирующего слоя при разных температурах [205].

Температура воздуха, °С	Относительное удлинение плакирующего листа из титана на конечном участке сварки		Предел прочности на отрыв плакирующего слоя, $\sigma_{отр}$, МПа
	$\delta_{общ}$, %	δ , %	
+25	0,6	10	300 - 350
+15	0,6	10	250 - 345
+10	0,6	10	255 - 340
-5	1,5	13	300 - 340
-15	2,0	14	258 - 345
- 17	2,0	14	255 - 342

В структуре титана в зоне вырывов выявлены двойники в зернах и полосы адиабатического сдвига, переходящие в систему трещин, имеющих разную направленность и создающих пересечения в виде сетки из полос и тре-

щин (рисунок 4.8 б). Такие структуры характерны для высокоскоростных деформаций и явлений откола [207, 208] и были выявлены нами также при сварке взрывом цилиндрических заготовок из титана с медью [209, 210].

Таким образом, при сварке взрывом крупногабаритных листов титана BT1-0 со сталью 09Г2С размерами 30x3250x3700 мм выявлена интенсивная пластическая деформация удлинения как плакирующего листа из титана, так и основного листа из стали на конечных участках сварки. Установлено, что температура окружающей среды, при которой проводится процесс сварки взрывом, влияет на величину деформации удлинения [205, 206].

Для анализа результатов исследований биметаллических модельных образцов на одном графике совместили результаты экспериментального определения глубины оплавления, деформаций, волновой структуры соединения (рисунок 4.11).

В зоне стабильного процесса сварки взрывом протяжённостью 2000-2200 мм отсутствует деформация растяжения основного и плакирующего слоя, наблюдается стабильное волнообразование с высотой волн $0,17 \pm 0,08$ мм, глубиной оплавленного слоя примерно 20 мкм и прочностью соединения свыше 300 МПа.

На конечных участках сварки от 3100 до 3280 мм наблюдается резкий рост деформации растяжения плакирующего и основного слоя. Это приводит к нарушению процесса волнообразования и появлению в узкой зоне (шириной 30-80 мм) потягов, трещин и срывов плакирующего слоя. Глубина оплавления снижается, а прочность соединения остаётся высокой и практически не изменяется по длине и ширине листа. Температура окружающей среды, при которой проводится процесс сварки взрывом, влияет на величину деформации удлинения [206]. Длина участков интенсивного растяжения, изменения высоты волны составляет 150 мм, что соизмеримо с протяжённостью области ударно сжатого газа для заданных габаритов листа (см. рис. 2.9).

Таким образом, причиной резкого роста деформации растяжения плакирующего и основного слоя, приводящего к потягам, трещинам и вырывам плакирующего слоя после сварки взрывом крупногабаритных листов, является резкое падение параметров УСГ (давления и температуры) на конечных участках сварки [205].

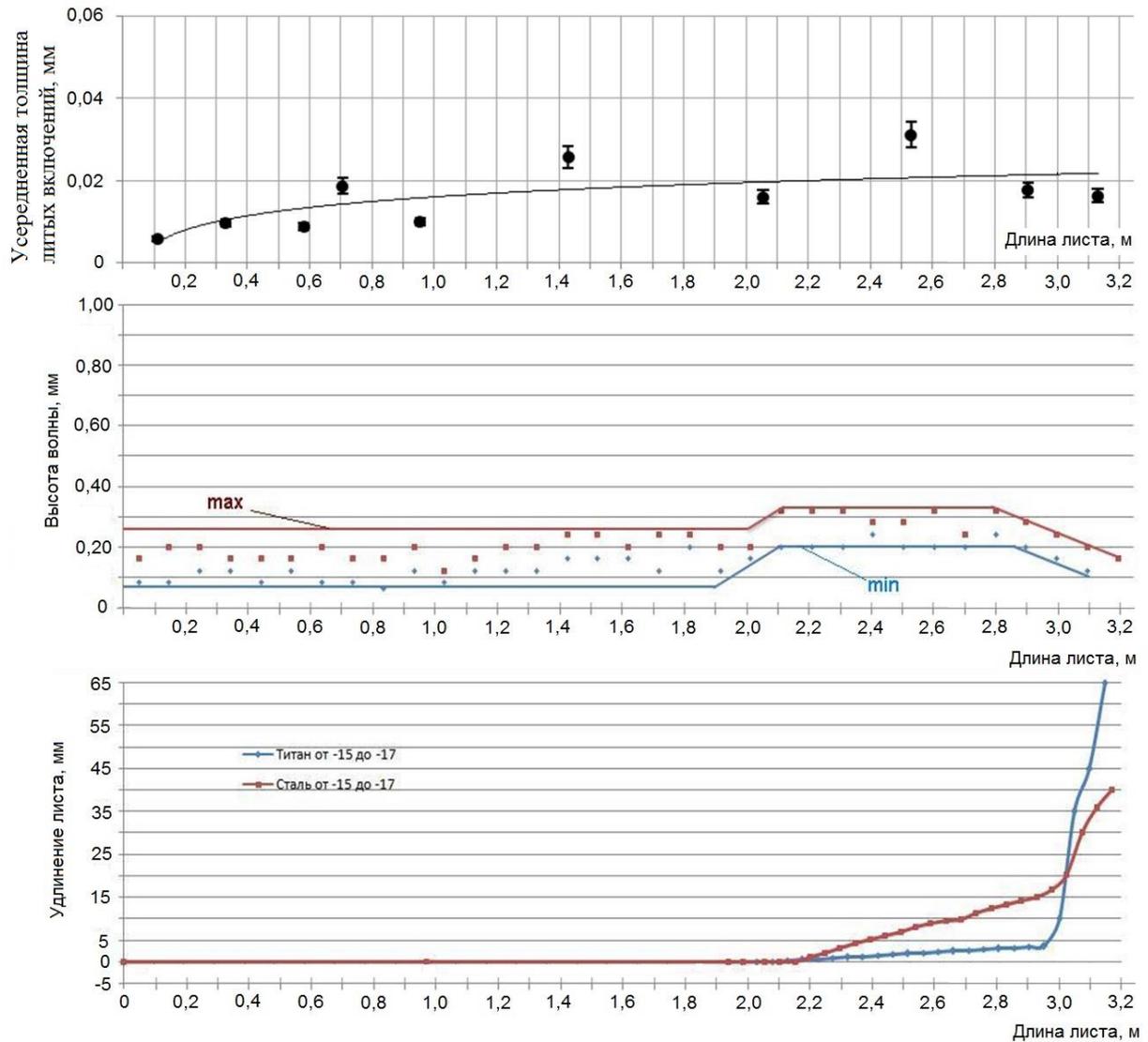


Рисунок 4.11 – График изменения по длине листа: усреднённой толщины литых включений с удалением от начала процесса сварки (а) и размеров волн в соединении по длине макрошлифа (б), удлинения основного и плакирующего слоев (в) [206].

Результаты расчета протяженности области ударно-сжатого газа в сварочном зазоре соответствуют длине зоны интенсивной пластической деформации титана ВТ1-0 на конечных участках сварки. На основании этого поло-

жения даны рекомендации по обеспечению стабильности процесса сварки взрывом в краевых зонах, исключая образование вырывов при ведении процесса сварки взрывом при отрицательных температурах окружающей среды (п.5.4).

4.3 Анализ результатов исследований процессов деформации

Рассмотрим процесс деформации основного листа в процессе сварки взрывом, который начинается с узкого края листа [61, 196]. После соударения в основном листе формируются две волны: упругая волна и пластическая волна сжатия, которые движутся в направлении сварки [61]. Упругая волна идет со скоростью звука в металле C_L . Пластическая волна сжатия - со скоростью $C_0 < C_L$. В начальный момент напряжение на фронте волн сжатия и упругой меньше $\sigma_{\text{крит}}$, т.е. меньше предела текучести для данного материала. Так как соударение в точке контакта идет непрерывно со скоростью V_k в основном листе формируется непрерывный поток ударных (упругих) волн и волн сжатия. В связи с этим отражение от нижней поверхности основного листа и верхней поверхности не рассматривается. Напряжение в волнах упругих и сжатия непрерывно нарастает. После формирования волны сжатия впереди точки контакта соударение идет по напряженному листу. Экспериментально наблюдаем в начале процесса сварки взрывом корытообразные деформации изгиба листа (рисунок 4.12).



Рисунок 4.12 – Поперечная деформация изгиба биметаллического листа размером 2000x12900 мм после сварки взрывом.

На расстоянии примерно 1-1,2 м от начала процесса эти деформации уже не наблюдаются. Лист становится ровным в поперечном направлении. Это связано, по-видимому, с тем, что напряжения сжатия в основном листе становятся больше давления в точке соударения.

Рассмотрим, что будет происходить в различных зонах листа по мере продвижения точки контакта со скоростью $V_k < C_l$. Упругая волна со скоростью C_l дойдет до торца листа за время

$$t = L/C_l . \quad (4.6)$$

Волна разгрузки не формируется в связи с постоянным потоком «подпирающих» упругих волн. В связи с этим напряжения в упругой волне $\sigma_{упр}$ в основном листе продолжают нарастать. Когда они становятся больше $\sigma_{упр} > \sigma_{крит}$, торец листа начинает двигаться с ускорением в направлении сварки. В основном листе происходит сдвиговая деформация, которая идет со скоростью волны сжатия C_0 , большей, чем V_k , то есть соударение начинает идти по движущейся поверхности основного листа. Экспериментально зафиксировано начало деформации растяжения основного листа на расстоянии 80-85% от длины листа (см. рис. 4.13). Это позволяет оценить скорость волны сжатия как

$$C_0 = k C_l . \quad (4.7)$$

Коэффициент k определяется из экспериментальных данных как отношение расстояния от начала процесса сварки до начала деформации к общей длине листа. По экспериментальным данным измерения по методу меток $k=0,7-0,8$.

Следовательно, скорость волны сжатия в углеродистой стали типа 09Г2С, 12ХМ составит 4100-4700 м/с. Это позволяет расчетным путем определить начало процесса деформации растяжения.

В плакирующем слое не зафиксировано деформации удлинения до начала сдвиговой деформации в основном листе, затем наблюдается его незначительная деформация, которая на конечном участке длиной 100-200 мм рез-

ко возрастает. В этих зонах наблюдается появление в плакирующем слое потягов, трещин, разрушений.

При проведении процесса сварки взрывом при отрицательных температурах в зоне максимальных деформаций растяжения возможно образование трещин, особенно при наличии концентраторов напряжений (подрезы от газовой резки и т.п.) в этих зонах на боковых кромках листа [61]. Аналогичные эффекты наблюдались в экспериментах по нанесению искусственных концентраторов напряжений на боковые кромки отмеченных в работах [36, 196].

Для определения механизма деформации и разрушения титана на конечных участках при параллельной схеме сварки взрывом рассмотрим поведение металла плакирующего слоя по методикам [135, 197].

Расчёты параметров области УСГ проводятся по формулам (2.4) – (2.6) по методике [118] следующего режима сварки взрывом: скорость детонации $V_B D = 2400-3500$ м/с, отношение массы ВВ к массе метаемой пластины $r = 1$, сварочный зазор $\delta = 8$ мм, угол сварки $\gamma = 13$ градусов, скорость метания $V_n = 400-600$ м/с, температура окружающей среды $+15...-15^\circ\text{C}$.

Оценочные значения параметров в зоне химической реакции ВВ (ширина a , рисунок 4.17) составляют: давление 1-2 ГПа, температура 3000 - 4000 $^\circ\text{C}$. Для области УСГ: давление 7-12 МПа, температура 2700-5000 $^\circ\text{C}$. Протяжённость области УСГ на расстоянии 3000 мм от начала сварки составляет 180 мм при $+15^\circ\text{C}$ и 250 мм при -15°C . Таким образом, на металл плакирующего листа действуют: «сверху» - давление, значительно превышающее его предел прочности, и температура более 3000 $^\circ\text{C}$ (обозначено серым); «снизу» - давление УСГ и температура около 3000 $^\circ\text{C}$ (обозначено желтым). Металл метаемого листа в зоне метания (точки ABC , рисунок 4.13) «зажат» между нагретыми газами, находящимися под давлением, превышающим предел текучести, что определяет вязкое течение деформации плакирующего листа. Время действия давления и температуры УСГ на текущую точку поверхности C при его движении от точки A до точки C со скоростью

точки контакта $V_k = 2500$ м/с составляет 0,06 мкс. Верхнее давление значительно выше, поэтому лист начинает движение нормально к поверхности. Никаких сил, которые бы изменили направление его движения до соударения с основным листом, нет. Следовательно, точка B при метании падает на свою проекцию B' , а точка C на точку C' , и метание происходит нормально поверхности метаемого листа.

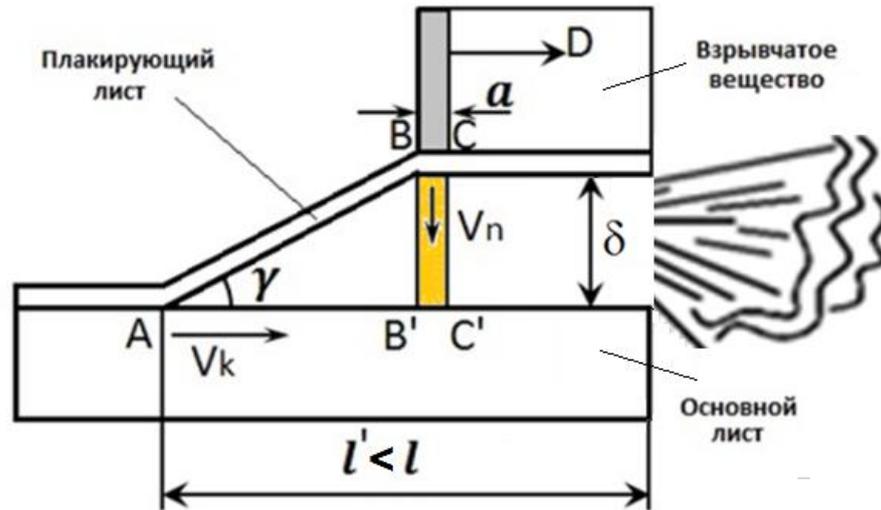


Рисунок 4.13 – Схема расчета параметров сварки взрывом: a – ширина зоны химической реакции, δ – сварочный зазор, l – длина области УСГ, l' – расстояние от точки контакта до места окончания сварочного зазора, γ – угол сварки, V_n – скорость метания, D – скорость детонации, V_k – скорость точки контакта, A – точка контакта, B, C – текущие точки.

При подходе УСГ к конечным участкам сварки (при $l' < l$) в сварочном зазоре происходит резкий сброс газа в атмосферу, что сопровождается спадом давления (до атмосферного) и температуры (до температуры окружающей среды). Это приводит к разрушению области УСГ, на плакирующий лист действует только давление и температура ВВ в зоне химической реакции. В краевых участках сварки в металле возникают напряжения сдвига, которые растут по мере продвижения фронта сварки, что приводит к появлению деформации сдвига, растяжению и удлинению листа в направлении сварки. Растяжение листа продолжается до исчерпания пластичности металла, образования трещин и разрушения. Следовательно, образование дефектов

в плакирующем слое зависит от параметров УСГ в сварочном зазоре, и именно резкое их изменение в краевых зонах приводит к появлению интенсивной пластической деформации удлинения плакирующего слоя, появлению потягов и трещин в плакирующем слое. Экспериментально выявлено, что в процессе сварки взрывом при отрицательных температурах резко возрастает относительное удлинение плакирующего слоя в конечной зоне. Причины этого явления не установлены и требуют дополнительных исследований.

Измерения деформации удлинения показывают, что зона интенсивной пластической деформации в краевых зонах плакирующего листа титана соответствует результатам расчета протяженности области УСГ. Исходя из геометрических соображений рисунка 4.17, для обеспечения стабильности процесса сварки взрывом на всей поверхности, включая краевые зоны, предложено [205, 206] технологическими приёмами обеспечить заданные параметры области УСГ в зоне сварки из условия:

$$l \geq K \frac{\delta}{\operatorname{tg} \gamma} + a, \quad (4.8)$$

где K - эмпирический коэффициент, δ - сварочный зазор, γ - угол сварки, a - длина зоны химической реакции ВВ, l – длина области УСГ.

Использование данных рекомендаций при изготовлении партии заготовок трубных решеток марки 09Г2С+ ВТ1-0 размерами 30x3250x3700 мм в ООО «Битруб Интернэшнл» позволило уменьшить зону образования вырывов до размеров припуска.

4.4 Выводы по главе

1. Экспериментально установлено, что в процессе сварки взрывом основной лист удлиняется на 14-40 мм в зависимости от длины и толщины листа, одновременно наблюдается деформация изгиба корытообразной формы в поперечном направлении на расстоянии 1000-1200 мм от начала процесса сварки взрывом.

2. Экспериментально на крупногабаритных листах методом реперных точек, нанесенных на основной и плакирующий лист, установлено, что в

процессе сварки взрывом после прохождения точкой контакта около 80 % длины листа в основном листе появляется деформация растяжения в направлении сварки, величина которой непрерывно возрастает до окончания сварки. При этом деформация удлинения плакирующего листа между одноименными реперными точками в несколько раз меньше, чем в основном листе. На конечном участке плакирующего слоя длиной 100-200 мм деформации удлинения резко возрастает более чем на порядок.

4. На основании проведенных исследований предложен следующий механизм продольной деформации основного листа в процессе сварки взрывом. При косом соударении плакирующего листа с основным листом в последнем формируются две волны: упругая и пластическая волна сжатия, которые движутся в направлении сварки. Упругая волна идет со скоростью звука в металле C_L . Волна сжатия - со скоростью $C_0 < C_L$. В начальный момент напряжение сжатия на фронте волны меньше $\sigma_{\text{крит}}$, т.е. меньше предела текучести для данного материала. Так как соударение в точке контакта идет непрерывно со скоростью V_k , в основном листе формируется непрерывный поток ударных (упругих) волн и волн сжатия. В связи с этим отражение от нижней поверхности основного листа и верхней поверхности не рассматривается. Напряжение в волнах упругих и сжатия непрерывно нарастает. После формирования волны сжатия впереди точки контакта соударение идет по напряженному листу. Волны разгрузки не формируются в связи с постоянным потоком «подпирающих» упругих волн. В связи с этим напряжения в упругой волне $\sigma_{\text{упр}}$ в основном листе продолжают нарастать. Когда они становятся больше $\sigma_{\text{упр}} > \sigma_{\text{крит}}$, торец листа начинает двигаться с ускорением в направлении сварки. В основном листе происходит сдвиговая деформация удлинения, которая идет со скоростью волны сжатия C_0 , большей чем V_k , то есть соударение начинает идти по движущейся поверхности основного листа.

5. Методом реперных точек в условиях промышленного производства исследована деформация растяжения плакирующего и плакируемого листов при сварке взрывом крупногабаритных двухслойных листов конструкцион-

ная сталь+высоколегированная коррозионностойкая сталь и конструкционная сталь+титановый сплав. Установлено, что в процессе сварки взрывом деформация растяжения основного листа происходит впереди точки контакта по всей толщине до образования соединения. Следовательно, на конечных участках сварка взрывом осуществляется по движущейся поверхности плакируемого листа. При этом удлинение плакирующего листа между одноименными реперными точками в несколько раз меньше.

б. В зоне окончания сварки на расстоянии соизмеримом с протяженностью области УСГ, выявлено резкое возрастание деформации растяжения плакирующего листа из титана. Установлено, что деформация растяжения в три и более раз возрастает при проведении процесса сварки взрывом при отрицательных температурах. Длина конечных участков с потягами, трещинами и вырывами плакирующего слоя после сварки взрывом крупногабаритных листов из конструкционной стали с титаном соизмерима с протяженностью области УСГ, а появление соответствующих дефектов обусловлено резким падением ее параметров (давления и температуры).

5. Разработка технологических основ промышленного производства сваркой взрывом крупногабаритного биметалла

5.1 Требования к современному промышленному производству биметалла сваркой взрывом

Определение промышленного производства

Процесс производства биметалла можно называть промышленным, если процесс производится ежедневно, практически независимо от погодных условий со стабильным заданным качеством биметалла.

Требования к современному промышленному производству разработаны на основе изучения опыта основных производителей крупногабаритного биметалла сваркой взрывом за рубежом (DMC Global Inc., NOBELCLAD), где имеется хорошо отлаженное производство, включающее не только сварку взрывом, но и последующую термообработку и отделку биметалла, и опыта отечественных предприятий [211].

К современному производству биметалла сваркой взрывом должны быть предъявлены, по нашему мнению, следующие требования:

- высокое качество, подтверждённое сертификатом, при конкурентной цене;
- круглогодичность производства; сжатые сроки выполнения работ от получения заказа до поставки;
- обеспечение по требованию заказчика полного цикла производства, включая термообработку, отделку и проведение испытаний на соответствие требованиям стандартов и технических условий [5, 211, 212].

Многолетний опыт производства биметалла сваркой взрывом показал, что его качество определяется: правильностью выбора схемы сварки, рациональной технологией подготовки свариваемых поверхностей, зарядом взрывчатого вещества, опорой и возможностью сведения к минимуму влияния внешних факторов (температуры, осадков и т.п.). Для рационального реше-

ния этих вопросов при разработке промышленной технологии производства крупногабаритного биметалла сваркой взрывом в её основу были положены следующие положения [5]:

1. Разработка схемы сварки взрывом крупногабаритных листов производится с учетом влияния ударно-сжатого газа перед точкой контакта (гл.2) с обеспечением прогрева газа в сварочном зазоре до необходимой температуры до начала сварки (п.5.3) Для практического использования результатов исследований, изложенных в главе 2 и 3, важно определить расстояния, на которых начинают реализовываться эффекты плазменной очистки, ведение в схему генераторов ударной плазмы (п. 5.4). С другой стороны, слишком длительное воздействие температур неизбежно будет приводить к перегреву и расплавлению поверхности свариваемых металлов перед точкой контакта. Поэтому необходимо определить максимально допустимые размеры области УСГ, чтобы избежать перегрева свариваемых поверхностей (п. 5.3). Для исключения резкого падения параметров УСГ в краевых зонах необходимо введение технологических пластин [66, 67], обеспечивающих также уменьшение деформации узких граней и равномерное обрезание нависаний плакирующего слоя без склолов [36]. С учётом транспортировки собранных пакетов от цеха до взрывной площадки автотранспортом выдерживание сварочного зазора производится усовершенствованными V-образными опорами [56, 57, 68].

Исходя из данных, приведенных в главе 3, использование инертного газа является обязательным для получения качественной сварки крупногабаритных изделий с плакирующим слоем из титана [5]. Выбор оптимальных параметров УСГ для условий использования аргона в сварочном зазоре также рассматривается в данной главе (п. 5.4).

2. Разработка рациональной технологии подготовки свариваемых поверхностей, как наиболее трудоёмкой операции, производится на основании исследований [36] влияния шероховатости свариваемых поверхностей и поверхностных загрязнений (влаги, ржавчины, окалины, масла и др.) с учётом

свойств свариваемых материалов и требований к готовому биметаллу [5, 211].

3. В отечественной и зарубежной практике для сварки взрывом используются низкоскоростные аммиачно-селитренные ВВ, в том числе смеси аммиачной селитры с дизельным топливом. Использование в качестве взрывчатого вещества при сварке взрывом смеси гранулированной микропористой аммиачной селитры с дизельным топливом позволяет до минимума сократить применение промышленных ВВ, механизировать процесс приготовления смеси, обеспечить высокое качество сварки за счёт стабильности состава и плотности заряда по всей его поверхности. Скорость детонации этих ВВ зависит от толщины заряда, содержания дизельного топлива и гранулометрического состава. Толщина заряда, как правило, близка к критическому диаметру и не превышает предельный для данного ВВ, то есть лежит в диапазоне неустойчивого режима детонации [5]. Исследования особенностей детонации крупногабаритных зарядов из смеси аммонита с аммиачной селитрой и смеси аммиачной селитры с дизельным топливом [213, 214] показали, что для стабилизации процесса детонации крупногабаритных плоских зарядов необходимо размещать на их поверхности слой инертного материала, что снижает вероятность появления непроваров. (п.5.2) [5].

4. Исследовано влияние различных опор - от монолитных бетонных до песчаных и комбинированных - на деформацию при сварке взрывом крупногабаритных листов и заготовок [36]. Наилучшие результаты получены на опорах из металлической дроби, однако высокая стоимость стальной и чугунной дроби, большие её безвозвратные потери исключают возможность её использования при производстве коммерческого биметалла. Поэтому используются насыпные на грунт песчаные опоры. В этом случае важно обеспечить гомогенность опоры по площади и толщине не менее 500 мм [5].

5. Для обеспечения круглогодичного производства биметалла в условиях Подмосковья и сведения к минимуму влияния внешних факторов технология предусматривает сборку пакетов основного и плакирующего листа в це-

хе, обеспечение заданного сварочного зазора, его герметизацию и сохранение при транспортировке и грузоподъёмных операциях, подогрев пакета при отрицательных температурах. На площадке ведения взрывных работ производится только установка пакета на опору, раскладка и подрыв заряда [5, 211].

6. Контроль качества биметалла оценивается по сплошности соединения слоёв, прочности соединения на отрыв и срез, изгиб, отклонение от плоскостности, толщине плакирующего слоя и структуре соединения [211].

7. Обеспечение по требованию заказчика полного цикла производства биметалла, включая термообработку, отделку и проведение испытаний на соответствие требованиям стандартов и технических условий [5].

5.2 Влияние особенностей детонации крупногабаритных зарядов смесей аммиачной селитры с дизтопливом на качество соединения

Высокое качество крупногабаритных двухслойных листов и круглогодичность производства обеспечиваются в первую очередь энергоносителем – взрывчатым веществом.

Информация о свойствах ВВ, применяемых при сварке взрывом, наиболее полно собрана в работе [12], где на основе анализа данных различных исследователей описаны свойства смесей аммонита бЖВ с аммиачной селитрой, песком, солью, сварочных аммонитов А-40, А-50, АТ-1, АТ-2, АТ-3. Показано, что скорость детонации этих ВВ зависит от плотности и толщины заряда, влажности, содержания компонентов и гранулометрического состава.

В работе [213] потерю стационарности и устойчивости детонации крупногабаритных плоских зарядов связывают с появлением движущихся поперечно фронту детонации возмущений, в результате взаимодействия которых образуются локальные области повышенных давлений и температуры.

Было высказано предположение о влиянии на стабильность детонации плоских крупногабаритных зарядов из ВВ на основе аммиачной селитры его свободной поверхности. Следует отметить, что влияние боковых поверхностей заряда всегда учитывается путём создания нависаний, для расчёта ко-

торых созданы методики [60]. На влияние поверхности заряда указывают результаты работы [214], в которой показано, что наличие прочных и массивных оболочек увеличивает время разброса ВВ, уменьшает потери газов в боковых направлениях и увеличивает ту часть газов, которая идёт на поддержание детонации.

Многолетний отечественный и зарубежный опыт промышленного производства листового биметалла позволяет сформулировать следующие требования к взрывчатым веществам для сварки взрывом [215]:

- Скорость детонации ВВ в плоских зарядах толщиной от 15 до 120 мм - не более 3000 м/с.
- ВВ при укладке заряда не должно уплотняться и слёживаться.
- Стабильность детонации плоского заряда на больших площадях до 30 м².
- Невысокая стоимость ВВ и возможность приготовления его в день использования из компонентов, не являющихся взрывчатым материалом.
- Возможность механизированного изготовления и раскладки заряда на поверхности листа.

Для обеспечения этих требований были обобщены накопленные данные о характере детонации крупногабаритных плоских зарядов низкоскоростных аммиачно-селитренных ВВ, в том числе смеси аммиачной селитры с дизельным топливом, и их влияние на качество биметалла:

- Путём анализа представительного массива данных по плакированию крупногабаритных заготовок на Гилёвском опытно-экспериментальном заводе НПО АНИТИМ (с. Гилёво, Алтайского края) по следующим параметрам: толщине заряда, скорости детонации (расчётной и замеренной), сплошности сварки по результатам ультразвукового контроля, а также механическим свойствам и структуре.
- Выборочного анализа результатов сварки взрывом в ТОО «Биметалл» (п. Темир-Тау, Кемеровской области) по тем же параметрам.

- Анализа данных, опубликованных в материалах международных и всесоюзных симпозиумов и конференций по сварке взрывом за советский период, а также монографий и статей в журналах «Физика горения и взрыва», «Автоматическая сварка», «Сварочное производство», Известия ВолгГТУ. Сварка взрывом и свойства сварных соединений» и др.

В результате анализа установлено, что даже при хорошо отработанной технологии могут появляться различные дефекты, появление которых связано с нестабильностью детонации заряда. Проведена классификация дефектов и показано, что наиболее распространённый дефект – непровар, появление которого обычно связано с изменением скорости детонации или её затуханием. Особенно сильно зависит скорость детонации порошкообразных ВВ, в частности аммонитов типа А-20, АТ-1, смесей аммонита БЖВ с кварцевым песком или солью, от плотности заряда. Колебания скорости детонации достигают 1000-1200 м/с, а при повышении плотности свыше $1 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ наблюдаются отказы. В этих условиях, по-видимому, наблюдается переход детонации в режим самораспространяющегося взрывного процесса (СВП), который распространяется на значительные расстояния с существенно пониженным, по сравнению с детонацией, энерговыделением [64].

Толщина заряда при сварке взрывом, как правило, близка к критическому диаметру и не превышает предельный для данного ВВ, то есть лежит в диапазоне нестабильного режима детонации [5]. При раскладке крупногабаритных зарядов площадью до 20 м² практически невозможно обеспечить равномерную плотность порошкообразного заряда по всей поверхности заряда, а следовательно, его детонацию с определённой скоростью [215]. Наличие участков с повышенной или пониженной скоростью детонации приводит к искривлению фронта детонации, нарушению заданного режима сварки взрывом и, как следствие, появлению дефектов (неприваров, участков пониженной прочности, свищей, разрушений плакирующего слоя и т.п.).

В то же время при обеспечении стабильной детонации заряда и 100% сплошности соединения не выявили значительных колебаний по прочности соединения, размеров волн, хотя пробег детонационной волны достигал 7,5 м, а площадь - 16 м².

В работе [214] показано, что наличие инертной засыпки на поверхности заряда выравнивает давление по всей его толщине и обеспечивает полноту детонации. При разлёте продуктов детонации в воздух детонирует примерно половина критической толщины заряда ВВ, а при наличии инертной засыпки детонирует весь слой ВВ. Очевидно, что при наличии забойки увеличивается длительность действия давления.

Анализ результатов опытов (таблица 5.1) показывает, что, если толщина песчаной засыпки равна половине критического диаметра, то не изменяются напряжённо-деформированное состояние взрывной камеры, скорость детонации ВВ, размеры волн, сплошность и прочность соединения. Следовательно, слой ВВ, равный половине критического диаметра, разлетается, не участвуя в реакции, а оставшееся ВВ реагирует полностью [214]. Это согласуется с результатами работы [216], где для количественного учёта этих потерь предложено вводить определённый эквивалентный слой, постоянный для данного ВВ, который совершенно не участвует в реакции.

Увеличение толщины песчаной засыпки пропорционально изменению величины напряжений в оболочке взрывной камеры, и при толщине засыпки, равной четырём толщинам заряда, напряжения снижаются в четыре раза. Аналогичные данные получены при измерении давления в воздушной ударной волне на расстоянии 1200-4000 м при взрыве зарядов ВВ с инертной засыпкой и без неё. Таким образом, свободная поверхность заряда существенно влияет на скорость детонации ВВ и её устойчивость, и, как следствие, на стабильность параметров процесса сварки взрывом. Для стабилизации процесса детонации крупногабаритных плоских зарядов необходимо размещать на их

поверхности слой инертного материала, что снижает вероятность появления непроваров и других дефектов [5].

Таблица 5.1 – Влияние песчаной засыпки на качество сварки взрывом [214].

Материал, толщина, мм	Тип ВВ	Толщина, мм		Прочность соедине- ния, МПа	Сплош- ность со- единения, %
		ВВ	песка		
Ст.3-Ст.3 2,5 +20	Смесь аммонит с аммиачной селитрой 1:1	30	0	218	100
		15	15	310	100
		8	22	125	90
		8	8	0	0
Сталь10- 08X18Н10Т 100 + 12	Игданит 3% дизельного топлива	80	0	410	100
		50	30	430	100
		30	50	350	80

Наиболее технологичными (механизация изготовления, отсутствие уплотнения при раскладке заряда и т.п.) являются смеси аммиачной селитры с дизельным топливом. Гранулированная аммиачная селитра в России производится по ГОСТ 2-85, пористая - по ТУ 2143-635-002-09023-99 и микропористая - по ТУ 2143-036-002-3789-2003 и ТУ 2143-073-05761643-2013 (таблица 5.2). Однако твёрдая и плотная корочка на поверхности гранулы (рисунок 5.1) затрудняет её пропитку и снижает её удерживающую способность, что приводит к миграции дизельного топлива в нижние слои заряда и нарушению равномерности его распределения по толщине. Для исключения этого эффекта гранулы аммиачной селитры дробят. Размол аммиачной селитры - процесс трудоёмкий, трудно добиться равномерного гранулометрического состава и плотности.

Изучению зарядов из смеси пористой аммиачной селитры с дизельным топливом посвящена серия работ [217, 218]. На основе исследования аммиачных селитр различных марок и производителей показано определяющее влияние свойств пористой аммиачной селитры (плотность, впитывающая

способность, критический диаметр) на детонационные характеристики взрывчатых смесей на её основе с дизельным топливом. Автором была решена основная задача повышения детонационной способности этих смесей применительно к горно-добывающей промышленности.

Таблица 5.2 – Основные технические характеристики аммиачной селитры.

Основные показатели	ГОСТ 2-85 марка Б	ТУ 2143-635-002-09023-99	ТУ 2143-036-002-3789-2003	ТУ 2143-073-05761643-2013
Суммарная массовая доля нитратного и аммонийного азота в пересчете на нитрат аммония в сухом веществе, %, не менее	не нормируется	98,0	98,0	99,6
Массовая доля воды, %, не более	0,3	0,5	0,7	0,5
Удерживающая способность по отношению к дизельному топливу, %, не менее	-	5,5	8,0	12,0
Насыпная плотность, г\см ³	-	0,84	0,70-0,76	0,75 ±0,03
Статистическая прочность гранул, Н/гранулу, не менее	-	4	4	4
Гранулометрический состав				
- от 1 до 4 мм,	< 95	>95	< 100	< 95
- менее 1 мм,	3	10	2	5
Рассыпчатость, %, не менее	100	100	100	100

Попытки использовать для сварки взрывом пористую аммиачную селитру по ТУ 2143-635-002-09023-99 не дали положительных результатов. При использовании плоских зарядов толщиной 47 мм под слоем инертной засыпки из песка толщиной 100-120 мм наблюдался переход режима детонации в самораспространяющийся взрывной процесс (СВП) после прохождения детонацией 4000 мм от начала процесса по всей ширине листа, через 100-150 мм процесс переходил в режим детонации и через 700-1000 мм вновь переходил в режим СВП. Таких участков перехода в режим СВП наблюдали 2-3

на заряде размером 1500х6600 мм при плакировании листов нержавеющей сталью толщиной 3 мм. Факт перехода режима детонации в СВП фиксировался по появлению участка непровара с волнистостью, вырывам протяженностью 100-150 мм по всей ширине листа.

Особенностью микропористой аммиачной селитры, изготавливаемой по ТУ 2143-036-002-3789-2003 и ТУ 2143-073-05761643-2013, является наличие микропор на поверхности сферических гранул (рисунок 5.1). Это позволяет хорошо пропитывать и удерживать дизельное топливо и одновременно обеспечивать технологические характеристики [222], прочные сферические гранулы не уплотняются при раскладке заряда, смешиваются в смесителях барабанного типа.

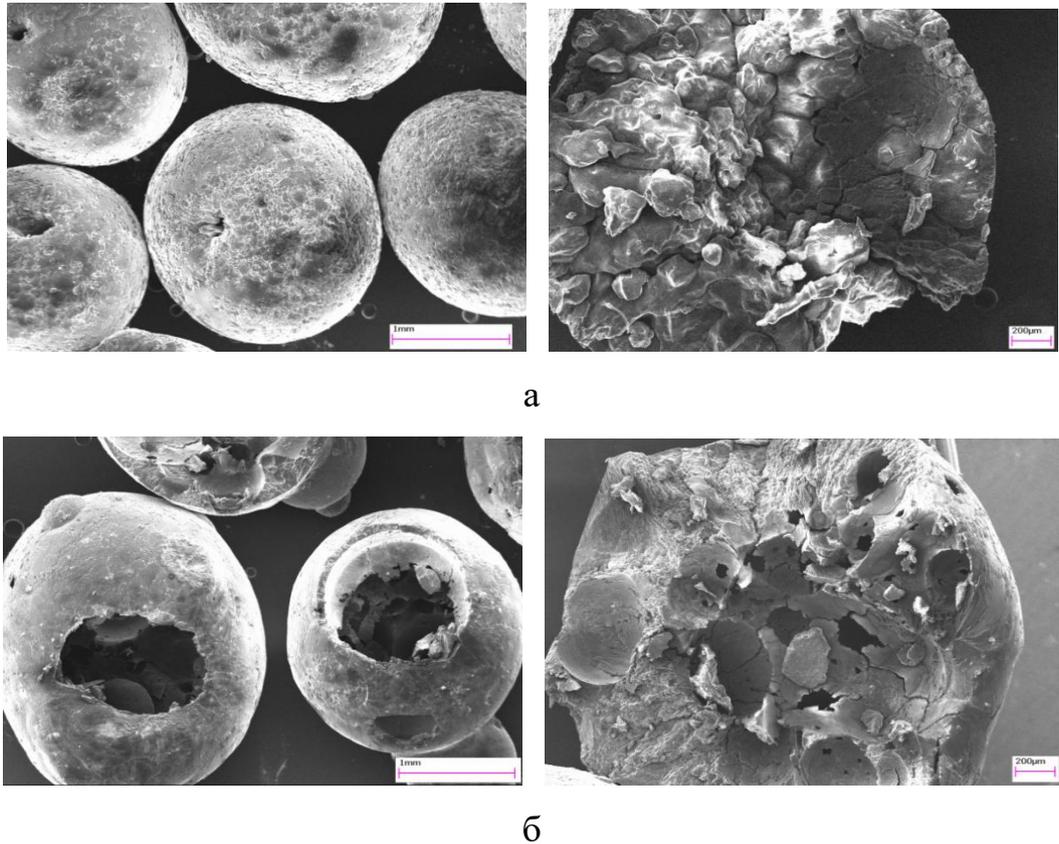


Рисунок 5.1 – Микроструктура (общий вид и излом) гранулированной (а) и микропористой селитры (б) [222].

Опубликованных данных по применению смесей микропористой аммиачной селитры с дизельным топливом для сварки взрывом нет. В связи с

этим провели исследование свойств таких смесей в диапазоне толщин зарядов, наиболее часто применяемых при сварке взрывом [215, 222].

Методика исследований предусматривала их проведение в три этапа.

1. Определение влияния типа аммиачной селитры и процентного содержания дизельного топлива на качество их смеси.

2. Установление зависимости скорости детонации заряда от содержания дизельного топлива, высоты заряда и наличия забойки из песка.

3. Экспериментальная проверка режима сварки взрывом на крупногабаритных зарядах с определением сплошности сварки, структуры и прочности соединения на отрыв.

Было использовано три вида аммиачной селитры: микропористая (ТУ 2143-036-002-3789-2003 и ТУ 2143-073-05761643-2013), гранулированная (ГОСТ 2-85) и молотая.

Селитра тщательно смешивалась с дизельным топливом. Содержание дизельного топлива определялось в интервале 2÷16% от массы селитры (200г). После смешивания ежедневно производилось измерение высоты осевшего дизельного топлива. Для визуального наблюдения за качеством смешения и расслоением компонентов со временем в дизельное топливо добавили жирорастворимую зеленую краску «Судан», вследствие чего смесь приобретала темно-зеленый цвет. Результаты устойчивости смеси аммиачной селитры с дизельным топливом в течение 10 дней представлены в таблице 5.3 и на рисунках 5.2 – 5.7 [222].



Рисунок 5.2 – Микропористая селитра + дизельное топливо (день 1).



Рисунок 5.3 – Молотая селитра + дизельное топливо (день 1).



Рисунок 5.4 Гранулированная селитра + дизельное топливо (день 1).

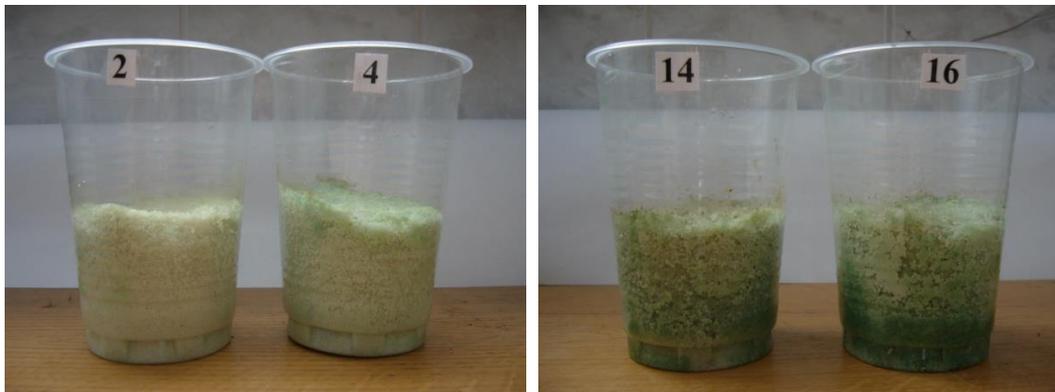


Рисунок 5.5 – Молотая селитра + дизельное топливо (день 7).

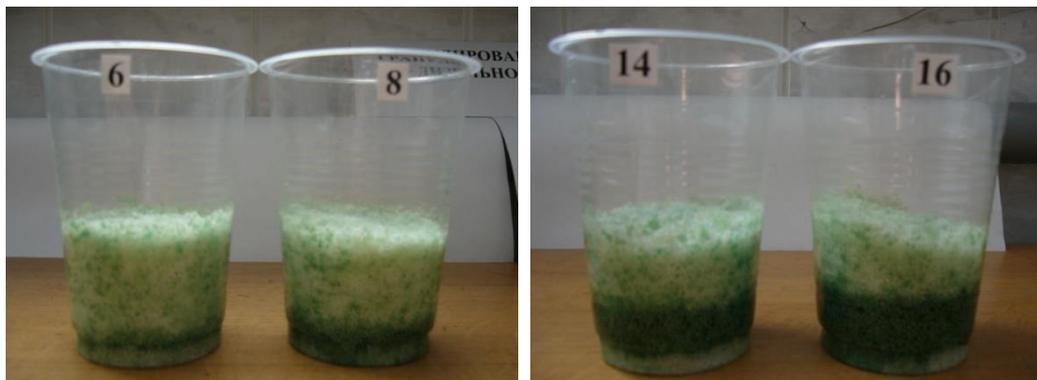


Рисунок 5.6 – Гранулированная селитра + дизельное топливо (день 7).



Рисунок 5.7 – Пористая селитра + дизельное топливо (день 7).

Таблица 5.3 – Исследование пропитываемости аммиачной селитры дизельным топливом.

День	Процентное содержание, %	Высота осадка, мм			
		Гранулированная селитра	Молотая селитра	Микропористая селитра	Микропористая селитра
		ГОСТ 2-85		ТУ 2143-036-002-3789-2003	ТУ 2143-073-05761643-2013
7-й	4	нет	нет	нет	нет
	6	нет	нет	нет	нет
	8	8	нет	нет	нет
	10	10	нет	нет	нет
	12	17	нет	нет	нет
	14	24	18	8	нет
	16	27	20	13	нет
8-й	4	нет	нет	нет	нет
	6	8	нет	нет	нет
	8	14	5	2	нет
	10	16	8	5	нет
	12	20	11	7	нет
	14	25	18	11	нет
	16	28	23	14	нет
9-й	4	нет	нет	5	нет
	6	10	5	8	нет
	8	14	14	10	нет
	10	18	16	11	нет
	12	20	16	12	нет
	14	25	21	15	нет
	16	29	25	18	нет
10-й	4	нет	нет	6	нет
	6	11	5	10	нет
	8	14	14÷17	11	нет
	10	20	12÷16	12	нет
	12	21	17	13	нет
	14	26	21	16	нет
	16	30	26	18	нет

В результате проведенных исследований установлено:

1. В смеси микропористой селитры (ТУ 2143-036-002-3789-2003) с дизельным топливом после выдержки в течение 8 дней наблюдается выпадение осадка топлива при его содержании свыше 4%. Даже в составах, в которых наблюдается выпадения осадка топлива, его распределение по объему равномерно.

2. В смеси молотой селитры с дизельным топливом после выдержки в течение 8 дней наблюдается выпадение осадка топлива при его содержании свыше 6% после трёх дней выдержки. Топливо по объему с процентным содержанием более 8% распределено неравномерно.

3. В смеси гранулированной селитры с дизельным топливом его осадок наблюдается с первых же дней во всех смесях с дизельным топливом свыше 8%, и в дальнейшем наблюдается быстрый рост высоты осадка.

Таким образом, наиболее хорошо удерживает топливо молотая селитра и микропористая по ТУ 2143-073-05761643-2013 с процентным содержанием 4-6%, при 4% осадка не наблюдается вообще. В микропористой селитре по ТУ 2143-036-002-3789-2003 топливо удерживается также хорошо, но выпадение осадка наблюдается при содержании топлива свыше 4% уже на третий день [222].

Для измерения скорости детонации заряд размещали на металлической пластине размером в плане 1000x250 мм. В заряд на разном расстоянии от точки инициирования устанавливали 4 датчика замыкания, время срабатывания которых фиксировали осциллографом. Смешивание компонентов производилось вручную.

Сварку взрывом производили на образцах размером в плане 2500*500 мм, толщина метаемой пластины 4 мм. Темплеты для определения прочности соединения и структуры отбирали на разном расстоянии от точки инициирования. Сплошность сварки оценивали ультразвуковой дефектоскопией. Полноту детонации определяли на зарядах длиной 6 м.

Анализ результатов экспериментов (таблица 5.4) показал, что скорость детонации смеси микропористой аммиачной селитры с дизельным топливом растёт с увеличением содержания дизельного топлива. При увеличении его содержания до 10% в изученном интервале толщин заряд не детонирует. Смеси с содержанием дизельного топлива 2-4% имеют стабильную плотность, дизельное топливо равномерно пропитывает аммиачную селитру [215]. При хранении не наблюдается его перераспределения по толщине за-

ряда. С увеличением толщины слоя заряда скорость детонации также растёт, но медленно.

Таблица 5.4 – Особенности детонации крупногабаритных зарядов смесей аммиачной селитры с дизельным топливом [215].

Наименование ВВ	Насыпная плотность, кг/м ³	Толщина слоя заряда, мм	Скорость детонации, м/с
Смесь гранулированной микропористой аммиачной селитры с дизельным топливом (содержание 2-8%)	740	60	1770-2910
Смесь гранулированной микропористой аммиачной селитры с дизельным топливом (содержание 4%)	740	40-80	2080-2740
Смесь гранулированной микропористой аммиачной селитры с дизельным топливом (содержание 4%), забойка из песка	740	20-80	1480-2400
Смесь гранулированной аммиачной селитры с дизельным топливом (содержание 2-6%)	900	80-100	2500-3400
Смесь молотой аммиачной селитры с дизельным топливом (содержание 2-6%)	850-900	20-50	2500-3400

Следует отметить, что под слоем песка смесь с содержанием дизельного топлива 4% устойчиво детонирует в толщине 20 мм со скоростью 1480 м/с в зарядах длиной 6 м [215].

Ультразвуковой контроль заготовок после сварки взрывом не выявил дефектов сплошности соединения. Прочность соединения на отрыв стабильна в начале и конце заготовки. Соединение имеет структуру, характерную для сварки взрывом.

Таким образом, использование в качестве ВВ при сварке взрывом смеси гранулированной микропористой аммиачной селитры с дизельным топливом позволяет до минимума сократить применение промышленных ВВ, механизировать процесс приготовления смеси, обеспечить высокое качество сварки за счёт стабильности состава и плотности заряда по всей его поверхности. Скорости детонации этих смесей в изученном диапазоне толщин заряда близки к оптимальным с точки зрения образования соединения при сварке взрывом [215].

В связи с появлением на рынке микропористой селитры, выпускаемой по ТУ 2143-073-05761643-2013, были проведены дополнительные исследования по указанной выше методике. Было выявлено, что впитывающая способность очень высокая (таблица 5.3) Удерживающая способность по отношению к дизельному топливу составляет не менее 12%, это приводит к мгновенному впитыванию дизельного топлива, но к неравномерному перемешиванию составляющих. Расслоения смеси в течение 10 дней не происходит. Неравномерное распределение компонентов смеси при содержании дизельного топлива до 5% приводит к нестабильной детонации ВВ на промышленных режимах сварки. В связи с этим использовать её для сварки взрывом не рекомендовано.

При хранении селитры, а также в случае изменения погоды ее влажность может меняться (высушивание). В связи с этим были проведены эксперименты по измерению скорости детонации при добавлении воды для снижения впитывающей способности ВВ. Результаты экспериментов представлены на рисунке 5.8.

Скорость детонации при добавлении воды и увеличении содержания дизельного топлива увеличивается. При отсутствии добавки воды смесь неустойчиво детонирует из-за неравномерности пропитки гранул дизельным топливом.

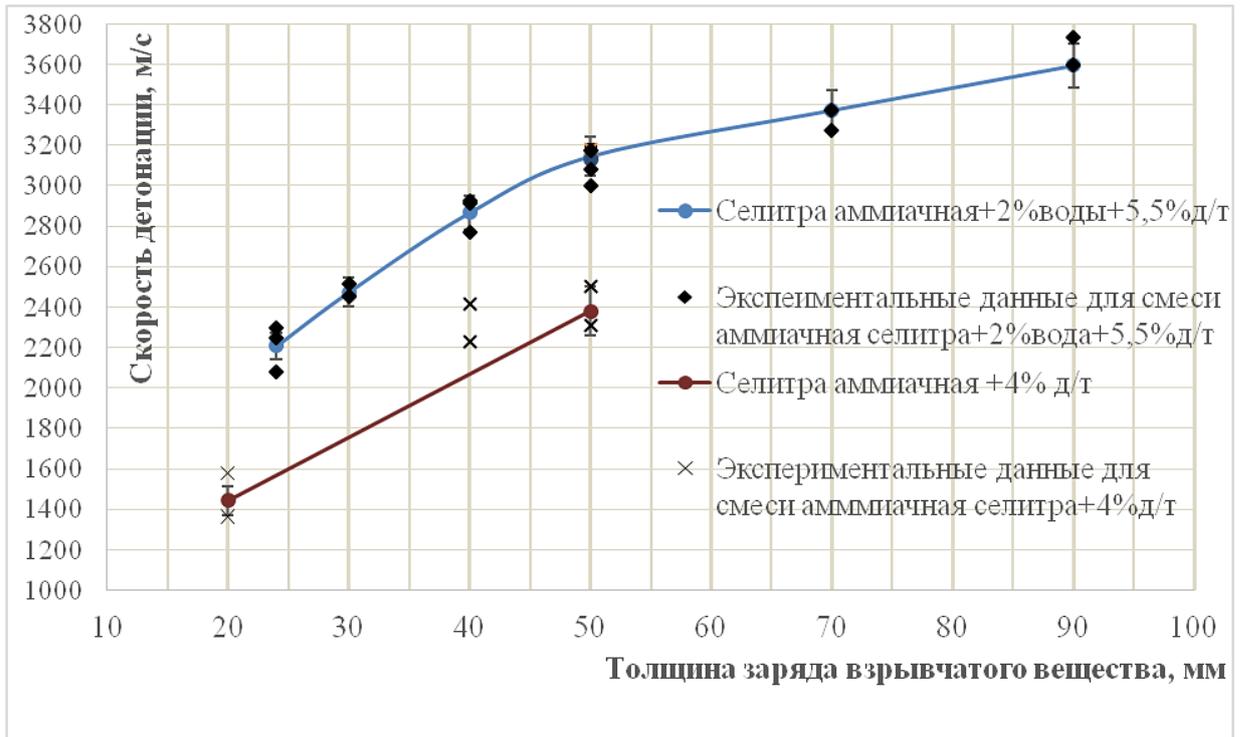


Рисунок 5.8 – Зависимость скорости детонации смесей с добавлением воды и без неё (измерения проведены в ООО "Битруб Интернэшнл" и ФКП НИИ "Геодезия").

При производстве сваркой взрывом крупногабаритных двухслойных листов используются плоские заряды массой более 400 кг. Для определения безопасных расстояний по ВУВ и допустимых по массе зарядов важно знать тротиловый эквивалент зарядов из смесей микропористой аммиачной селитры с дизельным топливом в условиях, имитирующих сварку взрывом. Были проведены испытания на испытательной базе ФКП «НИИ «Геодезия»» в соответствии с требованиями ГОСТ В 25801-83.

Испытаниям подвергались заряды ТНТ и смеси аммиачной селитры с дизельным топливом в соотношении (96:4) (игданит) размерами 1000x500x50 мм с различными вариантами защитного покрытия. Цель испытания: определение максимального избыточного давления на фронте ВУВ при подрыве исследуемых зарядов. Значения максимального избыточного давления на фронте ВУВ, вычисленные по скорости распространения ВУВ по лучам и по

среднему времени, и масса ВВ в тротиловом эквиваленте представлены в таблице 5.5.

Испытания проводились в приборном поле ПП-1, оборудованном универсальными пьезоэлектрическими преобразователями давления УПД. УПД располагались на 5 лучах №№ 1, 3, 5, 7, 9, расположенных в угле 180 град через 45 град, на расстояниях 5; 7,5; 10; 15; 20; 25; 30 мм от центра приборного поля. Проведены подрывы 5 зарядов: 1 опыт с зарядом ТНТ с защитным слоем песка толщиной 80 мм; 1 опыт с зарядом игданита с защитным слоем, состоящим из слоя песка толщиной 80 мм и слоя снега толщиной 300 мм; 3 опыта с зарядами игданита с защитным слоем песка толщиной 80 мм.

Исследуемые заряды устанавливались в центре ПП-1 на стальном листе толщиной 10 мм размерами 1000x500 мм. Стальной лист укладывался на песчаную подушку толщиной 100 мм.

В опытах 1-3, 5 продольная ось заряда совпадала с направлениями лучей 1 и 9, в опыте 4 продольная ось составляла нормаль с направлением видеосъемки. Инициирование зарядов осуществлялось с короткого торца от электродетонатора ЭД-8 с использованием дополнительных электродетонаторов: в опытах №№ 1-3, 5 - со стороны луча № 1; в опыте 4 – со стороны, противоположной лучу 5.

В каждом из опытов проводилась видеосъемка процесса взрыва со стороны луча №9. Скорость видеосъемки составляла 4000 кадр/с. Запись процесса проводилась измерительно-вычислительным комплексом МИС-503.

Таблица 5.5 – Значения максимального избыточного давления на фронте воздушной ударной волны.

№ опыта	ВВ	База между УПД, м	Значения максимального избыточного давления ΔP_m на фронте ВУВ по лучам, кгс/см ²					ΔP_m^* ср., кгс/см ²	Q ΔP_m^* , кг
			Л.1	Л.3	Л.5	Л.7.	Л.9		
Оп.1	Игданит, защитный слой песок	5-7,5	0,87	0,83	1,06	0,70	0,41	0,75	4,427
		7,5-10	0,46	0,58	0,45	0,41	0,22	0,42	4,793
		10-15	0,24	0,30	0,26	0,21	0,10	0,22	4,358
		15-20	0,15	0,16	0,14	0,11	0,06	0,12	3,631
		20-25	0,10	0,11	0,07	0,06	0,03	0,07	-
		25-30	0,09	0,10	0,06	0,05	0,02	0,06	-
									Ср.4,302
Оп.2	ТНТ защитный слой песок	5-7,5	1,60	1,34	1,76	1,07	0,75	1,26	9,343
		7,5-10	0,73	0,81	0,76	0,58	0,30	0,62	8,956
		10-15	0,31	0,45	0,36	0,31	0,17	0,32	8,490
		15-20	0,17	0,22	0,19	0,17	0,09	0,17	6,857
		20-25	0,12	0,15	0,11	0,11	0,05	0,11	-
		25-30	0,10	0,11	0,09	0,07	0,03	0,08	-
									Ср.8,412
Оп.3	Игданит защитный слой песок + снег	5-7,5	0,54	0,36	0,41	0,24	0,32	0,37	1,379
		7,5-10	0,33	0,33	0,24	0,19	0,17	0,25	1,907
		10-15	0,31	0,20	0,17	0,11	0,10	0,18	2,795
		15-20	0,11	0,11	0,11	0,06	0,06	0,09	-
		20-25	0,09	0,08	0,07	0,04	0,04	0,06	-
		25-30	0,07	0,07	0,06	0,03	0,01	0,05	-
									Ср.2,027
Оп.4	Игданит защитный слой песок	5-7,5	0,94	0,44	0,51	0,81	1,18	0,75	4,381
		7,5-10	0,48	0,34	0,23	0,30	0,52	0,37	3,819
		10-15	0,24	0,19	0,20	0,19	0,29	0,22	4,473
		15-20	0,14	0,12	0,11	0,13	0,14	0,13	3,818
		20-25	0,11	0,09	0,08	0,08	0,09	0,09	-
		25-30	0,08	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07	-
									Ср.4,123
Оп.5	Игданит защитный слой песок	5-7,5	0,90	0,85	0,98	0,95	0,23	0,74	4,339
		7,5-10	0,52	0,59	0,45	0,40	0,17	0,41	4,678
		10-15	0,26	0,32	0,27	0,22	0,11	0,23	4,861
		15-20	0,15	0,17	0,13	0,11	0,06	0,12	3,776
		20-25	0,11	0,12	0,10	0,07	0,04	0,09	-
		25-30	0,08	0,09	0,07	0,05	0,02	0,06	-
									Ср.4,414

* ΔP_m – превышение значения атмосферного давления (атм. дав. в день эксперимента 744 мм.рт.ст., температура окр. ср. 1,5 °С), кгс/см².

*Q ΔP_m – соответствие массе тротила, уложенному в виде полусферы и инициированному с центра полусферы, кг.

На основании проведенных испытаний сделано следующее заключение: тротильный эквивалент по ВУВ для плоских зарядов смесей микропористой аммиачной селитры с дизельным топливом в соотношении 96:4 под слоем песка составляет 0, 25. Для площадки, где ведется промышленное производство биметалла, принят тротильный эквивалент 0,4.

В случае превышения заряда используется гашение ВУВ путем нанесения на поверхность заряда слоя снега или газовоздушной пены.

В результате исследований экспериментально изучены особенности структуры и свойств смесей аммиачной селитры с дизельным топливом. Определена скорость детонации и тротильный эквивалент в крупногабаритных плоских зарядах в условиях сварки взрывом. Показано, что лучшими свойствами по технологичности обладает микропористая аммиачная селитра по ТУ 2143-036-002-3789-2003. Определен состав смесей, обеспечивающий высокое качество сварки за счёт стабильности состава и плотности заряда по всей его поверхности. Исследования позволили до минимума сократить применение промышленных ВВ и механизировать процесс приготовления смеси.

5.3. Разработка методики определения максимальных размеров листов по длине и ширине, которые можно с заданным качеством получить сваркой взрывом

В современном тяжелом машиностроении (атомном, нефтехимическом, судостроительном) наметилась тенденция увеличения единичных мощностей оборудования и агрегатов, для изготовления которых необходимы листы максимальных габаритов. Например, для производства днища ёмкостей САОЗ Ленинградской АЭС требуются двухслойные заготовки размерами 110(105+5)х4050х4600 мм, для обечаек емкостей САОЗ Нововоронежской АЭС - размерами 60(55+5)х2500х9900 мм. Для изготовления нефтехимического оборудования требуются двухслойные листы шириной до 2500 мм и длиной до 13000 мм. При этом предъявляются жесткие требования по сплошности (100%), прочности соединения (не менее 245 МПа), а также структуре соединения [223].

В связи с этим возникает вопрос, каковы же максимальные габариты листов, на которых сварка взрывом обеспечивает стабильный процесс соединения слоёв с высоким качеством по сплошности, прочности и структуре соединения?

Часто при характеристике сварки взрывом в качестве положительной особенности метода указывается возможность сваривать поверхности неограниченных размеров. Однако на практике при сварке крупногабаритного биметалла производители получают различные дефекты, для предотвращения которых предлагаются различные схемы и технологические приемы [223]. Одни исследователи утверждают, что по мере удаления от точки инициирования увеличивается скорость детонации, что приводит к изменению параметров процесса – скорости соударения, угла соударения и т.п. [8, 59]. Для снижения этого эффекта рекомендуют постепенно уменьшать величину заряда [12, 59, 219]. Другие исследователи экспериментально показывают, что сложности получения крупногабаритных заготовок связаны с изменением сварочного зазора [220, 221], неравномерностью детонации [64]. В этом случае, очевидно, процесс может быть зафиксирован в структуре сварного соединения по нарушению волнообразования и изменению тепловыделения в виде литых включений. В работе [220] по результатам анализа литературных источников и результатов опытов показано, что основными причинами увеличения размеров волн и количества оплавленного металла по длине свариваемых крупногабаритных заготовок является нарушение геометрии взаимного расположения основного и плакирующего листа, а также эффект подогрева свариваемых поверхностей до их соударения. При этом на основании экспериментов делается заключение о том, что при сварке взрывом происходит опережающее фронт детонации вертикальное перемещение метаемого листа на расстояние, соизмеримое со сварочным зазором, а также возбуждение в нём упругих вертикальных колебаний с амплитудой порядка 1...1,5 мм [223].

Современные промышленные технологии производства крупногабаритных двухслойных листов в ООО «Битруб Интернэшнл», в DMC (США), Nobelclad (Франция) предполагают сборку пакетов из основного и плакирующего листов в цехе и транспортировку в собранном виде на взрывную площадку. Для исключения разрушения пакета при транспортировке автотранспортом на расстояние до 20 км по дорогам общего пользования опоры, выдерживающие сварочный зазор, крепятся к основному листу, а листы скрепляются болтами по периметру. Такая конструкция пакета исключает вертикальное взаимное перемещение листов в процессе сварки взрывом и изменение величины зазора. Возбуждение вертикальных колебаний плакирующего листа затруднено, так как он установлен на опоры, расположенные с определённым шагом по всей поверхности листа, а с другой стороны на лист действует, кроме собственного веса, масса заряда и песчаная забойка. Таким образом, при промышленной технологии производства двухслойных листов сваркой взрывом практически исключается изменение сварочного зазора и опережающее колебание плакирующего листа [223].

Экспериментально путём исследования структуры и свойств соединения слоёв на крупногабаритных листах проведена оценка максимальных размеров двухслойных листов требуемого качества, которые можно получить методом сварки взрывом [223, 227]. Исследования позволили предложить методику определения максимальных размеров листов по длине и ширине, которые можно с заданным качеством получить сваркой взрывом [227].

Исследование [195, 223, 227] проводили на наиболее распространённой биметаллической паре марки 09Г2С+08Х18Н10Т. В ООО "Битруб Интернэшнл" были изготовлены 3 листа размерами 30(26+4)х2000х12900 мм (рисунок 5.9) по принятой на предприятии технологии и режимам (ВВ - смесь микропористой аммиачной селитры с дизельным топливом, $D = 2200 - 2400$ м/с). Инициирование процесса сварки производилось с торца листа, обеспечивая направление распространения детонации по длинной стороне листа.

Ультразвуковой контроль сплошности соединения выявил наличие дефектов сплошности характерной формы в конечной зоне листов (рис. 5.9 а).

Комплексное исследование качества соединения слоёв по сплошности соединения, прочности и структуре проводили на одном из листов после термической обработки (нагрев $720 \pm 20^\circ\text{C}$, выдержка 2 часа, охлаждение до 300°C с печью) и холодной правки. Из биметаллического листа отобрали темплеты в направлении детонации по всей длине листа. На каждом темплете проводили исследования макро и микроструктуры, испытания прочности на отрыв плакирующего слоя. Структурные исследования включали измерение размеров волн по длине листа, определение количества литых включений, их химического состава, изучение структуры в зоне дефектов сплошности.

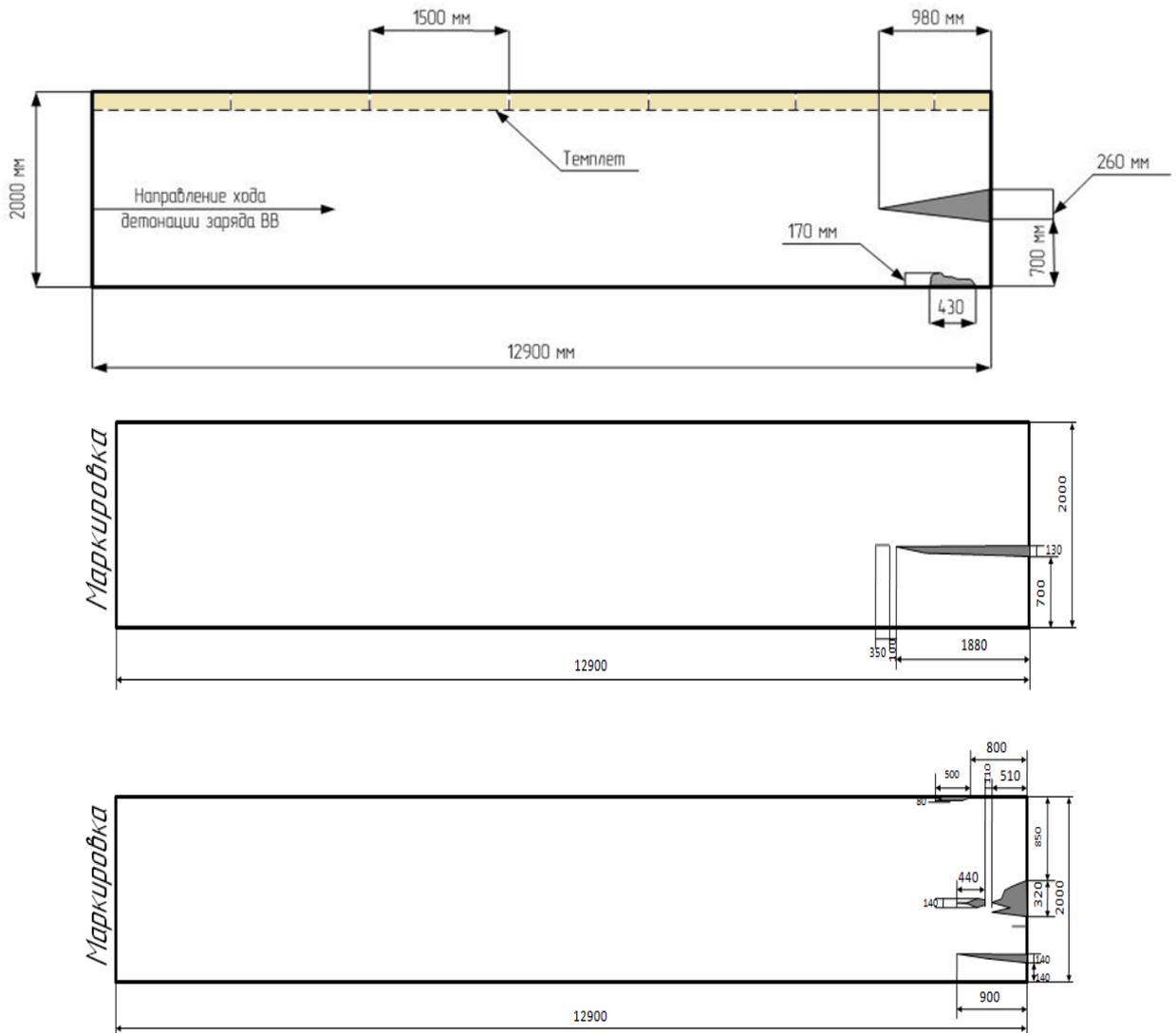
Из темплетов размером 100x1450 мм изготавливали макрошлифы (рисунк 5.9 б). Каждый темплет размечался на сектора по 100 мм. На каждом секторе проводили замеры длины и высоты каждой волны в соединении и определяли среднеарифметическое значение их величин на участке длиной 50 мм. По этим значениям строился график их изменения по длине темплета. Полученные графики на каждом темплете совмещали по их расположению по длине листа. В результате получили зависимость изменения длины волны по длине крупногабаритного листа [223].

Затем от каждого темплета отбирали по шесть образцов для испытания прочности соединения на отрыв и по три образца для изготовления микрошлифов. На микрошлифах определяли усредненную толщину расплавов в соединении как отношение суммарной площади литых включений к длине измеряемого участка с нанесением результатов на теоретическую кривую глубины проплавления поверхности листов [223].

В процессе исследования была измерена усредненная толщина металла вихревых зон по зависимости δ_B [194]:

$$\delta_B = \frac{\sum_{n=1}^k S_n}{L} j, \quad (5.1)$$

где S_n – площадь n-ой из k вихревых зон в плоскости шлифа; L_k – длина участка соединения с k вихревых зон.



а



б)

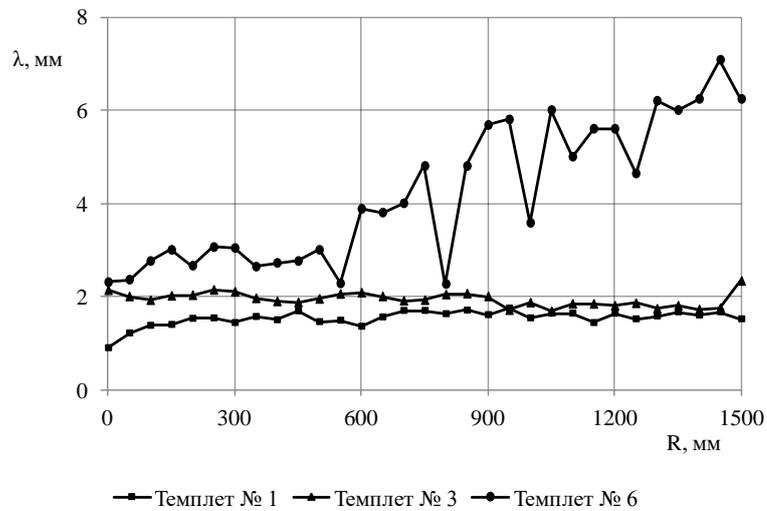
Рисунок 5.9 – Схема отбора темплетов и карты ультразвукового контроля двухслойных листов 09Г2С+08Х18Н10Т размером 2000x12900 мм (дефекты сплошности закрасены серым, темплеты закрасены желтым) (а), разметка темплетов (б).

Оценку структурных изменений проводили путем теоретического определения для листа размерами 2000x13000 мм параметров ударно-сжатого газа в сварочном зазоре впереди точки контакта по методике [135], времени и результатов его воздействия на свариваемые поверхности [223]. Также исследовали структуру и состав дефекта сплошности в конечном участке листов (см. рис.5.9 а).

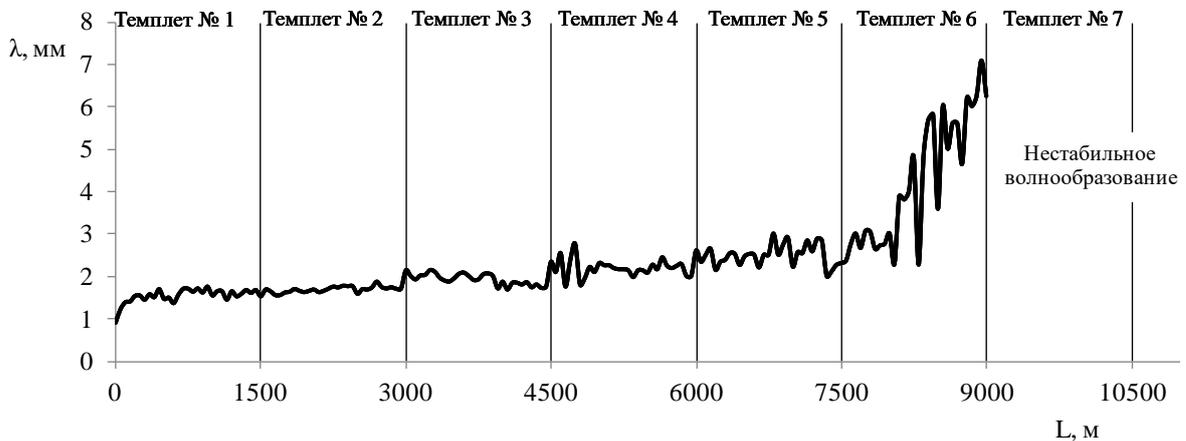
На темплете №1, соответствующему началу процесса сварки, волнообразование начинается практически с самого начала листа. Длина волн составляет 0,8 мм, затем размер волн возрастает и на расстоянии 125 мм стабилизируется с длиной волн $1,6 \pm 0,2$ мм (рисунок 5.10 а). Высота волн колеблется от 0,4 до 0,8 мм. На темплетях № 2 и 3, длина волн находится в пределах от 1,46 до 2,13 мм и на темплетях №4 и 5 незначительно возрастает (таблица 5.6). На темплете №6 длина волны составляет около 2,3 мм, а затем, на расстоянии 8000 мм от начала процесса, резко возрастает. Следует отметить, что высота волн в среднем не изменяется [223, 227].

Таблица 5.6 – Параметры волн в соединении 09Г2С+08Х18Н10Т в зависимости от расстояния от начала сварки [223].

№ Темплета (расстояние от начала сварки)	Длина волны, мм		Высота волны, мм	
	min	max	min	max
1 (0-1500 мм)	0,85	1,78	0,30	0,84
2 (1500-3000 мм)	1,46	1,83	0,34	1,04
3 (3000-4500 мм)	1,56	2,13	0,4	0,92
4 (4500 -6000 мм)	1,54	3,65	0,44	0,8
5 (6000-7500 мм)	2	3	0,36	1
6 (7500-9000 мм)	2,28	7,16	0,4	0,88
7 (9000-11500 мм)	Нарушение волнообразования			
8 (11500 мм – 12900 мм)	Нарушение волнообразования			



а



б

Рисунок 5.10 – Изменение длины волны в соединении 09Г2С+08Х18Н10Т на темплетах (а), точка соответствует среднеарифметическому значению длины волны на участке 50 мм и по мере удаления от начала инициирования процесса сварки взрывом (б) [223, 227].

Совмещение графиков зависимости λ - L , полученных на отдельных темплетах, выявило общую картину изменения длины волны в соединении 09Г2С+08Х18Н10Т по длине листа (рисунок 5.10 б). Выявлено, что на расстоянии 8 м от начала процесса наблюдается стабильное волнообразование с длиной волн 1,5 до 2,3 мм и высотой волн от 0,3 до 1 мм [223]. Следовательно, не изменяются кинематические параметры процесса (скорость точки кон-

такта, скорость соударения и сварочный зазор). На расстоянии свыше 8 м скачкообразно длина волн увеличивается до 7 мм с сохранением высоты волны, на расстоянии свыше 9 м волны становятся бесформенными, процесс волнообразования нарушается (рисунок 5.11). Аналогичный эффект срыва волнообразования был получен специалистами ВолГТУ при сварке взрывом образцов алюминия с алюминием и стали со сталью [12].

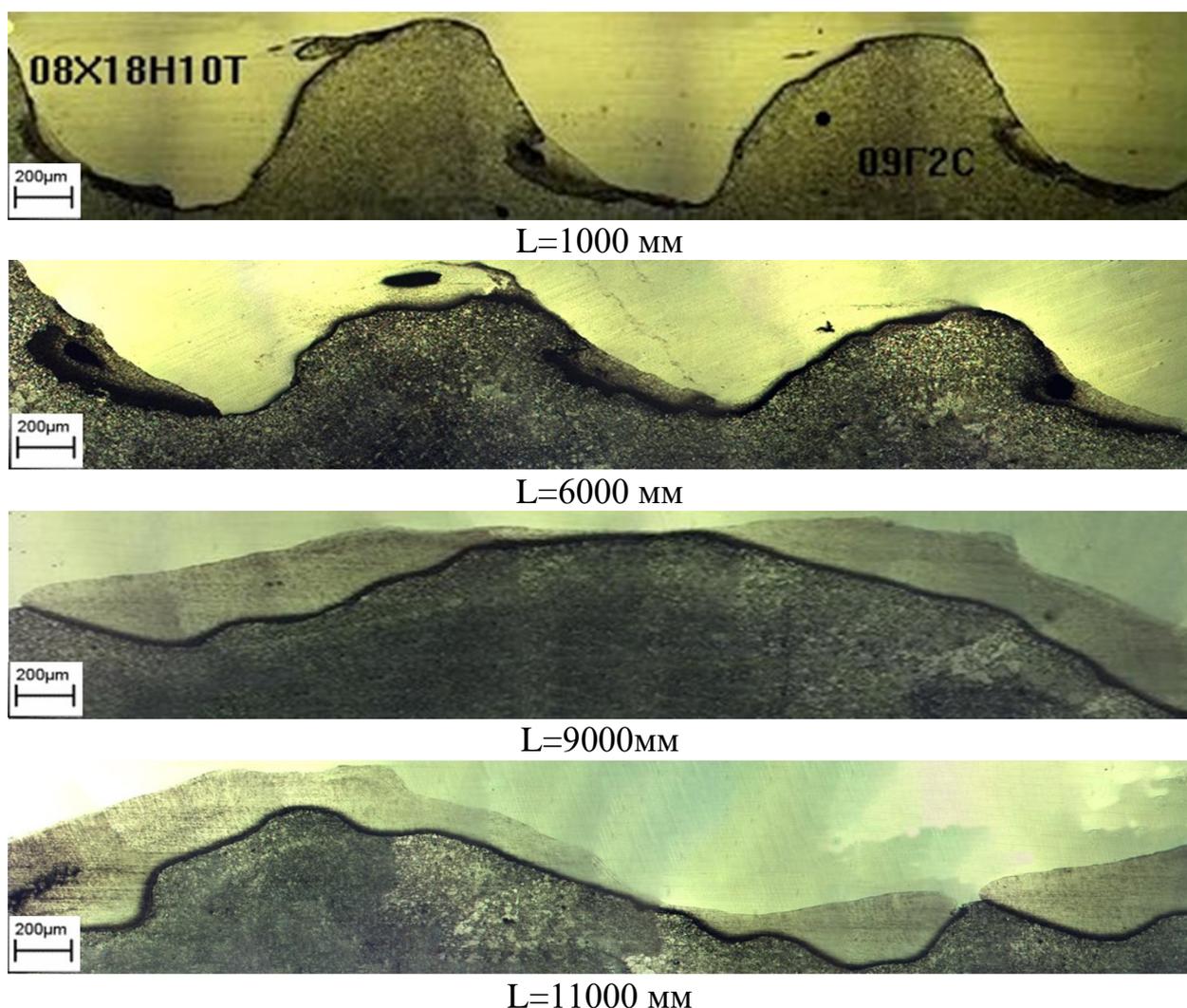


Рисунок 5.11 – Микроструктура зоны соединения 09Г2С+08Х18Н10Т на расстоянии L от начала процесса сварки [223].

Исследование микроструктуры показало, что в зоне стабильного волнообразования волны имеют характерную форму с локальными литыми включениями на вершинах и впадинах волн (см. рисунок 5.11). Усреднённая толщина расплавов в этой зоне колеблется в пределах от 50 мкм до 200 мкм (рисунок 5.12). В зоне нестабильного волнообразования волны трудноразли-

чимы, литые включения представляют собой полосы сплошного расплава усреднённой толщиной более 230 мкм.

Прочность соединения по всей длине листа превышает 600 МПа, в том числе и на участках, имеющих сплошной расплав (рисунок 5.13). При испытаниях на боковой изгиб образцов из конечных зон было установлено, что происходит растрескивание литого включения, однако трещины не выходят за его пределы [223].

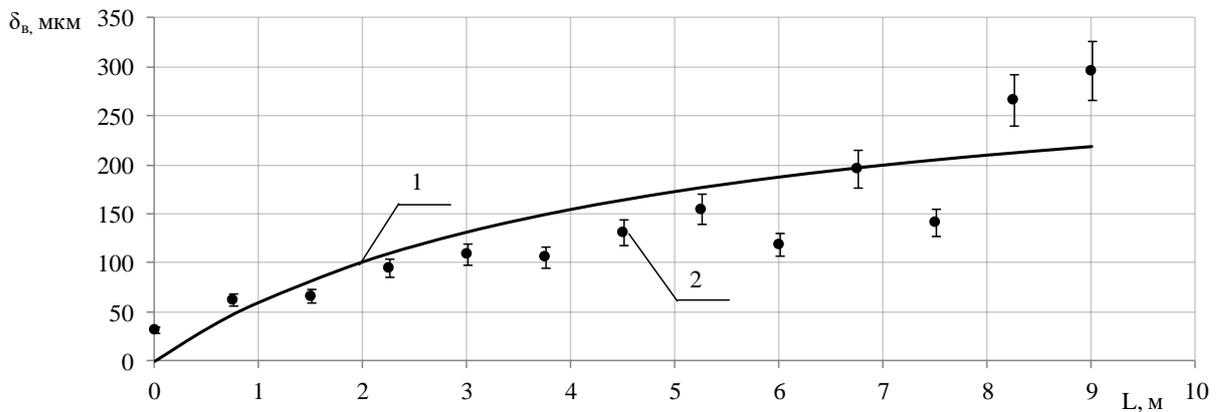


Рисунок 5.12 – Зависимость усредненной толщины расплавов в соединении 09Г2С+08Х18Н10Т от расстояния от начала процесса сварки взрывом 1 – расчетные данные, 2 – экспериментальные данные [223, 227].

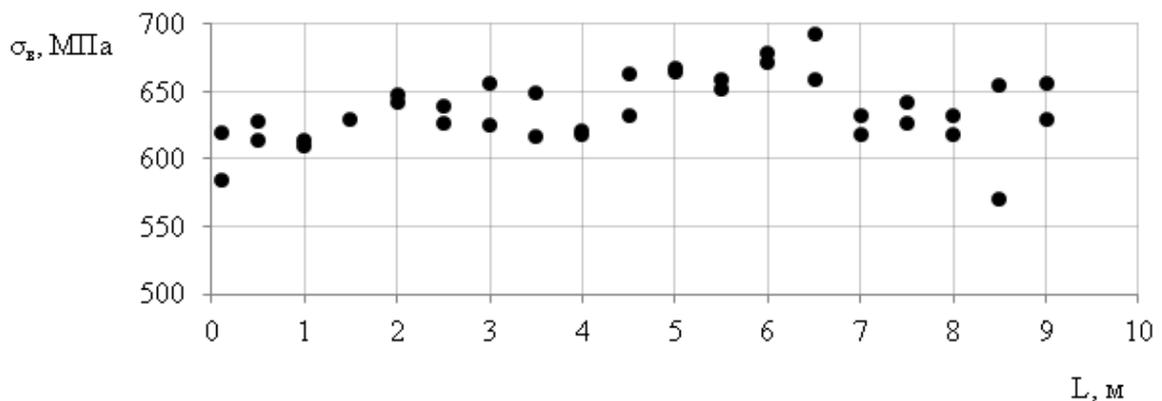


Рисунок 5.13 – Результаты измерений прочности на отрыв соединения 09Г2С+08Х18Н10Т по длине листа.

Для исследования поверхности основного и плакирующего слоя в зоне дефекта сплошности плакирующий слой был вырезан по контуру в соответствии с результатами УЗК (см. рис. 5.9 а). При визуальном осмотре поверхности основного и плакирующего слоя было установлено, что обе поверхности покрыты сплошным тонким слоем оплавленного металла (рисунок 5.14).



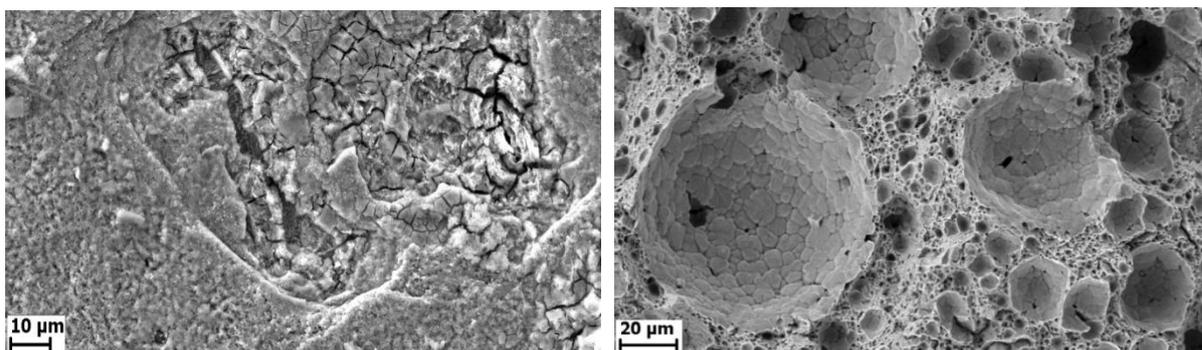
Рисунок 5.14 – Поверхность основного слоя (а) и плакирующего (б) слоев в зоне несплошности после её вскрытия [227].

При детальном изучении оплавленного слоя металла на поверхности плакирующего слоя выявлено, что он состоит из двух микрослоёв толщиной 20 мкм. Слои отделили от поверхности и исследовали на сканирующем электронном микроскопе [223].

Исследования показали, что микрослой, прилегающий непосредственно к поверхности нержавеющей стали (внутренний микрослой) темного цвета, хрупкий. Внутренний микрослой представлял собой окалину с соответствующей структурой (рисунок 5.15 а) и составом (таблица 5.7). Выявлена смесь оксидов Fe_3O_4 , FeO , которые, по-видимому, образовалась в ударно-сжатом газе вследствие реакции с кислородом дисперсных жидких частиц железа с осаждением на поверхности плакирующего слоя.

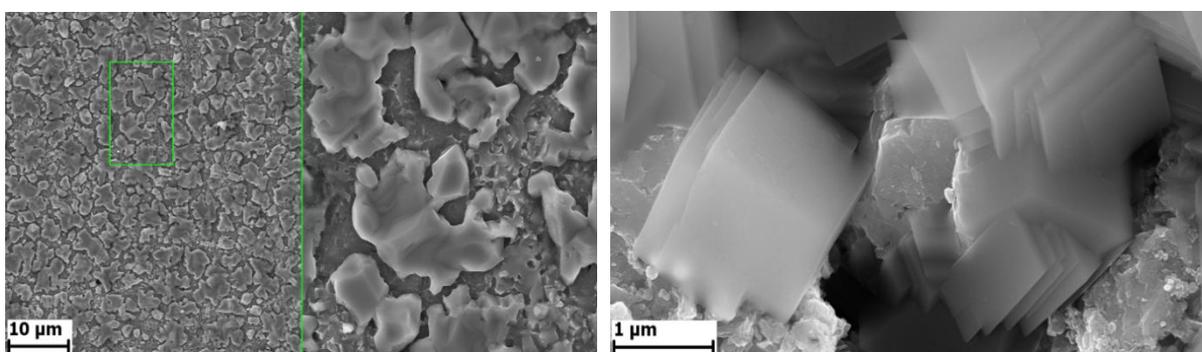
Наружний микрослой светлый, с металлическим блеском и пластичный. Поверхность разрушения светлого микрослоя имеет структуру вязкого чашечного излома (рисунок 5.15 б). Причем фасетки имеют или гладкую поверхность или структуру рекристаллизованных зерен. Химический состав

всех структур одинаков и представляет собой смесь углеродистой и нержавеющей сталей [223] (см. табл. 5.7).



а

б



в

г

Рисунок 5.15 – Микроструктура хрупкого (а) и пластичного (б) микрослоев в зоне разрушения, кристаллы на поверхности пластичного слоя (в, г) [223].

Таблица 5.7 – Характерный состав хрупкого (1) и пластичного (2) микрослоев в зоне разрушения и кристаллов (3), вес. % [223].

Спектр	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1	36.89	0.67	–	1.02	0.48	60.88	0.05
2	0.61	0.59	0.42	7.17	1.23	86.78	3.20
3	1.30	1.81	1.11	0.84	1.73	92.97	0.24

На поверхности светлого верхнего слоя выявлены кристаллы (рисунок 5.15 в, г), которые методом микроанализа были идентифицированы как чис-

тое железо, образовавшееся, по-видимому, вследствие разложения окислов железа и последующей кристаллизации (см. табл. 5.7).

По предложенной ранее формуле (2.14) [135], учитывающей истечение газа из сварочного зазора, определили изменение длины области ударно-сжатого газа для листов шириной от 0,5 до 4 метров и длиной до 13 метров. Эффект роста области ударно-сжатого газа становится сильно заметен только для листов шириной более 1500 мм, таким образом имеет место масштабный эффект. Для оценки влияния УСГ на процесс образования соединения важно знать время, в течение которого УСГ воздействует на рассматриваемые точки поверхности свариваемых листов до их соударения в точке контакта. Расчёт по формулам (3.1) времени его воздействия t для листов длиной 12 м и шириной от 0,5 м до 4 м показал (рис. 5.16), что эти параметры с увеличением ширины листа растут. В частности, при увеличении ширины листов в 2 раза протяжённость области и время воздействия на свариваемые поверхности УСГ также возрастают почти в 2 раза [223].

Для исследуемого двухслойного листа зона, где нарушается режим волнообразования длина области УСГ, составляет примерно 350-400 мм, а время воздействия - 150-170 мкс (рисунок 5.16, ширина листа 2 м). Эта величина области УСГ и время воздействия являются критическими и соответствуют экспериментально определённой толщине расплава в зоне соединения более 230 мкм (см. рис. 5.11) [223, 227]. Указанная толщина расплава была принята в качестве верхнего «предела качественной сварки взрывом» стали со сталью. Линия «предела качественной сварки», параллельная оси абсцисс (примерно 160 мкс), наносится на график расчётных зависимостей «время воздействия УСГ - длина листа». Точка пересечения кривых и линии «предела качественной сварки» определяют максимальную длину листа для выбранной ширины. Критическая длина и ширина листа меняется в зависимости от скорости точки контакта.

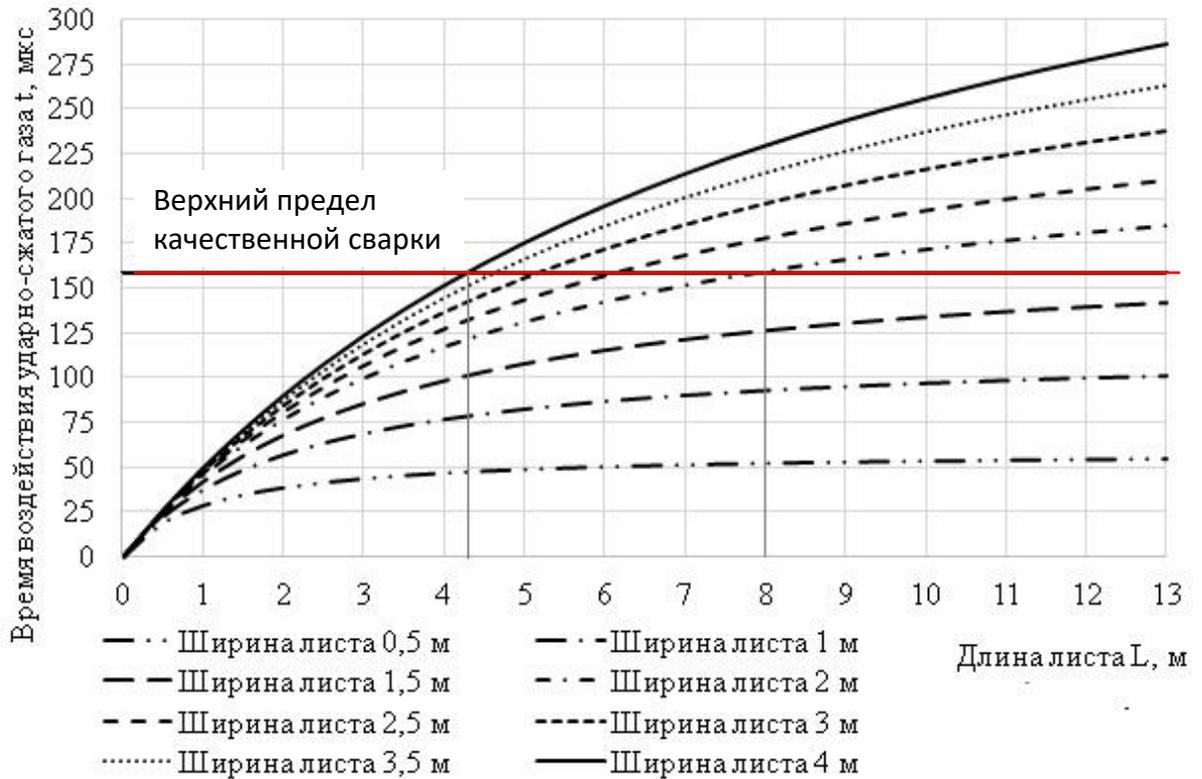


Рисунок 5.16 – Расчётная зависимость времени воздействия области ударно-сжатого газа t на свариваемые поверхности от длины l и ширины листа b . 160 мкс - экспериментальный верхний «предел качественной сварки» (красная линия). Точка пересечения линий соответствует максимальной длине листа для заданной ширины, на которой можно получить качественное соединение [223].

Длина области УСГ в сварочном зазоре растёт от начала процесса к зоне окончания сварки и при увеличении ширины листа, что приводит к росту усреднённой толщины оплавленного металла в зоне соединения. Таким образом процесс сварки взрывом из твердофазного переходит в жидкофазный с образованием расплавов толщиной, соизмеримой с высотой образующихся волн. Изменение толщины расплавов по длине листа (рисунок 5.12, кривая-1) соответствует расчетам глубины проплавления по методике [228, 229].

В классической теории сварки взрывом нижняя и верхняя области сварки определяются в плоскости $\gamma - V_k$ [6]. Согласно этой зависимости, при условии постоянства угла соударения и скорости точки контакта, количество расплавов в соединении не должно изменяться [223]. Результаты измерения

скорости детонации плоских крупногабаритных зарядов (п.5.2) показывают, что при применении рекомендуемого ВВ скорость детонации остается постоянной в течение всего процесса сварки. Постоянство угла соударения определяется строгим выдерживанием сварочного зазора, что достигается применением специальной технологической оснастки. Однако нельзя полностью исключить возможность увеличения величины γ вследствие изменения величины сварочного зазора при колебании плакирующего листа. Этот процесс, согласно [12], может сопровождаться появлением в соединении волн с аномальной длиной волны и срывом волнообразования. Вопрос требует дополнительного изучения.

Проведенные расчеты и эксперименты показали, что свариваемые поверхности до соударения в точке контакта нагреваются до высоких температур. Характер распределения волн и литых включений в соединении по длине крупногабаритного листа указывает на то, что оплавление поверхностных слоев впереди точки контакта в процессе сварки взрывом происходит вследствие аэродинамического нагрева, включающего конвективный нагрев и радиационное излучение. При этом под действием плазмы происходит разложение окислов и горение органических загрязнений, а увеличение длительности воздействия приводит к оплавлению свариваемых поверхностей. Глубина оплавления зависит от времени воздействия ударно-сжатого газа. Появление расплавленного слоя на свариваемых поверхностях приводит к нарушению процесса образования соединения в твердой фазе и прекращению волнообразования, так как процесс соударения протекает между поверхностями, покрытыми слоем расплава. Предлагается определять верхнюю границу качественной сварки крупногабаритных листов углеродистой стали с коррозионностойкой сталью как соответствие глубине проплавления свариваемых поверхностей не более 0,23 мм (см. рис.5.12) или времени воздействия УСГ 160 мкс. При использовании расчётных зависимостей «время воздействия УСГ - длина листа» на график наносится линия, параллельная оси

абцисс, определяющая верхнюю границу сварки (см. рис. 5.16). Точка пересечения линий соответствует максимальной длине листа для выбранной ширины при скорости точки контакта 2400 м/с. В зависимости от скорости точки контакта критическая длина и ширина листа будет меняться [223].

Предложенная методика апробированна при промышленном производстве двухслойных листов сваркой взрывом в ООО "Битруб Интернэшнл" [211]. В частности, при производстве двухслойных заготовок размерами 110(105+5)х4050х4700 мм, длина которых по расчетам была близка к предельной, в конечной зоне в структуре соединения были выявлены практически сплошные расплавы толщиной 0,20-0,25 мм с характерными раковинами и трещинами. В то же время на листах шириной 1500 мм и длиной до 10000 мм не выявлено в соединении сплошных расплавов.

5.4 Технологические основы промышленного производства биметалла сваркой взрывом

Технологические основы промышленного производства биметалла сваркой взрывом, разработанные на основе проведенных исследований [5, 63, 190, 215, 223, 231] и опубликованных данных [233, 234], включают:

1. Выбор схемы и режимов сварки с учётом свойств свариваемых материалов, особенностей деформации листов и узких граней, обрезки нависаний плакирующего листа. В зависимости от свойств свариваемых материалов процесс сварки осуществляется в среде защитных газов [5, 169].

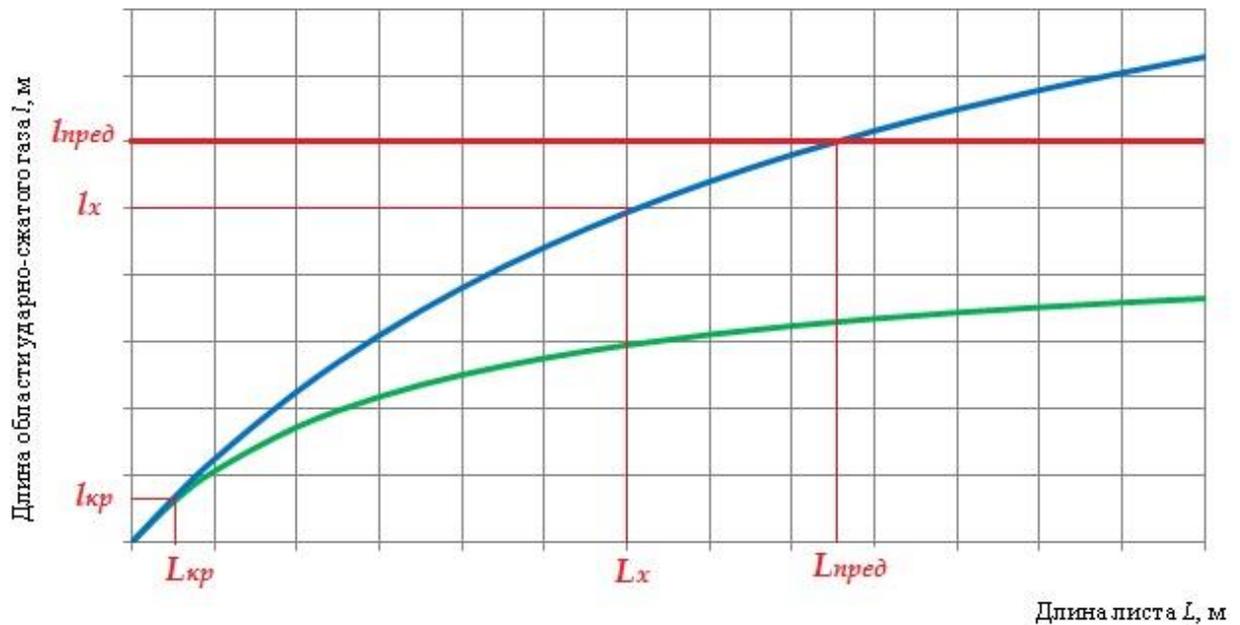
Выбор схемы сварки рекомендуется проводить в следующей последовательности. Определяется расчетная величина зоны УСГ для заданной ширины листа (рис.5.17):

$$l_{кр} < l_x < l_{пред} , \quad (5.3)$$

где l_x – протяженность зоны ударно-сжатого газа в рассматриваемой точке L_x , определяется по формуле (2.4), и строится график изменения l_x от длины листа при заданной ширине. Значения параметров УСГ для расчетов определяются по формулам (2.2)

$l_{кр}$ - минимальный размер области УСГ, который обеспечивает очистку и активацию свариваемых поверхностей, достаточную для образования соединения заданной прочности. Определяется по экспериментальной зависимости прочности соединения на отрыв от начала процесса сварки взрывом по длине листа (рисунок 5.18).

$l_{пред}$ - определяется из условия верхней границы сварки (см. рис.5.16), когда под воздействием УСГ происходит образование оплавленного слоя по всей длине линии соединения, что составляет для биметалла сталь-нержавеющая сталь примерно 200 мкм.



- Лист имеет предельную длину листа для рассматриваемой ширины,
- Лист не имеет предельной длины листа для рассматриваемой ширины.

Рисунок 5.17 – Схема расчетной величины зоны УСГ для листов с различной шириной.

Разработка конструкции пакета:

- Определение размеров генератора ударного газа и технологических пластин рекомендуется проводить из условий: $h_1 \rho_1 \sim h \rho$,

где h_1 и ρ_1 - толщина и плотность пластин генератора и технологических пластин, h и ρ - толщина и плотность плакирующего слоя.

$x \geq L_{min}$, где x - длина пластин генератора, $L_{min} = L_{кр}$ - минимальное расстояние от начала процесса, обеспечивающее получение минимально допустимой прочности соединения слоев σ_{min} по ГОСТ 10885-85 (150 МПа) (рис.5.18).

- Ширина технологических пластин не менее ширины нависаний плакирующего листа. В случае сварки взрывом при отрицательных температурах размер листа титана должен быть увеличен.
- При сварке титана со сталью конструкция пакета должна обеспечивать соблюдение условия (4.13).
- Герметизация сварочного зазора. При сварке взрывом без использования защитного газа при герметизации сварочного зазора должно быть исключено попадание песка, влаги и др. загрязнений при транспортировке и на взрывной площадке. В случае сварки взрывом в среде защитных газов должна быть обеспечена герметичность, исключающая неконтролируемый выход защитного газа из сварочного зазора.

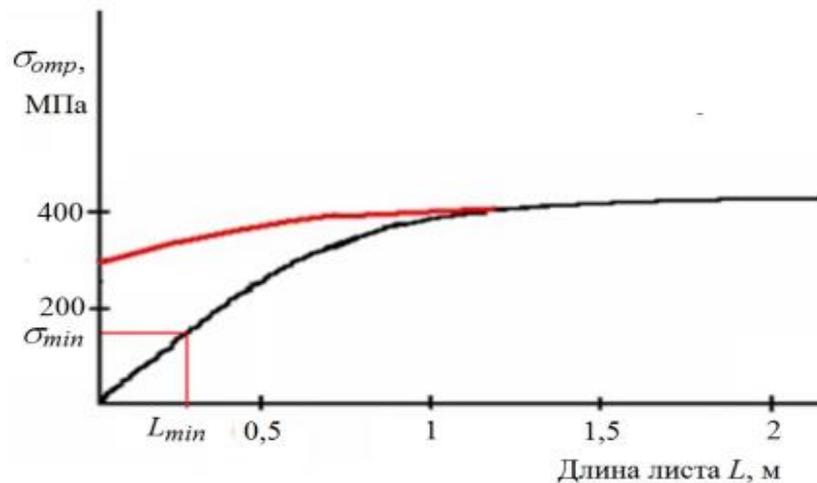


Рисунок 5.18 – Изменение прочности соединения на отрыв по длине образца от начала процесса или точки инициирования по существовавшей технологии (черная линия) и по современной технологии (красная линия).

2. Рациональную технологию подготовки поверхностей исходных материалов, которая разрабатывается на основании исследований влияния шеро-

ховатости свариваемых поверхностей и поверхностных загрязнений (влаги, ржавчины, окалины, масла и др.) [36] с учётом свойств свариваемых материалов и требований к готовому биметаллу [5, 169].

3. Разработку конструкции и технологии сборки пакетов (см. рис. 6.3 а) с учетом влияния газа в сварочном зазоре на процесс образование соединения и его качество.

4. Использование в качестве ВВ смеси гранулированной микропористой аммиачной селитры с дизельным топливом, что позволяет до минимума сократить применение промышленных ВВ, механизировать процесс приготовления смеси, обеспечить высокое качество сварки за счёт стабильности состава и плотности заряда по всей его поверхности [169]. При приготовлении смеси аммиачной селитры с дизельным топливом рекомендуется использовать микропористую аммиачную селитру, изготовленную по ТУ 2143-036-002-3789-2003 [215]. При отрицательных температурах использовать зимнее дизельное топливо. При этом компоненты смеси должны сопровождаться сертификатами. Для визуального контроля качества смешивания дизельное топливо должно быть предварительно окрашено.

5. Для обеспечения круглогодичного производства биметалла в условиях Подмосковья и сведения к минимуму влияния внешних факторов технология предусматривает сборку пакетов из основного и плакирующего листов в цехе, что обеспечивает заданный сварочный зазор, его герметизацию и сохранение при транспортировке и грузоподъёмных операциях. В цехе предусмотрена возможность подогрева пакета в случае отрицательной температуры воздуха. На площадке ведения взрывных работ проводится только подготовка опоры, установка пакета на опору, раскладка и подрыв заряда [169].

6. Термическая обработка необходима для снятия остаточных напряжений в зоне соединения, последующая холодная правка проводится для обеспечения заданной плоскостности. Режим термической обработки назначается в зависимости от марки биметалла и толщины листов, при этом указывается скорость нагрева, время выдержки и режим охлаждения. Технологию холод-

ной правки определяет предприятие, производящее правку, в зависимости от применяемого оборудования.

7. Контроль качества готового биметалла, включающий УЗК, отбор проб, проведение испытаний в соответствии с нормативно-технической документацией. Ультразвуковой контроль должен проводиться аттестованным дефектоскопистом, поверенным прибором и датчиками, в соответствии с технологической картой УЗК. Рекомендовано ультразвуковой контроль сплошности соединения проводить при настройке прибора по плоскодонному отверстию $D5$ мм и отмечать участки, в которых фиксируются шумы вблизи браковочного уровня. Эти участки дополнительно контролировать при настройке по отверстию $D3,5$ мм. Пробы для испытаний прочности соединения слоев рекомендуется отбирать из конечных зон листов. В случае применения для плакирующего слоя карты, сваренной из отдельных листов, рекомендуется проводить на готовом листе контроль сварного шва методом капиллярной дефектоскопии.

5.5 Выводы по главе

1. Применительно к изготовлению сваркой взрывом крупногабаритных биметаллических листов установлено влияние на скорость детонации процентного содержания дизельного топлива в смеси микропористой аммиачной селитры, высоты заряда, а также наличия забойки из песка. Определено, что в изученном диапазоне толщин заряда скорости детонации смесей близки к оптимальным для получения сваркой взрывом качественного соединения. Показано, что микропористая аммиачная селитра, изготовленная по ТУ 2143-036-002-3789-2003, обладает необходимой удерживающей способностью, прочные сферические гранулы обеспечивают технологичность при смешивании с дизельным топливом в гравитационных смесителях и не уплотняются при раскладке заряда, имеют постоянную плотность и скорость детонации по всему заряду, чем обеспечивают заданный режим сварки взрывом по всей поверхности.

2. Экспериментально установлено, что при подрыве плоских зарядов смеси микропористой аммиачной селитры (ТУ 2143-036-002-3789-2003) с дизельным топливом при соотношении 96:4 и 95:5 в условиях сварки взрывом с песчаной забойкой тротиловый коэффициент по распространению воздушной ударной волны составляет 0,25 (для взрывной площадки ФКП НИИ «Геодезия» принято 0,4).

3. Проведено комплексное исследование качества сцепления слоёв на темплетах, отобранных по длине двухслойного листа размерами 30(26+4)x2000x12900 мм. Изучены сплошность и микроструктура соединения, а также прочность на отрыв плакирующего слоя. Структурные исследования, включающие измерение размеров волн по длине листа, определение усредненной толщины литых включений, их химического состава и изучение структуры в зоне дефектов сплошности показали, что на некоторой длине листа процесс сварки взрывом из соединения слоев в твердой фазе переходит в жидкофазный с образованием расплавов по всей поверхности соединения, толщиной соизмеримой с амплитудой образующихся волн. Эту толщину расплавов приняли за верхнюю расчётную границу сварки стали со сталью. На основе экспериментально определенного верхнего «предела качественной сварки» (по количеству расплавов в соединении), определении размера области ударно-сжатого газа в сварочном зазоре и времени его воздействия на свариваемые поверхности предложена методика расчетной оценки предельных размеров листов в зависимости от ширины и длины свариваемых листов.

4. Установлено, что максимальные предельные размеры листов, получаемых сваркой взрывом с требуемым качеством, определяются процессами, происходящими в ударно-сжатом газе в сварочном зазоре. При увеличении ширины листа уменьшается длина, на которой обеспечивается качественное соединение.

5. На основании проведенного комплекса исследований разработаны:

- научные основы, включающие критерии условий получения качественного соединения по всей свариваемой поверхности (в том числе в краевых

зонах), с учетом процессов, происходящих в сварочном зазоре, и свойств свариваемых материалов.

- технологические основы промышленного производства сваркой взрывом крупногабаритных листов биметалла, включающие требования к подготовке исходных материалов, конструкции и сборке пакетов в цехе, работам на взрывной площадке по подготовке и монтажу заряда ВВ, а также к контролю на всех стадиях производства и обработки биметалла после сварки взрывом.

б. Для достижения к моменту начала сварки слоёв биметалла требуемых параметров УСГ, определяющих условия очистки и преактивации свариваемых поверхностей, разработана конструкция генератора ударно-сжатого газа и схема сборки пакета на его основе. Показано, что в этом случае обеспечивается прочное соединение слоёв как в начальной зоне, так и по площади свариваемых листов.

6. Освоение современных промышленных технологий производства крупногабаритного биметалла для атомного, нефтехимического и судостроительного машиностроения

6.1. Разработка нормативно-технической документации на производство биметаллов ответственного назначения

Двухслойные листы с основным слоем из углеродистой, низколегированной, легированной стали и плакирующим слоем из коррозионно-стойкой стали или сплава, полученные методом сварки взрывом, соответствуют требованиям ГОСТ 10885-85. Для учёта специфических требований различных областей применения двухслойных сталей и особенностей процесса их производства сваркой взрывом разработаны, согласованы в установленном порядке и введены в действие следующие технические условия [34]:

1. ТУ 27.32.09.010-2005 «Сталь листовая двухслойная коррозионно-стойкая, изготовленная методом сварки взрывом».

2. ТУ 27.81.09.009-2005 «Заготовки двухслойные сталь + титан, полученные сваркой взрывом». Технические условия согласованы, зарегистрированы в установленном порядке и одобрены Управлением по регулированию безопасности атомных станций и исследовательских ядерных установок Ростехнадзора.

3. ТУ 0993-001-21414987-2012 «Лист стальной двухслойный коррозионно-стойкий, изготовленный методом сварки взрывом». Технические условия согласованы, зарегистрированы в установленном порядке и одобрены Управлением по регулированию безопасности атомных станций и исследовательских ядерных установок Ростехнадзора, внесены в НП-089-15 приложение №1 к Сводному перечню документов по стандартизации.

Общие требования к биметаллу по разработанным ТУ:

- С учетом конструкции элементов аппаратов перед плакированием сваркой взрывом допускается выполнять укрупнение листов для плакирую-

щего слоя электродуговой сваркой с зачисткой и контролем качества шва [193].

- Механические свойства двухслойных листов должны соответствовать требованиям соответствующих стандартов на сталь марок основного слоя в зависимости от требуемой категории.
- Плакирующий слой из коррозионно-стойких сталей и сплавов (за исключением ферритных сталей, никеля и монеля) не должен быть склонен к межкристаллитной коррозии при испытании по ГОСТ 6032.
- Сплошность соединения слоев биметалла контролируется УЗК. По сплошности сцепления слоев двухслойные листы должны соответствовать классу 0 или 1 по ГОСТ 22727.
- Величина сопротивления срезу и отрыву при определении прочности соединения слоев в двухслойных листах должна быть не менее 196 МПа. Прочность сцепления слоев в двухслойных листах определяют испытанием на изгиб на угол 160 градусов [193].

Для производства коррозионностойкого биметалла для нефтехимической промышленности были разработаны и согласованы в установленном порядке технические условия ТУ 27.32.09.010-2005 «Сталь листовая двухслойная коррозионностойкая, изготовленная методом сварки взрывом» [5] (Приложение №1), в которых изложены специфические требования к исходным материалам и к качеству получаемых листов. В частности, требуемые для крупногабаритного биметалла плакирующие листы из коррозионностойкой стали шириной более 1500 мм отечественная промышленность не производит, поэтому были разработаны требования к укрупнению листов, т.е. получению карты сварной. Учитывая то, что в процессе подготовки исходных материалов к сварке взрывом и в процессе самой сварки взрывом изменяется толщина листа, были установлены допуски на толщину листа, а также определена методика определения толщины плакирующего слоя с учетом волнообразного соединения.

При разработке ТУ 27.81.09.009-2005 «Заготовки двухслойные сталь-титан, изготовленные методом сварки взрывом» (Приложение №2) для производства биметалла сталь+титан учтены более жесткие требования к биметаллу по сплошности соединения, так как двухслойные листы используются для изготовления трубных решеток при производстве оборудования атомной энергетики. При разработке технических условий были учтены ПНАЭ Г-7-010-89 [235] в части требований к исходным материалам, сварным швам и картам плакирующего слоя, контролю их качества до и после изготовления листа, а также введены повышенные требования по сплошности соединения, объему механических испытаний.

Основное назначение толстолистового биметалла 22К+08Х18Н10Т - изготовление оборудования для АЭС, работающего при одновременном воздействии высоких температур, давлений и агрессивной среды (класс безопасности 2, 3). Для изготовления этого оборудования до 2012 года нормативным документом ПНАЭ-Г-7-008-89 (Приложение № 1 к Сводному перечню документов по стандартизации) [236] допускался биметалл, полученный методом пакетной прокатки (ТУ 0900-005-05764417-99). Метод пакетной прокатки является традиционным и широко используется при изготовлении биметалла для АЭС. По методу сварки взрывом в период 70-х годов прошлого столетия был проведен комплекс исследований структуры и свойств биметаллов 22К+08Х18Н10Т, полученных сваркой взрывом. Эти результаты опубликованы в работах [35, 36]. Совместно с ГНЦ НПО ЦНИИТМАШ при разработке технических условий на биметалл 22К+08Х18Н10Т, полученный сваркой взрывом, их согласования в установленном порядке и включения в сводный перечень был сделан анализ основных результатов исследования свойств биметалла, полученного сваркой взрывом, и сравнительный анализ требований технических условий на биметалл, полученный пакетной прокаткой и сваркой взрывом.

Анализ опубликованных данных по свойствам биметалла, полученного сваркой взрывом, пакетной прокаткой

Соединение в биметалле материалов различного химического состава и физико-механических свойств приводит к возникновению ряда граничных эффектов, возникающих при термических воздействиях, связанных с технологическим циклом изготовления биметалла, оборудования из него и, в меньшей степени, при эксплуатации оборудования. При этом в зоне соединения наблюдается появление структур повышенной твердости и пониженной пластичности. Эти процессы зависят от метода изготовления биметалла.

Систематические исследования [35, 36, 237-241] структуры, прочностных и служебных характеристик биметалла, полученного сваркой взрывом, с изучением его механических свойств при статическом, ударном и циклическом нагружении, при повторных теплосменах, а также коррозионной стойкости выявили следующее.

Металлографические исследования структуры и свойств биметалла марки 22К+08Х18Н10Т показали [35]: микроструктура основного металла – феррит+перлит, плакирующего слоя – аустенит+карбиды. В зоне соединения шириной 0,2-0,7 мм зёрна перлита и феррита деформированы. Микротвёрдость аустенита в зоне соединения до термообработки – 3260-4730 НV, с поверхности – 2320-3200 НV. После термической обработки по режиму – отпуск 630°С, аустенизация при 1050°С, отпуск 630°С – в структуре соединения в стали 22К выявлена обезуглероженная зона глубиной до 0,2 мм, в аустенитной стали – науглероженная зона глубиной 0,1-0,15 мм. Микротвёрдость аустенита в зоне соединения составляет 2570-286 НV, у поверхности – 2320-2570 НV. Прочность соединения после термической обработки составила: на отрыв плакирующего слоя – 465-570 МПа, на срез - 390-500 МПа. Испытания механических свойств основного металла проводили после удаления плакирующего слоя. В результате испытаний получены следующие данные: предел прочности – 535-570 МПа, предел текучести – 320-375 МПа,

удлинение - 22-28 %, сужение - 61,5 %, ударная вязкость – 110-148 Дж/см² [169].

Одним из ведущих показателей несущей способности разнородных композиций является их сопротивляемость воздействию переменных нагрузок, которая теоретически по принципу аддитивности должна занимать некоторое промежуточное положение между соответствующими характеристиками составляющих материалов.

Испытания на стойкость биметалла марки 22К+08Х18Н10Т к сопротивлению циклическим нагрузкам на сопротивление усталости показали [35, 36, 237-241], что предел выносливости биметалла, полученного сваркой взрывом, достигает предела выносливости основного металла или несколько превосходит его. Разрушение развивается преимущественно по основному металлу. Вплоть до конечной стадии эксперимента (наступление излома) какихлибо визуально выявленных повреждений в зоне соединения не наблюдалось. Металлографический анализ этой области не выявил повреждений и на микроуровне – ни в обезуглероженной зоне, ни в прилегающих твёрдых прослойках. Несмотря на резко выраженную химическую, структурную и механическую неоднородность зоны соединения двухслойной стали обеспечиваются показатели циклической прочности на уровне металла основы или выше.

В результате испытаний на малоцикловую усталость образцов после высокотемпературной обработки установлено [35, 36], что деформационная способность повышается ($e_{\text{повр.}} \sim 25\%$), дефекты носят единичный характер и в ряде случаев вообще не выявляются. Повреждения в зоне соединения возникали при перегрузках $K=1,5$ и накопленной деформации $e_{\text{повр.}} \sim 10 \div 12\%$ со стабилизацией размера повреждения около 1 мм после $N=5 \cdot 10^3$ циклов. На базе $N=10^4$ циклов их дальнейший рост не наблюдался, что определяется, видимо, выходом трещины из зоны соединения. Квазистатическое разрушение достигнуто при перегрузке $K=1,7$, $e_{\text{разр.}}=50\%$ без расслоений.

Испытания на сопротивление термической усталости проводились на темплетах, отобранных из указанных выше двухслойных листов марки 22К+08Х18Н10Т. Призматические образцы с продольным концентратором в плакирующем слое (радиус 0,25 мм) подвергались старению при температуре 350°С в течение 5000 часов и термоциклированию по режиму 350°С - 20 °С (200 и 1000 циклов). В результате испытаний изменений прочности соединения после старения (590 МПа) и термоциклирования (530 МПа) не выявлено. Исходная прочность соединения – 550 МПа. Микроструктура не претерпела заметных изменений.

Таким образом, сварка взрывом биметалла марки 22К+08Х18Н10Т **обеспечивает** прочное соединение слоёв стабильного качества по всей поверхности крупногабаритного листа без изменения свойств исходных материалов и обеспечивает стойкость биметалла к сопротивлению **циклическим нагрузкам и термической усталости**.

Для уточнения прочностных характеристик биметалла по его площади были проведены исследования прочности соединения на отрыв в процессе изготовления сосуда. При изготовлении сосудов из листов двухслойной стали марки 22К+08Х18Н10Т размерами 75(70+5) x3150x5000 мм для обечайки (9 листов) и 2630x2630x90 мм для днищ (4 листа) провели исследование прочности соединения слоёв по следующей методике [34]:

1. Из конечных участков от двухслойных листов после сварки взрывом вырезали темплеты, из которых были изготовлены образцы для испытаний прочности соединения и исследования структуры до и после термообработки по режиму имитирующему нагреву при изготовлении сосуда: аустенизация – 1050 °С, стабилизирующий отжиг – 900 °С, отпуск – 640 °С.

2. Из каждой обечайки было вырезано по 20 пробок из мест установки штуцеров, согласно схеме рисунка 6.1, из которых были изготовлены образцы для определения механических свойств основного металла и прочности соединения (таблица 6.1). Проведены также металлографические исследова-

ния и испытания на МКК. Кроме того испытывались отходы, вырезанные из лазерного отверстия днищ (таблица 6.2).

Проведенные исследования показали, что прочность соединения на отрыв и срез по площади листа значительно превышает требования ГОСТ 10885-85 и указанных выше технических условий и находится на уровне прочности основной стали 22К (см. табл. 6.1 и 6.2). Испытания на МКК выдержали все пробы, что свидетельствует о сохранении антикоррозионных свойств стали 0X18H10T при сварке взрывом и последующих технологических нагревах. Соединение слоёв носит волнистый характер. Амплитуда волн составляет 0,2–0,6 мм. Основной металл в зоне соединения обезуглерожен до чистого феррита в области, захватывающей всю волнистую зону [34].

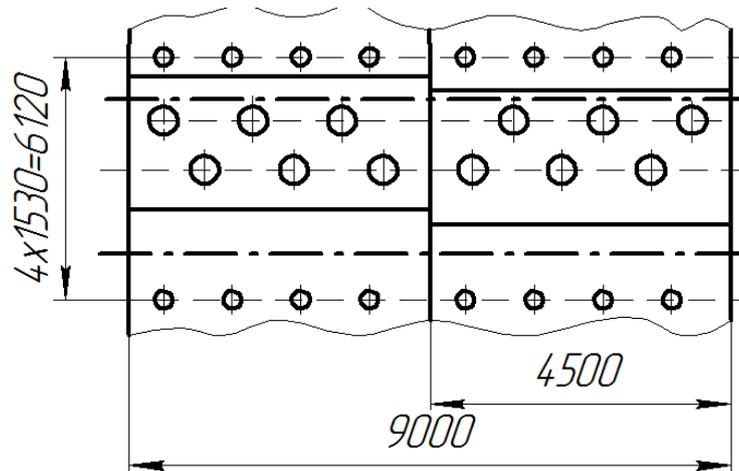


Рисунок 6.1 – Схема взятия проб из обечайки в местах вырезки отверстий [34].

В работе [36, 237] проведен сравнительный анализ свойств биметаллов 22К+08Х18Н10Т, полученных методами сварки взрывом, наплавки с последующей горячей прокаткой, пакетно-вакуумным методом совместной прокатки. На основании испытания натурной модели секции сепаратора, которая была включена в экспериментальную установку стенда для теплотехнических и циклических испытаний ОКБ «Гидропресс» рассмотрены условия эксплуатации биметалла. В общей сложности в ходе испытаний корпус подвергался 15 ревизиям, две из которых (после 40 и 100 пусков) сопровожда-

лись цветной дефектоскопией и ультразвуковым контролем 95% внутренней поверхности (после демонтажа внутренних устройств) с целью выявления возможных повреждений лакирующего слоя и его отслоения от основного металла. Особенно тщательно контролировали наиболее напряженные участки в области днищ и средней обечайки – места привара штуцеров, патрубков, лазерного отверстия и сварных соединений корпуса.

Таблица 6.1 – Результаты испытаний прочности соединения двухслойных листов [34].

Сосуд	Место отбора проб	$\sigma_{отр}$, МПа	$\tau_{срез}$, МПа	Угол загиба, град.
Первый	конечные зоны листа до термообработки	480-670	395-430	180
	конечные зоны листа после термообработки	420-660	400-420	180
	из обечайки	435-660	385-605	180
Второй	конечные зоны листа после термообработки	265-510	390-475	180
	из обечайки	465-570	390-500	180

Примечание: В таблице приводятся предельные значения полученных данных по 20 пробкам из каждой обечайки

Таблица 6.2 – Результаты испытаний основного металла двухслойных листов [34].

Сосуд	Место отбора проб	σ_{02} , МПа	σ_B , МПа	δ , %	φ , %	Ударная вязкость Дж/см ²
По ГОСТ 5520-79		255	430-590	22	-	-
Первый	обечайки	280-320	500-530	25-28	56-64	110-180
	днища	320-350	540-560	23-25	65,0	80-135
Второй	обечайки	320-375	535-570	22-28	61,5	110-143
	днища	-	-	-	-	-

Ревизии не выявили каких-либо повреждений ни в одном из узлов сосуда в жестких условиях работы металла в конструкции. Испытания под-

твердили, что по работоспособности и надежности двухслойная сталь с антикоррозионным покрытием сталью 08X18H10T, плакированной взрывом, наплавкой с последующей прокаткой и совместной прокаткой в натуральных условиях равноценны.

Металлографический анализ состояния поверхности биметалла на образцах, плакирующий слой которых выполнен плакированием взрывом и пакетно-вакуумной прокаткой, показал, что дефектов типа питтингов и трещин не обнаружено. Поверхность несет следы механической обработки. На поверхности плакирующего слоя, нанесенного методом наплавки с последующей прокаткой, обнаружены питтинги, распространяющиеся вглубь металла по границам зерен, и микротрещины, распространяющиеся в металл транскристаллитно на глубину до 170 мкм.

Проведенный анализ показывает, что биметалл 22К+08X18H10T, полученный методом сварки взрывом, обеспечивает конструктивную стойкость и защитные функции применительно к объектам оборудования АЭУ, и по показателям стойкости соответствует аналогичным характеристикам биметалла, полученного методом пакетно-вакуумной прокатки, а по показателям технологичности и стоимости значительно превосходит иные предлагаемые методы.

Сравнительный анализ требований к биметаллу марки 22К+08X18H10T, изготовленных по ТУ 0900-005-05764417-99 и ТУ 0993-001-21414987-2012, проведен по сортаменту и размерам, по техническим требованиям и правилам приёмки (таблица 6.3 - 6.5).

На основании проведенных исследований и анализа технические условия ТУ 0993-001-21414987-2012 «Лист стальной двухслойный коррозионно-стойкий, изготовленный методом сварки взрывом» (Приложение №3) были согласованы и зарегистрированы в установленном порядке, одобрены Управлением по регулированию безопасности атомных станций и исследовательских ядерных установок Ростехнадзора и внесены в НП-089-15 в приложение к Сводному перечню документов по стандартизации.

Таблица 6.3 – Сравнение по сортаменту и размерам.

№ ТУ	ТУ 0900-005-05764417-99	ТУ 0993-001-21414987-2012
Показатели	Листы двухслойные из стали марок 22К+08Х18Н10Т	Сталь листовая двухслойная коррозионно-стойкая, изготовленная сваркой взрывом
Сортамент	Основной слой – 22К Плакирующий слой – 08Х18Н10Т	Основной слой – 22К по ГОСТ 5520 или ТУ ТУ 302.02.092, 22К-Ш и 22К-ВД по ТУ302.02.092 Плакирующий слой – коррозионно-стойкие стали 08Х18Н10Т по ГОСТ 5582-75 или ГОСТ 7350-77
Размеры листов	Толщина от 8 до 125 мм Ширина от 1500 до 3500 мм Длина не более 11500 мм Максимальный вес 20 т	Толщина от 22 до 140 мм Ширина - от 1000 до 3800 мм Длина - от 2000 до 12000 мм Максимальный вес 20 т Допускается укрупнение листов плакирующего слоя электродуговой сваркой с зачисткой и контролем качества сварного шва
Ограничения по размерам	При толщине менее 61 мм ширина не более 3200 мм, При толщине не менее 80 мм длина не более 10500мм, Толщина плакирующего слоя от 2 до 10 мм	По толщине и длине основного слоя нет ограничений, Толщина плакирующего слоя от 3 до 15 мм
Предельные отклонения по толщине, ширине и длине	Разнотолщинность плакирующего слоя должна находиться в пределах не более 2 мм	по ГОСТ 19903-2015 Разнотолщинность плакирующего слоя должна находиться для листа толщиной 4 мм в пределах +0,3 мм, - 0,5 мм
Неплоскостность на 1 п/м длины	Не более 12 мм	Для листов толщиной более 50 мм не более 4 мм

Таблица 6.4 – Сравнение по техническим требованиям.

№ ТУ	ТУ 0900-005-05764417-99	ТУ 0993-001-21414987-2012
Поверхность	<p>Выборочная абразивная зачистка со стороны лакирующего слоя.</p> <p>По требованию сплошная абразивная зачистка поверхности лакировки для листов толщиной более 20 мм.</p> <p>Допускается тонкий слой остатков окалины, рябизна, риски, отпечатки от валков в виде сплошных полос и участков в пределах отклонений по толщине.</p>	<p>Со стороны лакирующего слоя не должна иметь пузырей, раковин, плен, трещин, свищей.</p> <p>По согласованию с потребителем допускаются мелкие риски, царапины, вмятины не более величины минусового допуска на толщину лакирующего слоя по ГОСТ 19903.</p> <p>Со стороны основного листа должна соответствовать требованиям ГОСТ 1577, ГОСТ 5520, ГОСТ 5521, ГОСТ 14637, ГОСТ 10885.</p>
Сплошность сцепления слоев	<p>Условная площадь минимального учитываемого дефекта 10 см² ;</p> <p>Условная площадь максимального допускаемого дефекта 25 см²</p> <p>Число дефектов на 1 м² – не более 2 шт</p>	<p>0 класс сплошности по ГОСТ 22727-83 (условная площадь минимального учитываемого дефекта 5 см²) Условная площадь максимального допускаемого дефекта 20 см²</p> <p>Число дефектов на 1 м² – не более 1 шт.</p>
Определение сплошности сцепления слоев	Ультразвуковой контроль (УЗК) по ГОСТ 22727-83 эхо-методом	
Сопротивление срезу лакирующего слоя	не менее 190 Н/мм ²	не менее 196 МПа (20 кгс/мм ²)
Сопротивление отрыву лакирующего слоя	нет	не менее 196 МПа (20 кгс/мм ²)

Испытания на изгиб	В холодном состоянии угол 90 градусов – без расслоений. Угол 180 градусов – допускается наличие сединок (мелких надрывов) 2 образца – 1 плакировкой наружу, 1 - внутрь	Угол 160 градусов плакирующим слоем внутрь (плакирующим слоем наружу по согласованию с потребителем) – не допускается расслоений.
Боковой изгиб	нет	Угол 80 градусов
Макроструктура	Визуальный контроль. Допускаются участки повышенной травимости протяженностью не более 20 мм без нарушения сплошности (1 образец).	1 образец. Визуальный контроль
Контроль толщины плакирующего слоя	По ГОСТ 10885 Металлографическим методом	По ГОСТ 10885-85 , Металлографическим методом
Механические свойства основного слоя	По результатам испытаний	

Таблица 6.5 – Сравнение по правилам приёмки.

№ ТУ	ТУ 0900-005-05764417-99	ТУ 0993-001-21414987-2012
Правила приемки	1 группа: партия (листы одной плавки и ТО) 2 группа: каждый лист	
Контроль обязательной сплошности и прочности соединения	УЗК – каждый лист. Испытания на срез (1 образец), Испытания на изгиб (2 образца) по требованию.	УЗК – каждый лист. Испытания на прочность сцепления слоев: - на изгиб угол 160 град. плакирующим слоем внутрь (1 образец) или наружу (по требованию), - боковой изгиб угол 80 град. (1 образец), 160 град. по требованию, - испытания на сопротивление срезу (2 образца), - испытания на сопротивление отрыву (2 образца)

<p>Контроль обязательный (объём испытаний)</p>	<p>Контроль химического состава после изготовления биметалла. МКК плакирующего слоя. Испытания основного слоя (2 образца): - временное сопротивление разрыву, - условный предел текучести. Ударная вязкость (3 образца) при 20°С. Макроструктура (1 проба)</p>	<p>По документу о качестве на исходный лист: химический состав, УЗК, макроструктура листов. МКК плакирующего слоя (3 образца). Испытания основного слоя: - на растяжение при комнатной температуре (1 образец), - на ударный изгиб КСV при комнатной температуре (3 образца). По требованию заказчика: на растяжение при рабочей температуре, на ударный изгиб после механического старения, на изгиб на угол 180 град в холодном состоянии, подтверждение критической температуры хрупкости.</p>
<p>Контроль по согласованию (требованию)</p>	<p>Ударная вязкость после механического старения (3 образца). Определение механических свойств при повышенной температуре. Подтверждение критической температуры хрупкости (3 образца) – 1 проба.</p>	<p>Контроль химического состава слоев. Контроль макроструктуры зоны соединения (1 образец). Ударная вязкость после механического старения (3 образца). Определение механических свойств при повышенной температуре. Подтверждение критической температуры хрупкости (3 образца).</p>
<p>Ремонт</p>	<p>В основном металле – заварка, площадь</p>	<p>Допускается исправление дефектов на поверхности</p>

	дефектных мест не более 2% площади, допустимая глубина удаления дефектов – до 20% номинальной толщины основного слоя сверх минусового отклонения. Плакирующий слой – не более 5% площади.	плакирующего слоя заваркой. Не более 5% площади готового листа.
Сертификат	По химическому составу основного слоя. По химическому составу плакирующего слоя. По результатам испытания МКК плакирующего слоя. По результатам испытания на срез плакирующего слоя. По результатам механических испытаний основного слоя. По результатам испытания на изгиб. По результатам контроля макроструктуры. По результатам УЗК. По толщине плакирующего слоя.	По ГОСТ 7566-94 с дополнениями по: - марке стали основного слоя, - марке материала плакирующего слоя, - номеру плавки и химическому составу стали основного слоя, - номеру плавки и химическому составу материала плакирующего слоя, - толщине плакирующего слоя, - сопротивлению срезу и отрыву, - результатам испытаний на изгиб. По результатам УЗК.
Макроструктура	1 образец. Визуальный контроль. Допускаются участки повышенной травимости протяженностью не более 20 мм без нарушения сплошности.	Контроль на протравленном образце по ГОСТ 10243-75, визуальный контроль.
Контроль толщины плакирующего слоя	По ГОСТ 10885-85 Металлографическим методом	
Механические св-ва	По результатам испытаний основного слоя	

Результаты проведенного комплекса исследований свойств, в том числе в натуральных эксплуатационных условиях биметалла 22К+08Х18Н10Т, полученного методом сварки взрывом, анализ базовых технических условий № 0900-005-05764417-99 на биметалл Ижорского завода, технической готовности и опыта производства биметалла в ООО «Битруб Интернэшнл» показывают, что биметалл, изготовленный по ТУ 0993-001-21414987-2012 «Лист стальной двухслойный коррозионно-стойкий, изготовленный методом сварки взрывом», отвечает требованиям, предъявляемым к материалам для изготовления оборудования АЭС. ГНЦ НПО ЦНИИТМАШ рекомендовал применение биметалла 22К+08Х18Н10Т, полученного методом сваркой взрывом, для объектов Росатома. Технические условия ТУ 0993-001-21414987-2012 были согласованы, зарегистрированы в установленном порядке и одобрены Управлением по регулированию безопасности атомных станций и исследовательских ядерных установок Ростехнадзора. Указанные ТУ включены в сводный «Перечень основных материалов и крепёжных изделий, применяемых для изготовления оборудования и трубопроводов АЭУ в соответствии с требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» (НП-089-15, Приложение № 1 к Сводному перечню документов по стандартизации).

6.2. Биметалл конструкционная сталь-коррозионностойкая сталь для нефтехимического машиностроения

Крупногабаритный биметалл для нефтехимического машиностроения производится в соответствии с требованиями ГОСТ 10885-85 и ТУ 27.32.09.010-2005.

В зависимости от назначения биметалла Заказчиком определяются требования к исходным материалам по сплошности основного листа, прочности, режимам термообработки основного листа. Эти требования, как правило, выполняет предприятие-поставщик основного листа. Требования к исходному

листу для плакирующего слоя определяются соответствующим стандартом, в зависимости от размеров листов может изготавливаться сварная карта.

В процессе сварки взрывом в зоне соединения вследствие интенсивной пластической деформации происходит наклёп и фиксируется высокий уровень остаточных напряжений [12, 36, 62], а листы имеют значительное отклонение от плоскостности [232]. Поэтому двухслойные листы после сварки взрывом необходимо подвергать термообработке для снятия остаточных напряжений и последующей холодной правке на вальцах или прессе для обеспечения заданной плоскостности на 1 м длины двухслойных листов. Опытным путём установлено, что оптимальной температурой термической обработки для биметалла сталь - коррозионно-стойкая сталь является нагрев до температуры 620-650°C или 720-750°C, с длительностью выдержки в зависимости от толщины. Высокотемпературная обработка с нагревом выше 900°C интенсифицирует процессы диффузии в соединении слоёв, что положительно сказывается на выравнивании свойств соединения. Однако ряд технических требований при изготовлении оборудования не рекомендует высокотемпературную обработку из-за изменения свойств основного металла [63].

Качество двухслойных листов оценивается по результатам 100% ультразвукового контроля (УЗК) сплошности соединения и испытания прочности соединения на отрыв, срез и изгиб. Образцы для проведения испытаний отбираются из конечных участков от одного листа от партии или от каждого листа (по требованию Заказчика) [63].

На основании проведенных исследований и технологических основ была разработана технология современного круглогодичного промышленного производства двухслойных листов конструкционная сталь-коррозионностойкая сталь, которая включает 3 основных технологических этапа:

Этап 1. Подготовка исходных материалов и изготовление пакетов в цехе (рисунок 6.2).

Этап 2. Сварка взрывом на взрывной площадке (рисунок 6.4).

Этап 3. Отделка готового биметалла: термическая обработка и правка, контроль и испытания готового биметалла (рисунок 6.6).

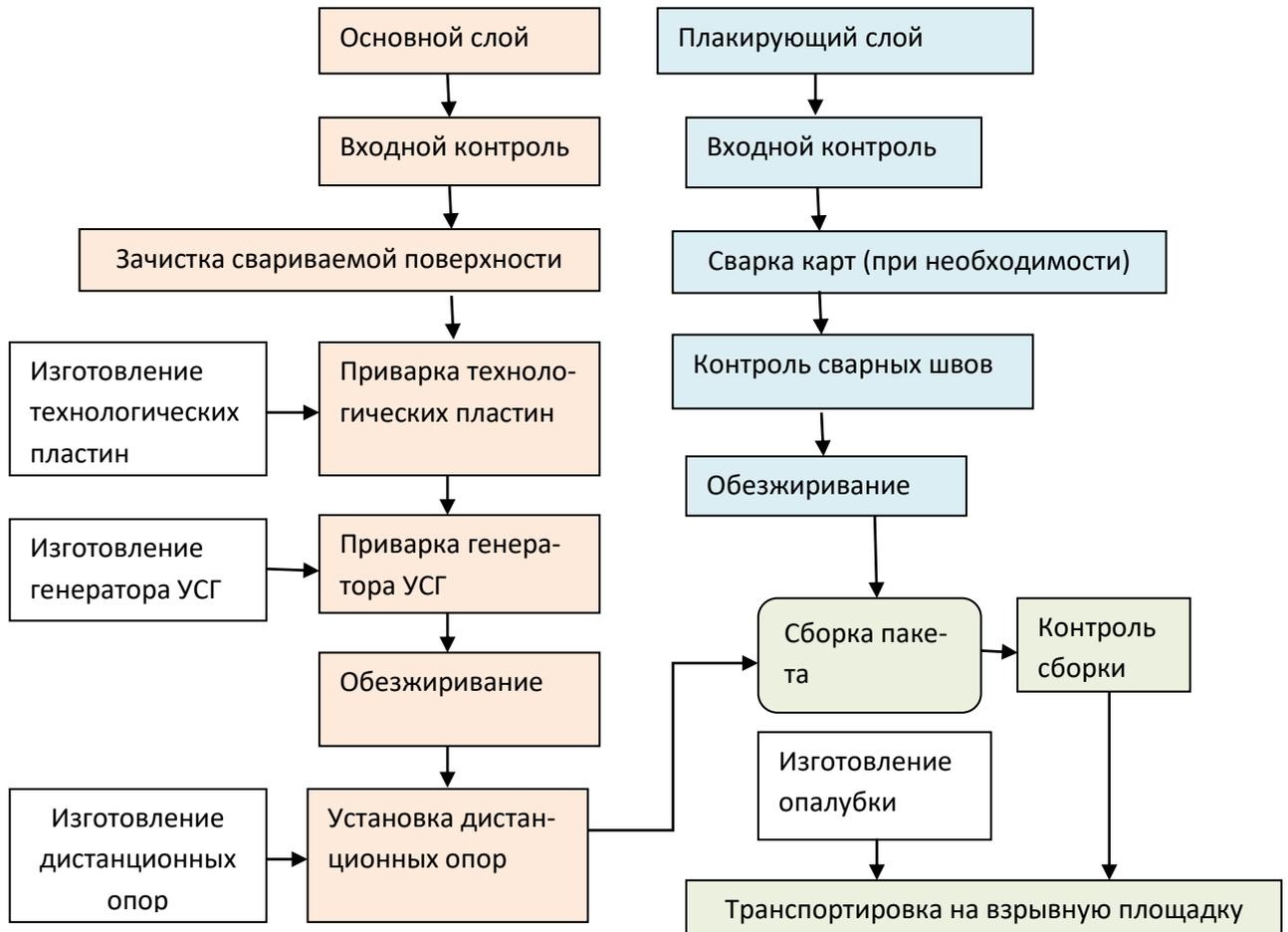


Рисунок.6.2 – Технологическая схема подготовки исходных материалов и изготовления пакетов с генератором УСГ в цехе.

Контроль качества проводится на всех этапах технологического процесса с занесением результатов в Паспорт листа.

Входной контроль основного и плакирующего листа включает проверку на соответствие их сертификатам качества заводов изготовителей и требованиям спецификации, визуально-измерительный контроль и, при необходимости, ультразвуковой контроль сплошности. Поверхность листов на пред-

приятии-поставщике подвергается дробеструйной обработке или зачистке. В цехе дополнительно производится зачистка свариваемых поверхностей до металлического блеска с обеспечением шероховатости $HRz \sim 40$ мкм. Затем монтируется генератор УСГ и технологические пластины (рисунок 6.3 а). Далее производится обезжиривание свариваемых поверхностей и установка дистанционных опор.



а



б



в



г

Рисунок 6.3 – Подготовка основного листа к сборке пакета (а) и удаление усиления сварных швов в плакирующем слое (б), сборка пакета в цехе (в, г)

Подготовка плакирующего слоя заключается в зачистке поверхности и её обезжиривании. В случае необходимости производится укрупнение листа (сварка карт), удаление усиления сварных швов (рисунок 6.3 б) и их контроль методом капиллярной цветной дефектоскопии. Затем производится сборка пакета (рисунок 6.3 в,г) с обязательной герметизацией сварочного зазора для

исключения попадания пыли и влаги. Готовые пакеты транспортируются на взрывную площадку автотранспортом [63].

На взрывной площадке предварительно готовится опора из песка, на которую автокраном устанавливается пакет (рисунок 6.5 а). Затем производится контроль сварочного зазора и монтаж опалубки, заряда ВВ (рисунок 6.5 б). Заряд покрывается слоем песка, устанавливается боевик из смеси аммонита с аммиачной селитрой и электродетонатор, и производится подрыв заряда (рисунок 6.5 в). В случае использования зарядов массой более допустимых для взрывной площадки на поверхности заряда монтируется защитный слой из пены для гашения ВУВ, в зимних условиях - слой снега. Полученный биметаллический лист контролируется визуально на наличие дефектов и производится УЗК сплошности соединения (рисунок 6.5 г), после чего транспортируется в цех.

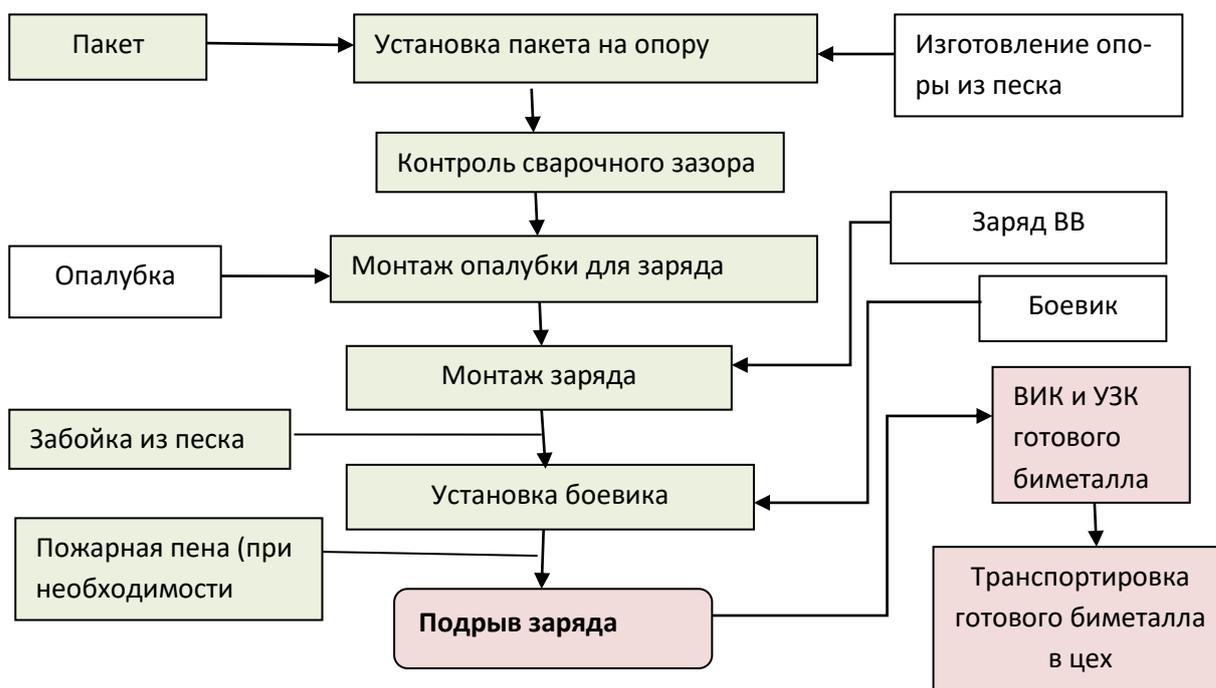


Рисунок 6.4 – Технологическая схема **сварки взрывом** на взрывной площадке



а



б



в



г

Рисунок 6.5 – Операции изготовления биметалла на взрывной площадке: установка пакета на опору (а), раскладка заряда взрывчатого вещества (б), начальный момент подрыва заряда (в), лист 30x200x12900 мм после сварки взрывом (г).

В цехе осуществляется дополнительный визуально-измерительный контроль готового биметалла и, при необходимости, капиллярная дефектоскопия сварных швов плакирующего слоя. Затем листы транспортируются на термообработку и правку биметалла. Термообработка проводится по задан-

ному режиму нагрева и охлаждения в камерных печах с выкатным подом и записью процесса нагрева и охлаждения (рисунок 6.7 а). Холодная правка производится на правильной машине при толщине листа до 40 мм или на гибочных вальцах (рисунок 6.7 б).

Измерение отклонений от плоскостности проводится в два этапа:

- измерение отклонений от плоскостности поворотной плиты по всей площади биметаллической плиты при помощи лазерного уровня Типа BOSCH Quigo и металлического угольника или металлической линейки;
- измерение отклонений от плоскостности на площади 1000x 1000 мм поворотной линейкой ШД – 1000 ГОСТ 8026-92, щупом или штангенциркулем.

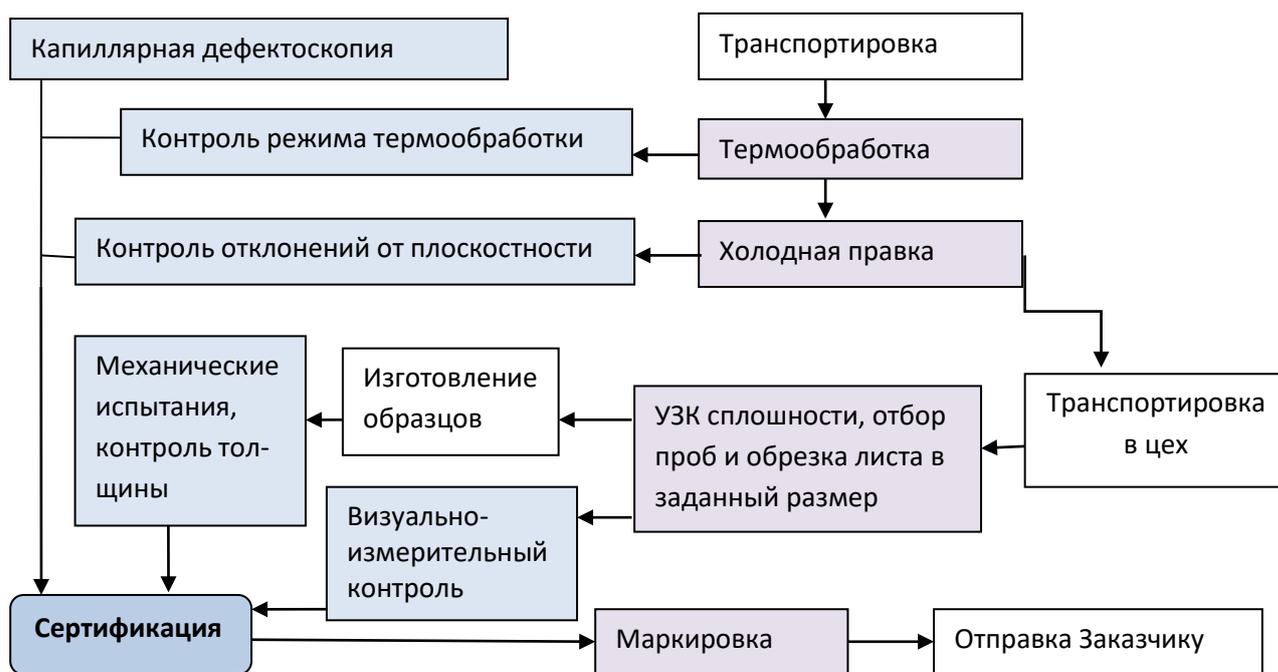


Рисунок 6.6 – Технологическая схема отделки готового биметалла.

После правки листы поступают в цех, где производится контроль качества ВИК, при необходимости капиллярная дефектоскопия сварных швов лакирующего слоя (рисунок 6.7 в), УЗК сплошности соединения (рисунок 6.7 г), из конечных участков сварки отбираются пробы для проведения испытаний (рисунок 6.8) на определение предела прочности соединения слоёв на отрыв и срез лакирующего слоя (рисунок 6.9 а, б), а также изгиб двухслой-

ного образца (рисунок 6.9 в). Испытания на боковой изгиб (рисунок 6.9 г) и механические испытания основного слоя (по ГОСТ 1497-84) проводятся по требованию Заказчика.



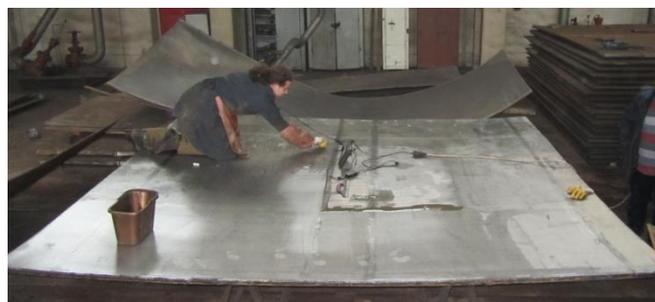
а



б



в



г

Рисунок 6.7 – Операции изготовления биметалла после сварки взрывом: загрузка листа в печь для термообработки (а), правка на вальцах (б), капиллярная цветная дефектоскопия сварных швов плакирующего слоя (в), ультразвуковой контроль качества биметалла (г).

В таблице 6.6 приведены результаты испытаний в аттестованных лабораториях, которые выявили высокое качество биметалла по прочности соединения слоев и отсутствию изменений механических свойств основного металла в результате процесса сварки взрывом и процесса термической обработки и холодной правки. По результатам испытаний составляется сертификат качества, двухслойные листы при необходимости обрезаются в размер, маркируются и отгружаются Заказчику (рисунок 6.10).

В результате внедрения разработанной технологии в ООО «Битруб интернэшнл» за период с 2013 по 2018 год поставлено для предприятий нефтехимического машиностроения около 700 листов (свыше 7000 кв.м.) следующих марок: 09Г2С+08Х18Н10Т (АISI 321); 316L; 316Ti; 410S; 12Х18Н10Т; 12ХМ +08Х18Н10Т (АISI 321); 410S; 12Х18Н10Т. Площадь плакированных листов составляла от 5 м² до 26 м², толщина биметалла - от 12 до 61 мм, толщина плакирующего слоя - от 3 до 6 мм.

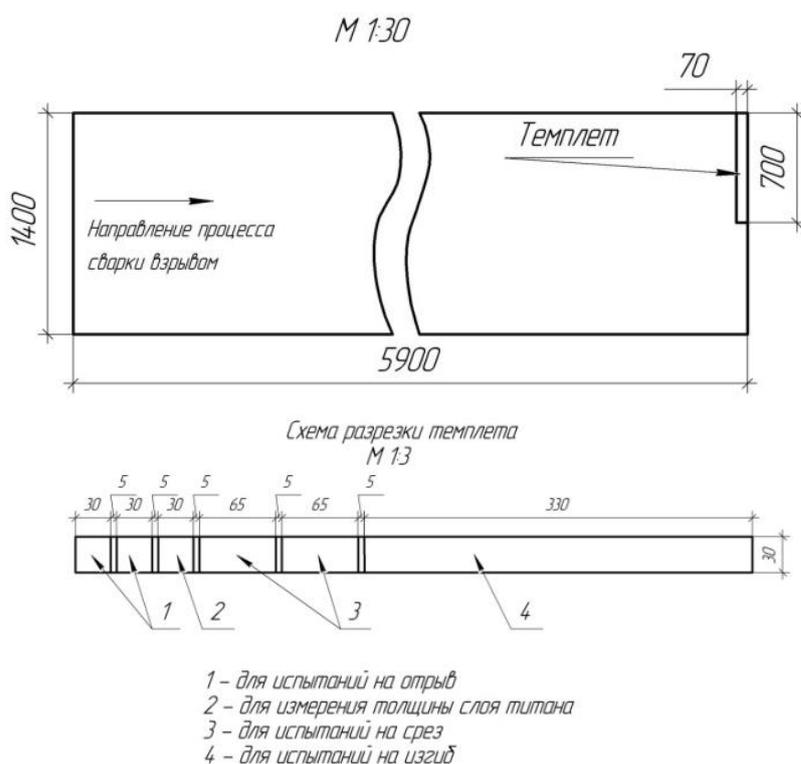


Рисунок 6.8 – Схема отбора проб для испытаний из листа двухслойного марки сталь+нержавеющая сталь.

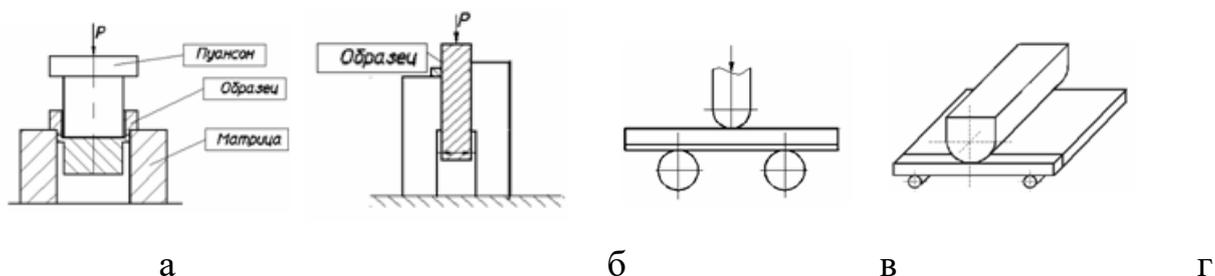


Рисунок 6.9 – Схемы испытаний прочности соединения слоев биметалла по ТУ 27.81.09 009-2005: на отрыв (а) и срез (б) плакирующего слоя, изгиб (в) и боковой изгиб (г).

Таблица 6.6 – Результаты сертификационных испытаний листов двухслойных сталей для нефтехимического машиностроения [37, 63, 243].

№ п/п	Марка биметалла	Свойства биметалла				Свойства металла основного слоя			
		$\sigma_{отр.}$ МПа	$\sigma_{ср}$ МПа	Изгиб 180°	Боковой изгиб 80°	$\sigma_{в}$ МПа	σ_{02} МПа	δ %	Ударная вязкость Дж/см ²
1	09Г2С+12Х18Н10Т	557-565	286-395	160 уд	80, уд	493	282	29	-
2	12ХМ+12Х18Н10Т	553-565	286-395	160 уд	80, уд	493	282	29	-
3	12ХМ+08Х18Н10Т 09Г2С+08Х18Н10Т	-	390-440	160 уд	-	490- 520	-	-	-
4	09Г2С+AISI 410S (08Х13)	297- 347	150-345	уд	уд	462	352	25	
5	09Г2С+ AISI 321 (08Х18Н10Т)	557-565	286-395	уд	уд	493	282	29	при 20°С 290-325 при -70°С 71-219
6	12ХМ+AISI 321 (12Х18Н10Т)	449-581	321-480	уд	уд	508	275	27	-
7	09Г2С+AISI 316Ti (10Х17Н13М2Т)	430-470	350-370	уд	уд	480- 530	310-360	27-32	при 40°С 210-250
8	09Г2С+AISI 316L (03Х17Н13М2)	480-510	330-350	уд	уд	500- 520	320-420	31-32	при 40°С 200-250
9	12ХМ+AISI 316Ti (10Х17Н13М2Т)	460-520	390-520	уд	уд	490- 520	-		при 20°С 90-210

Примечание: Место проведения испытаний (кол-во. испытан-ных листов, шт): 1,2 - Испытательный центр "ЦНИИТМАШ-аналитика-прочность" при ОАО НПО ЦНИИТМАШ (4 шт.), 3 - АО "Пензахиммаш" ОГМетролога (37 шт.), 4 – 9 Лаборатория ИСМАН, Испытательный центр "ЦНИИТМАШ-аналитика-прочность" при ОАО НПО ЦНИИТМАШ.

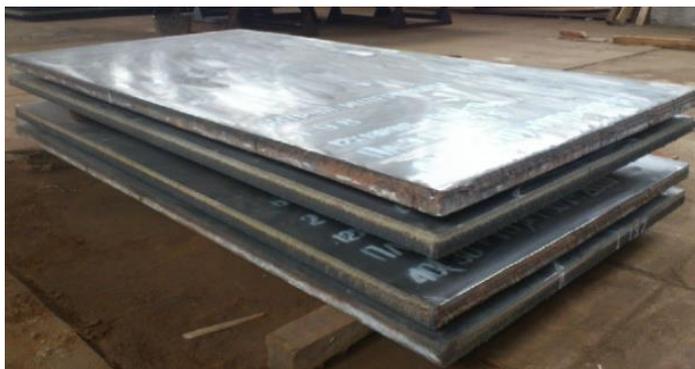


Рисунок 6.10 – Листы биметалла, готовые к отгрузке.

Из поставленных листов изготовлено различное нефтехимическое оборудование на предприятиях ООО «Зенит-Химмаш», АО «Пензахиммаш», ООО «ПТИМАШ», ОАО «Первомайскхиммаш», АО «ВОСТСИБМАШ», АО «Волгограднефтемаш», АО «ОЗНА-Измерительные системы», АО «Рязанская нефтеперерабатывающая компания» (АО «РНПК»), ЗАО НПО «НАТЭК-Нефтехиммаш» (Приложение №4). При производстве оборудования двухслойные листы подвергались горячей и холодной штамповке при изготовлении днищ, вальцовке обечаек, электродуговой сварке сосудов с проведением контроля в соответствии с нормативно-технической и конструкторской документацией. Качество листов соответствовало требованиям ГОСТ 10885-85, нормативно-технической документации, и получило высокую оценку предприятий-потребителей (Приложение №5).

6.3 Биметалл конструкционная сталь - коррозионностойкая сталь для емкостей САОЗ АЭС

Коррозионностойкий биметалл 22К+08Х18Н10Т для изготовления гидроремкостей систем аварийной защиты САОЗ (Система Аварийного Охлаждения Активной Зоны) производится по 2-му классу безопасности, и к нему предъявляются повышенные требования, которые изложены в нормах ПНАЭ Г-7-008-89 [234] и требованиях НП-071-06 [242]. Основные требования следующие: изготовители основного и плакирующего листа должны быть сертифицированы на поставку металла для АЭС. Металл должен быть обязательно отечественного производства. Двухслойные листы для обечаек и днищ - крупногабаритные, шириной до 4050 мм и длиной до 10 м. При этом

из плакирующего листа сваривается карта сертифицированными электродами и аттестованным в соответствии с ПНЭГ сварщиком. Двухслойные листы производятся по плану качества при контроле специализированных организаций ФГУП ВО «Безопасность» или АО ВПО ЗАЭС. В соответствии с планом качества осуществляется контроль на всех стадиях производства. Проводятся испытания основного и плакирующего слоя после изготовления биметалла, а также прочности в соответствии с требованиями ТУ 0993-001-21414987-2012. В связи с большими габаритами листов (площадь 25 кв.м.) масса заряда превышала допустимый для взрывной площадки, который составляет 300 кг тротила. С учётом результатов исследования распространения ВУВ от подрыва смесей микропористой аммиачной селитры с дизельным топливом (см. п.5.2) допустимый заряд - 750 кг, а требуется 1300 кг. Поэтому были приняты специальные меры по гашению ВУВ газовоздушной пожарной пеной (рисунок 6.11), что позволило снизить воздействие воздушной ударной волны.



Рисунок 6.11 – Заливка газовоздушной пожарной пены для гашения ударной волны.

Для изготовления днищ емкостей САОЗ Ленинградской АЭС были изготовлены 8 двухслойных листов 22К+08Х18Н10Т размером 110(105+5)х4050х4700 мм (Приложение №4). На рисунке 6.12 представлен производственный процесс их изготовления. Разгрузка и укладка пакета на опору производится автокраном (рисунок 6.12, а). Затем осуществляется укладка заряда ВВ на поверхность плакирующего листа (рисунок 6.12, б). Полученный биметалл доставляется в цех, где проводится ультразвуковой кон-

троль сплошности соединения слоёв и контроль сварных швов плакирующего слоя капиллярной дефектоскопией (рисунок 6.12, в). После контроля двухслойные листы (рисунок 6.12, г) отгружаются на термообработку и контроль качества. Отбор проб для испытаний в соответствии с ТУ производился по схеме (рисунок 6.14).



а



б



в



г

Рисунок 6.12 – Производство двухслойных листов марки 22К+08Х18Н10Т, размером 110(105+5)х4050х4700: Установка пакета на песчаную опору (а) и раскладка заряда ВВ (б). Двухслойный лист после капиллярного контроля сварных швов плакирующего слоя (в) и листы, подготовленные к отгрузке на термообработку (г).

Результаты испытаний в ОАО «Петрозаводскмаш» двухслойных листов для днищ ёмкостей САОЗ биметалла 22К+08Х18Н10Т представлены в таблице 6.7. Механические свойства соединения биметалла, полученного

сваркой взрывом, в 2 раза превышают минимальный порог требуемых показателей прочности сцепления слоёв по ТУ 0900-005-05764417-99 и ТУ 0993-001-21414987-2012. Стойкость к МКК подтверждается. Сплошность соединения слоёв - 100% по нулевому классу. Биметалл успешно прошел операцию штамповки днищ (рисунок 6.13) и был использован в изделии.



Рисунок 6.13 – Днище ёмкости САОЗ из биметалла 22К+08Х18Н10Т после горячей штамповки.

По заказу ООО «КомплектЭнерго» были изготовлены биметаллические листы марки 22К+08Х18Н10Т размерами 80(75+5)х2550(1500)х4300 мм для изготовления днищ и листы размерами 60(55+5) х2500х9900 мм для обечаек ёмкостей САОЗ Новооронежской АЭС (рисунки 6.15, 6.16 и Приложение №4).



а



б

Рисунок 6.15 – Заготовка днища $\varnothing 3200$, изготовленная из двуслойных листов 22К+08Х18Н10Т (а), днища после штамповки (б).

21414987-2012. При этом прочность соединения слоев соответствует прочности основного металла. Из двухслойных листов были сварены заготовки для днищ ёмкостей САОЗ (рисунок 6.15 а). При горячей штамповки днищ не было выявлено отслоений лакирующего слоя (рисунок 6.15 б). Изготовление обечаек и сварка корпуса САОЗа также не выявила дефектов в двухслойном листе (рисунки 6.16 и 6.17). Биметалл получил высокую оценку заказчика ООО «Комплект Энерго» (Приложение №5).



Рисунок 6.16 – Лист двухслойный размерами 60(55+5)x2500x9900 мм после термообработки и правки в АО «Дзержинскхиммаш» (а), готовый к отгрузке лист (б).



Рисунок 6.17 – Процесс изготовления корпуса САОЗ из биметалла.

Таблица 6.7 – Результаты испытаний в ОАО «Петрозаводскмаш» двухслойных листов для днищ ёмкостей САОЗ Марка биметалла 22К+08Х18Н10Т, 110(105+5)х4050х4700 мм.

№ п/п	Свойства соединения				Свойства основного металла				Толщина пла- кирующего слоя, мм	Испытания на стойкость к МКК (метод АМУ)
	$\sigma_{отр}$, МПа	$\sigma_{ср}$, МПа	Изгиб d=40 мм, град.	Изгиб d=2a, град.	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ψ , %		
1	573-580	423- 366	80 уд.	160 уд.	482	315	26,0	65,0	5,1	Стойки к МКК
2	578- 475	359-319	80 уд.	160 уд.	501	320	27,5	61,5	5,3	Стойки к МКК
3	535- 573	375-382	80 уд.	160 уд.	471	221	29,5	62,5	5,4	Стойки к МКК
4	571- 466	342-369	80 уд.	160 уд.	487	294	26,0	60,5	5,3	Стойки к МКК
5	485-518	292-260	80 уд.	160 уд.	505	307	26,5	58,5	5,2	Стойки к МКК
6	573-564	387- 358	80 уд.	160 уд.	465	283	27,5	65,5	5,1	Стойки к МКК
7	530- 540	362-344	80 уд.	160 уд.	454	272	31,0	68,0	4,9	Стойки к МКК
8	521- 549	387-361	80 уд.	160 уд.	459	287	30,0	65,5	5,2	Стойки к МКК

Таблица.6.8 – Результаты сертификационных испытаний листов двухслойных сталей 22К+08Х18Н10Т для ёмкостей САОЗ Нововоронежской АЭС [37, 243].

№	Марка, размеры биметалла, мм	Свойства соединения				Свойства основного металла			
		$\sigma_{отр}$, МПа	$\sigma_{ср}$, МПа	Боковой изгиб, град.	Изгиб, град.	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
1	22К+08Х18Н10Т 60(55+5)х2500х9900	464-686	403-450	80	160	440-515	330-385	26-34	73-80
2	22К+08Х18Н10Т 80(75+5)х2550х4300 80(75+5)х1500х4300	452-608	488-606	80,	160	432-479	320-330	26-33	72-78

Примечание: Место проведения испытаний (кол-во. испытан-ных листов, шт):

1 - Лаборатория АО "Дзержинскхиммаш" (8 шт),

2 - Лаборатория ООО "Зенитхиммаш" (16 шт).

Промышленная технология сварки взрывом обеспечивает получение высококачественного двухслойного коррозионностойкого листа с основой из различных конструкционных сталей и плакирующего слоя из коррозионностойких со 100% сплошностью соединения по результатам ультразвукового контроля и прочностью соединения на отрыв и срез, превышающей требования ГОСТ 10885-85 и технических условий по всей поверхности крупногабаритного листа. Физико-механические свойства основного металла и плакирующего слоя в процессе сварки взрывом и последующих термических обработок и технологических переделок (штамповка, гибка и т.п.) не претерпевают существенных изменений. Универсальность технологии, отсутствие специального оборудования, обеспечивающего процесс образования соединения, делает возможным одновременно производить разные марки биметаллов широкой номенклатуры: от одного листа до крупнотоннажных партий в несколько сотен тонн [34, 37].

6.4. Крупногабаритный биметалл для трубных решеток конденсаторов АЭС и судостроения

6.4.1. Исследование возможности применения биметалла марки 09Г2С + 10Х17Н13М2Т для изготовления трубных досок теплообменного оборудования

В конденсаторе лицевые трубные решетки служат для крепления труб путем развальцовки и их приварке к наружной поверхности трубной решетки. Использование монолитной трубной решетки из коррозионностойкой стали создает дополнительные трудности при приварке кожуха, при этом коррозионностойкий слой нужен только для соединения трубной решетки с трубками и защиты поверхности от воздействия агрессивной среды. Поэтому перспективно использовать биметаллические трубные решетки. С этой целью в [169] были проведены исследования возможности такой замены.

Для предотвращения коррозионных повреждений трубных пучков и коллекторов парогенераторов ПГВ-1000 в настоящее время начаты работы по

исключению медесодержащего оборудования из 2-го контура. Конденсаторы турбин с теплообменными трубами из сплава МНЖ 5-1 предстоит заменить конденсаторами с трубными системами из Cr-Ni-Mo аустенитной стали 316L (аналог стали 10X17H13M2T). Использование стали 316L целесообразно также для плакирующего слоя концевых трубных досок конденсаторов. Применение для трубных досок биметалла с основным слоем из углеродистой или низколегированной стали и плакирующим слоем из стали 316L позволит существенно упростить конструкцию узла присоединения досок к корпусу конденсатора и повысить качество сварочных работ [169]. Рекомендации по изготовлению биметаллических концевых трубных досок основаны на результатах исследований и разработанных технологий промышленного производства биметалла сваркой взрывом, изложенных в настоящей работе.

Нержавеющие стали для плакирующего слоя биметалла, в частности сталь 316L, перспективны для трубных систем конденсаторов турбин, использующих для охлаждения техническую воду природных источников. Это обусловлено их высокой стойкостью против общей и питтинговой коррозии, а также против коррозионного растрескивания в воде с различным содержанием. В связи с требованием обеспечения вакуумной плотности конденсаторов, охлаждающие трубы из нержавеющей сталей должны быть приварены к концевым трубным доскам из стали такого же уровня легирования.

Совместно с ОКБ «Гидропресс» (г. Подольск) в работе [169] исследованы свойства опытной партии биметаллического листа. Для выполнения опытных работ по технологии сварки труб из стали 316L с концевыми трубными досками был выбран биметалл 09Г2С + 10X17H13M2T с толщиной основного слоя 10 мм и плакирующего слоя – 4 мм. После сварки взрывом плакированный лист был термообработан по режиму нормализации 940 °С с последующим отпуском при 650 °С. Механические свойства соединения плакирующего и основного слоев (при испытаниях на отрыв и срез), а также свойства металла основного слоя при испытаниях на растяжение и

ударный изгиб соответствовали требованиям ТУ 27.32.09.010-2005 (таблица 6.9).

Таблица 6.9 – Механические свойства биметаллического листа [169].

Материал	Предел текучести, $R_{p0,2}$, МПа	Предел прочности, R_m , МПа	Относительное удлинение, A_5 , %	Поперечное сужение, Z , %	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см ²	Сопротивление срезу, $\sigma_{ср}$, МПа	Сопротивление отрыву, $\sigma_{отр}$, МПа
Биметалл, (соединение слоев)	—	—	—	—	—	160-164	223-230
09Г2С (основной слой)	277-279	439-450	27-33	40-46	290-305	—	—

Из плакированного листа был вырезан фрагмент размерами 400 x 400 мм, использованный для изготовления макета трубной доски конденсатора. В макете, представленном на рисунке 6.18, просверлены отверстия диаметром 28 мм. Цилиндрическая поверхность отверстий контролировалась методом КК и ВИК на наличие отслоений. Отслоения не обнаружены. Макет трубной доски был использован для отработки технологии закрепления охлаждающих труб из стали 316L в трубной доске методами вальцовки и электродуговой сварки.

Приварка труб к трубной решетке производилась с использованием специализированного автомата АГАТ-10 конструкции ЦНИИТМАШ. Способ сварки – автоматическая аргодуговая сварка неплавящимся W-электродом. Развальцовка труб диаметром 28x0,7 мм из стали 316 в трубных решетках с получением газовой плотности была проведена при конструктивном исполнении отверстий с уплотнительными канавками. Испытания моделей на герметичность вальцовочных соединений проводились подачей осушенного воздуха в межтрубное пространство модели и визуальным ос-

мотром «на пузырьки» поверхности трубных решеток, залитых пятимиллиметровым слоем воды. Испытательное давление – 0,5 Мпа, выдержка в течение 30 мин. При проведении испытаний течи не наблюдались [169].

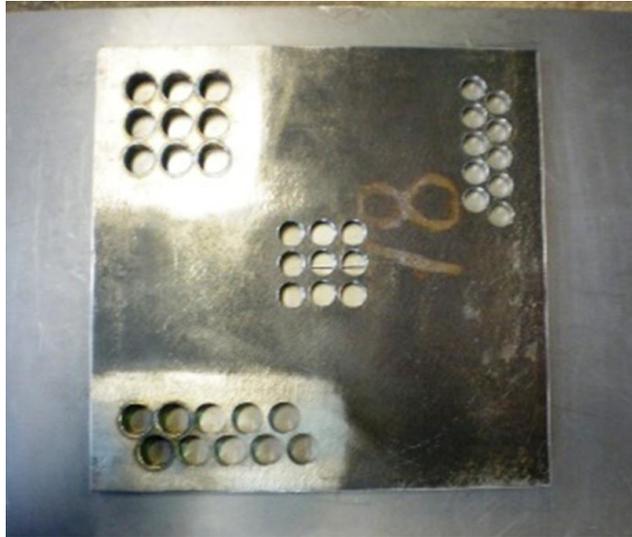


Рисунок 6.18 – Фрагмент трубной доски из биметалла
09Г2С + 10Х17Н13М2Т [169].

Таким образом, применение для конденсаторов концевых трубных досок из биметалла с основным слоем из углеродистой или низколегированной стали и аустенитной стали 316L (аналога стали 10Х17Н13М2Т) для плакирующего слоя позволит существенно упростить технологию сварки в узле присоединения досок к корпусу. Закрепление теплообменных труб из стали 316L в биметаллических трубных досках с плакирующим слоем из стали 10Х17Н13М2Т с помощью сварки и вальцовки обеспечивает газовую плотность конденсатора [169].

6.4.2. Крупногабаритный биметалл сталь+титан, применяемый для трубных досок конденсаторов АЭС и атомного ледокола

Обязательными требованиями, предъявляемыми к биметаллу сталь+титан для трубных досок конденсаторов АЭС и атомного ледокола, являются обеспечение 0 класса сплошности соединения слоев по ГОСТ 22727-83 в зоне сверления отверстий (не более 1 см² на 1 кв.м.), повышенные требования к плоскостности (2 мм на 1 п/м) и прочности соединения не ме-

нее 200 МПа. Указанные требования отражены в ТУ 27.81.09.009-2005 и ТУ 5.961-11917-2015 (держатель подлинника НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»).

На основании проведенных исследований п. 3, 4.2, 5.4 и требований указанных ТУ разработана современная технология промышленного производства биметаллических листов и плит в среде защитного газа аргона.

Основные положения технологии.

1. Определяется расчетная величина зоны УСГ, исходя из заданных размеров биметаллического листа, газа в сварочном зазоре, температуры окружающей среды на взрывной площадке. По результатам расчётов выбирается схема сварки взрывом и назначаются режимы с учётом свойств свариваемых материалов титана и стали.

2. Разрабатывается конструкция и технология сборки пакетов с учётом размеров исходных материалов, температуры окружающей среды.

3. Технология подготовки поверхностей исходных материалов.

3.1 Поверхность листа основного слоя подвергается абразивной зачистке и полировке для снижения шероховатости поверхности.

3.2 Подготовка плакирующего слоя из титана (наиболее трудоёмкая операция) заключается в сварке карты из листов титана с обеспечением качества сварного шва в соответствии с требованиями ТУ и отсутствия деформации листов в зоне сварных швов. Сварные швы располагаются вне зоны сверления отверстий. Аргонодуговая сварка производится в соответствии с ОСТ 26-11-06-85 проволокой марки ВТ1-00 или ВТ1-00С по ГОСТ 27265-87 аттестованным сварщиком по инструкции, согласованной с головной материаловедческой организацией. В качестве защитного газа применяется аргон высшего и 1-го сорта по ГОСТ 10157 с проверкой на технологической пробе. Качество сварных соединений контролируются цветной дефектоскопией в соответствии с ГОСТ 18442-80 и радиографическим методом по ГОСТ 7512-82. Требования по техническим условиям. Усиление сварных швов удаляются, а поверхность карты полируется. Для исключения повреждения поверх-

ности титана продуктами детонации на поверхность карты наносится слой защитной пленки.

4. Перед сборкой пакета основной лист и карта сварная плакирующего слоя обезжириваются. Для сборки пакета разработан ряд технологических приемов, обеспечивающих герметичность сварочного зазора в процессе транспортировки и установки на опору на взрывной площадке.

4.1. На взрывной площадке пакет устанавливается на песчаную опору (рис.6.19, а), контролируется наличие сварочного зазора и его герметичность, после монтажа заряда производится заполнение сварочного зазора аргоном, тип боевика и схема инициирования заряда назначаются в зависимости от размеров листа и расположения сварных швов. После контроля качества заполнения сварочного зазора аргоном производится подрыв заряда.

4.2. Контроль качества после сварки взрывом (рис. 6.19, б) и визуальном-измерительный и УЗК и КК сварных швов производится аналогично Технологической схеме сварки взрывом на взрывной площадке (рис. 6.4). При этом ультразвуковой контроль сплошности соединения биметалла проводится при настройке прибора по плоскодонному отверстию D5 мм, отмечаются участки, в которых фиксируются шумы вблизи браковочного уровня. Эти участки дополнительно контролируются при настройке по отверстию D3,5 мм.

5. Биметаллические листы для снятия напряжений подвергаются термической обработке с нагревом не выше 540°C. После сварки (рис.6.19, б) правка листов производится на вальцах с обеспечением требуемой плоскостности в соответствии с техническими условиями и чертежом трубной доски.

Для контроля качества готовых биметаллических плит разрабатывается схема отбора проб и изготовления из них образцов (рис.6.20.) Обрезка плит в размер (рис.6.19, в) и отбор проб производится плазменной резкой. Готовый лист маркируется в соответствии с техническими условиями. Готовые листы отгружаются автотранспортом партиями (рис.6.19, д).



Рисунок 6.19 – Производство крупногабаритных заготовок для трубных досок конденсаторов АЭС из биметалла сталь+титан (09Г2С+ВТ1-0): монтаж опалубки пакета с защитным покрытием (а), лист биметалла сталь+титан после взрыва (б), кромки двуслойного листа после обрезки плазмой (в), лист биметалла сталь+титан после правки (г), отправка партии готового биметалла автотранспортом (д), применение в изделии - трубная доска сталь+титан после сверления отверстий (е).

По разработанной технологии были изготовлены 216 шт. заготовок трубных досок для Ростовской и Балаковской АЭС (Таблица 6.10, Приложение №4). Для изготовления заготовок трубных досок конденсатора для 3-его энергоблока Ростовской АЭС (30x3200x3600 мм) сварная карта изготавливалась из пяти листов (четыре сварных шва). Для энергоблока Балаковской АЭС (30x3200x3600 мм) в сварной карте выполняли один сварной шов из импортного титана шириной 1900 мм марки Grade 1, что значительно снизи-

ло трудоемкость технологии. Изготовление трубных досок, сверление отверстий в них (рис.6.18, е) подтвердило высокое качество биметалла (Приложение №5)

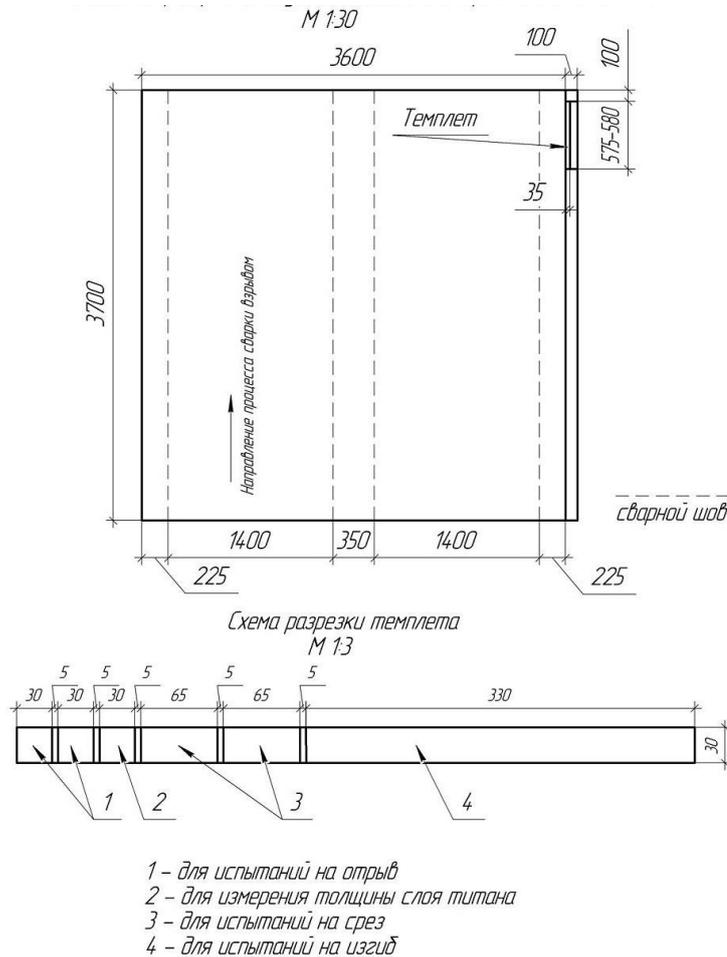


Рисунок 6.20 – Схема отбора проб для испытаний из листа двухслойного сталь+титан

При производстве биметаллических листов сталь+титан для изготовления трубных досок конденсатора атомного ледокола весь технологический процесс производства проходит под контролем Российского Морского Регистра судоходства (РМРС) в соответствии с НД № 2-020101-095 (Правила классификации и постройки морских судов Часть X I II Материалы) [244]. При этом РМРС одобряет все технологические документы производства, включая технологию изготовления карт сварных из титана, технологические инструкции. Отбор проб для проведения испытаний готовых биметаллических листов и их испытания проводятся под контролем специалистов РМРС.

Сертификаты качества на исходные материалы, готовые биметаллические листы подписываются инспектором РМРС. Для изготовления трубных решёток конденсатора атомного ледокола проекта 22220 по разработанной технологии было изготовлено 8 биметаллических листов марки 09Г2С-12+ВТ1-0, качество которых соответствовало требованиям технических условий ТУ 5.961-11917-2015 и подтверждено АО «Уральский турбинный завод» (таблица 6.11, Приложение №5)

Для сварки взрывом титана со сталью предусматривается проведение процесса в среде защитного газа аргона. Внедрение технологии в группе компаний в составе ООО «Битруб Интернэшнл» и ООО «Битруб» позволило изготовить в период с 2013 по 2018 г.г. для предприятий изготавливающих оборудование для судостроения (АО «Уралхиммаш», АО «Уральский турбинный завод»), биметаллические плиты марки 09Г2С+ВТ1-0 площадью до 12 м² для изготовления трубных решёток конденсатора атомного ледокола проекта 22220 общим объёмом 60 м². (Приложение №4).

Экономический эффект.

Для оценки экономической эффективности от замены импортного листа, плакированного взрывом, на отечественный производства ООО «Битруб Интернэшнл» взята стоимость листового биметалла «сталь + коррозионно-стойкая сталь» и «сталь+титан» в соответствии с коммерческим предложением завода «Нобельклад» (Франция), принадлежащего основному производителю биметалла сваркой взрывом в мире «Dynamic Materials Corporation» (США). Расчет экономического эффекта приведен в Приложении №5.

Разница в стоимости импортного и отечественного плакированного взрывом листа за период с 2013-2019 гг. составляет 1 147 528 837,84 руб. при усредненном годовом значении курса Евро за указанный период в размере 64,12 руб. Следовательно, годовой экономический эффект от замены импортного биметалла на отечественный составляет за указанные 7 лет $1\,147\,528\,837,84:7 = 163\,932\,691,00$ (Сто шестьдесят три миллиона девятьсот тридцать две тысячи шестьсот девяносто один) руб.

Таблица 6.10 – Внедрение биметалла сталь+титан, изготовленного по современной промышленной технологии.

№ П/ П	Марка биметалла Размеры мм	Свойства биметалла						Объём производства		Заказчик/ Потребитель год	Назначение Оборудование АЭС
		УЗК %	Плоско- стность мм/п.м.-	$\sigma_{отр}$, МПа	$\sigma_{ср}$, МПа	Изгиб 120°	Боковой изгиб 80°	шт.	м ² /год		
1	09Г2С+ ВТ1-0 48(40+8)x1800x3400	100	2±1	290- 375	230-345	уд	уд	8	49	ОАО «Калужский турбинный завод» 2013	Трубные решётки Кон- денсатора АЭС "Кудам Кулан"
2	09Г2С-13+ ВТ1-0 30(25+5)x3200x3600	100	2±1	284- 428	221-389	уд	уд	36	414,72	ООО «Авента»/ ОАО «Турбоатом» 2013	Трубные решётки Кон- денсатора Блок №3 Ростовской АЭС
3	09Г2С-12+ ВТ1-0 30(25+5)x3200x3600	100	2±1	230- 350	310-365	уд	уд	36	414,72	ООО «Комплект Энерго»/ ОАО «Турбоатом» 2013	Трубные решётки Кон- денсатора Блок №4 Ростовской АЭС
4	09Г2С-12+ ВТ1-0 30(25+5)x3200x3600	100	≤ 2	220- 385	290-340	уд	уд	72	414,72	ООО «Комплект Энерго»/ ОАО «Турбоатом» 2015	Трубные решётки Кон- денсатора Блок №4 Балаковская АЭС
5	09Г2С+Grade 1 30(25+5)x3200x3600	100	≤ 2	338- 497	214-388	уд	уд	72	414,72	ООО «Комплект Энерго» /ОАО «Турбоатом» 2016	Трубные решётки Кон- денсатора Блок №2 Балаковская АЭС
6	09Г2С-13+ ВТ1-0 38(30+8)x2600x2700	100	2±1	398- 365	325-375	уд	уд	8	56,16	СЦ «Металл Маркет» / ОАО «Калужский турбинный завод» 2017	Трубные решётки Кон- денсатора АЭС " Кудам Кулан"
7	09Г2С-13+ ВТ1-0 60(55+5)x2600x3406	100	2±1	220- 405	390-475	уд	уд	64	506	ПАО Силовые маши- ны 2019	Трубные доски конденса- тора АЭС Руппур

Таблица 6.11 – Результаты испытаний образцов листов марки 09Г2С-13 + ВТ1-0 по ТУ 5.961-11917-2015, изготовленных для трубных решёток конденсатора атомного ледокола проекта 22220 (АО «Уральский турбинный завод») размером 35(30+5)x2800x3450 мм.

№ П/П	№ листа	Основной слой				Лист биметаллический			
		Временное сопротивление при +20°C, кгс/см ²	Предел текучести при +20°C, кгс/см ²	Относительное удлинение, %	Ударный изгиб при +20°C	Изгиб+20°C на угол 120° плакирующим слоем внутри	Толщина плакирующего слоя, мм	Сопротивление Срезу, МПа	Сопротивление Отрыву, МПа
1	169-7	608-608	505 - 481	24-24	198-198	уд	5	384-319	321-197
2	170-7	628-628	510-510	24-22	198-198	уд	5	481-520	150-172
1	212	608-598	515-490	24-26	180-180	уд	4,7	382-363	159-206
2	213	617-627	544-564	27-25,5	196-198	уд	4,4	343-363	163-152
3	214	590-590	495-500	30-30	196-196	уд	4,8	324-348	198-182
4	215	627-627	514-519	28-25	196-196	уд	4,5	350-323	232-235

6.5. Выводы по главе

1. Результаты проведенного комплекса исследований свойств в процессе изготовления оборудования из биметалла 22К+08Х18Н10Т, полученного методом сварки взрывом, показали, что биметалл обеспечивает конструктивную стойкость и защитные функции применительно к объектам оборудования АЭУ. По показателям стойкости соответствует аналогичным характеристикам биметалла, полученного методом пакетно-вакуумной прокаткой.

2. Разработана, согласована и зарегистрирована в установленном порядке нормативно-техническая документация на производство биметаллов ответственного назначения, в том числе:

- ТУ 27.32.09.010-2005 «Сталь листовая двухслойная коррозионно-стойкая, изготовленная методом сварки взрывом». Технические условия. Извещение 1-2011 от 20.12.2011 об изменении.

- ТУ 27.81.09.009-2005 «Заготовки двухслойные сталь + титан, полученные сваркой взрывом». Технические условия. Одобрены Управлением по регулированию безопасности атомных станций и исследовательских ядерных установок Ростехнадзора. Извещение 1-2011 от 16.01.2012 об изменении.

- ТУ 0993-001-21414987-2012 «Лист стальной двухслойный коррозионно-стойкий, изготовленный методом сварки взрывом». Извещение 1-2014 от 01.08.2014 и Извещение 2-2014 от 10.12.2014 об изменении. Технические условия одобрены Управлением по регулированию безопасности атомных станций и исследовательских ядерных установок Ростехнадзора. Внесены в НП-089-15 приложение №1 к Сводному перечню документов по стандартизации.

3. Показано, что качество биметалла 09Г2С+10Х17Н13М2Т, полученного сваркой взрывом, по прочности и структуре обеспечивает надёжное закрепление теплообменных труб из стали 316L в трубных досках методами вальцовки и сварки. Применение биметалла позволит сократить расход хро-

моникелевомолибденовых сталей и исключить медесодержащие материалы из второго контура АЭУ.

4. Разработаны современные технологии круглогодичного промышленного производства крупногабаритного листового биметалла сваркой взрывом, обеспечивающие 100% сплошность и заданную прочность соединения слоёв, качество в соответствии с требованиями нормативно-технической документации. Технологии предусматривают проведение всех операций по подготовке исходных материалов, сборке пакета, контролю качества, термообработке и правке в цеховых условиях и только подготовку ВВ, монтаж заряда и сварку взрывом на взрывной площадке. Для сварки взрывом титана со сталью предусматривается проведение процесса в среде защитного газа аргона. Внедрение технологии в группе компаний в составе ООО «Битруб Интернэшнл» и ООО «Битруб» позволило изготовить в период с 2013 по 2019 г.:

- для ведущих заводов нефтехимического машиностроения (ООО «Зенит-Химмаш», АО «Волгограднефтемаш», АО «Востсибмаш», ЗАО НПО «НАТЭК-Нефтехиммаш», АО «Пензахиммаш», и др.) свыше 7000 м² высококачественного биметалла с основным слоем из конструкционных сталей марки 09Г2С (категория 6, 12, 15), 12ХМ (категория 3, 18), 20К, с плакирующим слоем из сталей 08Х13, 08Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т или зарубежных аналогов AISI 410S, AISI 321, AISI 316Ti, AISI 316L толщиной от 3 до 12 мм и площадью листов от 5 до 26 м²;
- для предприятий (АО «Петрозаводскмаш», ООО «Комплект Энерго»), изготавливающих ёмкости САОЗ (Ленинградская, Нововоронежская АЭС) произведено свыше 380 тонн биметаллических плит марки 22К+08Х18Н10Т, площадью до 25 м²;
- для изготовления трубных досок конденсаторов блоков АЭС (Ростовской, Балаковской, «Кудан Кулам», «Руппур») свыше 240 биметаллических плит марки 09Г2С-13+ВТ1-0 (Grade 1) площадью от 8 до 12 м²;

- для предприятий, изготавливающих оборудование для судостроения (АО «Уралхиммаш», АО «Уральский турбинный завод»), биметаллические плиты марки 09Г2С+ВТ1-0 площадью до 12 м² для изготовления трубных решёток конденсатора атомного ледокола проекта 22220 общей площадью 60 м².

Внедрение указанных технологий позволило исключить закупку за рубежом крупногабаритных листов сталь+коррозионностойкая сталь и сталь+титан плакированных взрывом для ответственных отраслей машиностроения. Годовой экономический эффект от замены импортного листа на отечественный составил более 163 млн. рублей.

7. Заключение и общие выводы

Заключение

Проведен комплекс экспериментально-теоретических исследований процесса сварки взрывом стали со сталью и титана со сталью на крупногабаритных листах, разработаны научные и технологические основы промышленного производства крупногабаритного биметалла, позволяющие обеспечить 100% сплошность соединения слоев, включая начальную и краевые зоны, исключить образование локальных дефектов сплошности (вырывы, свищи и т.п.), обеспечить прочность соединения в соответствии с требованиями нормативно-технической документации со стабильным волнообразованием и минимальным количеством литых включений. Внедрены современные технологии круглогодичного промышленного производства крупногабаритного биметалла различного назначения для атомного, нефтехимического и судостроительного машиностроения на специализированном предприятии.

Общие выводы

1. На основании проведенного комплекса исследований разработаны:

- научные основы, включающие критерии условий получения качественного соединения по всей поверхности включая краевые зоны, учитывающие процессы происходящие в сварочном зазоре и свойства свариваемых материалов.

- технологические основы промышленного производства сваркой взрывом крупногабаритных листов биметалла, включающие требования к подготовке исходных материалов, конструкции и сборке пакетов в цехе и установке их на взрывной площадке, подготовке и монтажу заряда взрывчатого вещества, а также к контролю на всех стадиях производства и обработке биметалла после сварки взрывом.

2. Для исследования процессов, происходящих в сварочном зазоре при производстве двухслойных листов промышленных размеров сталь+сталь, сталь+титан, разработали методику, предусматривающую установку ловушек в виде пластин в конечных зонах основного и плакирующего листа, анализ

их поверхности после сварки взрывом. Экспериментально установлено, что на режимах сварки взрывом со скоростью точки контакта 2000-2500 м/с отсутствует устойчивый кумулятивный процесс, способный очистить и преактивировать перед точкой контакта свариваемые поверхности. Экспериментально по наличию на поверхности ловушек слоя окислов титана толщиной 20-80 мкм подтверждено, что в сварочном зазоре при сварке взрывом титана со сталью при заполнении его активным газом идут процессы горения, в первую очередь микронеровностей.

3. Разработана методика расчёта параметров УСГ в сварочном зазоре впереди точки контакта путём решения аэродинамической задачи о сверхзвуковом обтекании свариваемых поверхностей с учетом истечения газа из сварочного зазора в боковые стороны. Показано, что размер области УСГ ограничен и зависит от ширины, длины листов, скорости точки контакта и свойств газа, заполняющего сварочный зазор. При прочих равных условиях увеличение ширины листов приводит к росту длины области УСГ.

4. Предложен механизм очистки и преактивации свариваемых поверхностей перед точкой контакта при сварке взрывом крупногабаритных изделий: очистка и преактивация свариваемых поверхностей происходит перед точкой контакта, в первую очередь, за счет воздействия на поверхностный слой металла сверхзвукового потока неравновесной ударной плазмы, образующейся в пограничном слое между УСГ и свариваемыми поверхностями при их сверхзвуковом обтекании. Взаимодействие ударной плазмы с поверхностью твёрдого тела приводит к диссоциации окислов, разрушению органических загрязнений и резкому повышению активации свариваемых поверхностей перед точкой контакта.

5. Теоретически доказано, что для обеспечения заданного качества прочности сцепления слоев в начале процесса сварки взрывом необходимо обеспечить требуемые параметры УСГ в сварочном зазоре для очистки и преактивации свариваемых поверхностей. Экспериментально подтверждено, что указанные условия достигаются путём установки в начале процесса

генератора УСГ и технологических пластин в краевых зонах. При соударении пластин генератора формируется сверхзвуковой поток УСГ, размеры которого достаточны для очистки и преактивации свариваемых поверхностей. Технологические пластины в конечных зонах позволяют сохранить параметры УСГ.

6. Проведено комплексное исследование качества соединения слоёв на темплетах, отобранных из биметаллического листа размерами $30(26+4) \times 2000 \times 12900$ мм по всей его длине в направлении детонации. Изучены сплошность (по данным УЗК), макро и микроструктура соединения, а также прочность на отрыв плакирующего слоя. Структурные исследования, включающие измерение размеров волн по длине листа, определение усредненной толщины литых включений, их химического состава и изучение структуры в зоне дефектов сплошности, показали, что на некоторой длине листа процесс сварки взрывом из соединения слоев в твердой фазе переходит в жидкофазный с образованием расплавов по всей поверхности соединения толщиной, соизмеримой с амплитудой образующихся волн. Эту толщину расплавов приняли за верхний «предел качественной сварки» стали со сталью. На основе этих данных и расчетного времени воздействия УСГ на свариваемые поверхности предложена методика расчетной оценки предельных размеров листов в зависимости от ширины и длины свариваемых листов.

7. Исследование структуры и прочностных свойств соединения слоёв в различных зонах по площади двухслойного листа сталь+титан размерами $30(25+5) \times 3300 \times 3700$ мм после сварки взрывом с заполнением сварочного зазора аргоном и последующих технологических переделов (термообработки, правки) показало, что принятая технология обеспечивает стабильность процесса образования соединения слоёв с прочностью не менее 300 МПа по всей поверхности листа. В зонах, прилегающих к дефекту сплошности, и зоне полупривара, зафиксированного УЗК, прочность соединения не превышает 150 МПа.

8. Установлено, что при сварке взрывом стали с титаном в среде аргона появление дефектов сплошности и зон пониженной прочности с литыми включениями из оксидных и интерметаллидных соединений обусловлено неполным вытеснением воздуха инертным газом аргоном вследствие возможных колебаний величины сварочного зазора из-за местной деформации листа при электродуговой сварке плакирующего листа из титана.

9. Методом реперных точек в условиях промышленного производства исследована деформация растяжения плакирующего и плакируемого листов при сварке взрывом крупногабаритных листов конструкционная сталь+коррозионностойкая сталь и конструкционная сталь+титан. Показано, что сварка взрывом на конечных участках осуществляется по движущейся поверхности плакируемого листа. Установлено, что в процессе сварки взрывом деформация растяжения основного листа протекает впереди точки контакта по всей толщине до образования соединения.

10. Выявлено резкое возрастание деформации растяжения плакирующего листа из титана в зоне окончания сварки на расстоянии, соизмеримом с протяжённостью области УСГ. Установлено, что деформация растяжения в три и более раз возрастает при проведении процесса сварки взрывом при отрицательных температурах. Длина конечных участков с потягами, трещинами и вырывами плакирующего слоя в этом случае соизмерима с протяжённостью области УСГ, а появление соответствующих дефектов обусловлено резким падением ее параметров (давления и температуры).

11. В результате комплекса исследований свойств смеси гранулированной микропористой аммиачной селитры с дизельным топливом применительно к изготовлению сваркой взрывом крупногабаритных биметаллических листов установлено влияние на скорость детонации смеси процентного содержания дизельного топлива, высоты заряда, а также наличия забойки из песка. Определено, что в изученном диапазоне толщин заряда, скорости детонации смесей (селитра ТУ 2143-036-002-3789-2003) близки к оптимальным для получения качественного соединения сваркой взрывом.

12. Разработана, согласована, зарегистрирована в установленном порядке нормативно-техническая документация на производство биметаллов ответственного назначения для ведущих отраслей машиностроения.

13. Разработаны современные технологии круглогодичного промышленного производства крупногабаритного листового биметалла сваркой взрывом, обеспечивающие 100% сплошность и заданную прочность соединения слоёв, качество в соответствии с требованиями нормативно-технической документации. Внедрение технологий в группе компаний ООО «Битруб Интернэшнл» и ООО «Битруб» позволило изготовить для ведущих предприятий нефтехимического машиностроения в период с 2014 по 2018 г. свыше 7000 м² (свыше 1600 т.) двухслойного высококачественного биметалла сталь+коррозионностойкая сталь. Для атомного и судостроительного машиностроения в период с 2013 по 2019 г. биметаллических плит сталь+титан 294 шт. (286 т.) и сталь+коррозионностойкая сталь. 380 т. (588 м²), качество которых соответствует техническим условиям и требованиям 2, 3 и 4 классов безопасности АЭС. Годовой экономический эффект от замены импортного двухслойного плакированного взрывом листа на отечественный составил более 163 млн. рублей.

Литература

1. Первухина, О.Л. Сварка взрывом: теория и практика [Электронный ресурс] // В сборнике: XVII Всероссийская с международным участием школа - семинар по структурной макрокинетике для молодых ученых имени академика А.Г. Мержанова. Сборник научных материалов. 2019. – С. 22-27. URL: <http://www.ism.ac.ru/events/AllRussiaSchool17/proceedings-17.pdf>
2. Бердыченко А. А. Способы получения биметалла сталь-титан. Исторический обзор/ Бердыченко А. А. //Ползуновский вестник № 4 Год: 2017. – С.129-137.
3. Коррозионно-стойкие биметаллы с прочным сцеплением слоев для нефтехимической промышленности и других отраслей / И. Г. Родионова, и др. – ЗАО Metallurgizdat, Москва, 2011. – 292 с.
4. Родионова, Ирина Гавриловна. Разработка коррозионностойких биметаллических материалов с высокопрочным соединением слоев путем использования электрошлаковой наплавки : диссертация ... доктора технических наук : 05.16.01. - Москва, 2005. - 362 с. : ил.
5. Первухин, Л.Б. Теоретические и технологические основы промышленного производства биметаллов /Л.Б. Первухин, О.Л. Первухина, С.Ю. Бондаренко //Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2010. – № 5 (65) . – С. 75-82.
6. Дерibas, А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом/ А. А. Дерibas. – 2-е изд. доп. перераб. – Новосибирск: Наука, 1980. – 222 с.
7. Седых, В. С. Сварка взрывом и свойства сварных соединений/ В. С. Седых, Н. Н. Казак. – М.: Машиностроение, 1971. – 70 с.
8. Симонов, В. А. Области сварки взрывом. Основные параметры и критерии/ В. А. Симонов. – Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 1995. – 61 с.
9. Crossland, B. An experimental investigation of explosive welding parameters / B. Crossland, F. A.McKee, A. Szecket. High-Pressure Sci. Tech., 1979. – pp. 1837-1845.

10. Babul, W. Materiały wybuchowe technologicznych procesach obróbki tworzyw / W. Babul, S. Ziemia. – Warszawa, 1972. – 275 p.
11. Pervukhin, L. B. Experimental evidence for formation of shock plasma during explosive welding / L. B. Pervukhin, O. L. Pervukhina, I.V. Denisov, T. A. Shishkin // В сборнике : XIII International Symposium on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business and Innovations. – 2016. – pp. 129-131.
12. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М.: "Машиностроение", 2005. – 544 с. ил.
13. Lysak V. I., Explosive welding of metal layered composite materials / V. I. Lysak, S. V. Kuzmin; Ed. B. E. Paton. – Kiev: E. O. Paton Electric Welding Institute of the NASU, 2003. – 117 p.
14. Сварка взрывом : процессы и структуры: монография / О. В. Антонова [и др.]; под ред. Б. А. Гринберг, М. А. Иванова, С. В. Кузьмина, В. И. Лысака. – Москва : Инновационное машиностроение, 2017. – 236 с.
15. Кузьмин, Евгений Владимирович. Закономерности формирования соединения при сварке взрывом с воздействием ультразвуковых колебаний : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.02.10 / Кузьмин Евгений Владимирович; [Место защиты: Волгогр. гос. техн. ун-т]. - Волгоград, 2015. – 19 с.
16. Батаев, Иван Анатольевич. Структура и механические свойства многослойных материалов, сформированных по технологии сварки взрывом тонколистовых заготовок из низкоуглеродистой стали : диссертация ... кандидата технических наук : 05.16.09 / Батаев Иван Анатольевич; [Место защиты: Новосиб. гос. техн. ун-т]. - Новосибирск, 2010. – 233 с.
17. Гринберг, Б.А. Поверхность разлета при сварке взрывом, локальное расслоение/ Б.А. Гринберг // Вестник Тамб. унив. 2013. – Т. 18, № 4-2. – С. 1237- 1838.
18. Кудинов, В. М. Сварка взрывом в металлургии / В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев. – М.: Металлургия, 1978. – 168 с.

19. Otto, G. Aspect relating to the central institute for industrial research / G. Otto // Proc. NATO, Oslo, Norway, 1964. – pp. 1435-1441.
20. Richter, U. III Symposium Sprengbearbeitung Von Metallen. Marianske Lazne, 1976.
21. Effects of gaseous media on interfacial microstructure and mechanical properties of titanium/steel explosive welded composite plate / X. Y.Zeng, Y. X. Wang, X. Q. Li, X. J. Li, T. J. Zhao // Fusion Engineering and Design. – 2019. – Vol. 148, Article number: 11129.
22. О возможном возгорании выбрасываемых в зазор частиц при сварке титана взрывом / А.А. Бердыченко, Б.С. Злобин, Л.Б. Первухин, А.А. Штерцер // Физика горения и взрыва. – 2003. – № 2 – С. 128–136.
23. The Effect of Atmosphere and Vacuum on Character of Weld Joints Fabricated by Explosion /M. Jáňa, M. Turňa, J. Ondruška, P. Nesvadba//Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 875-877, February – pp. 1472-1476.
24. Злобин Б. С. Разработка научных основ процесса изготовления биметаллических заготовок подшипников с использованием сварки взрывом : диссертация ... доктора технических наук : 01.02.04./ Злобин Борис Сергеевич; – Новосибирск, 2000.- 277 с.: ил.
25. Crossland, B. Developments in Explosive Welding / B. Crossland, J. D. Williams, V. Shribman/ Aircraft Engineering and Aerospace Technology. – 1968 – Vol. 40 (12), – pp. 11-13.
26. Лысак, В. И. Металлические слоистые композиционные материалы (Энциклопедия «Машиностроение». – Т. III-6. Технология производства слоистых металлических композиционных материалов и изделий из них) / В.И. Лысак, А.Г. Кобелев. – М.: Машиностроение, 2006. – 576 с.
27. Петушков, В. Г. Применение взрыва в сварочной технике / В. Г. Петушков. – Киев: «Наукова думка», 2005. – 754 с.
28. Ezra, A. A. Principles and practice of explosive metalworking / A. A. Ezra. – London: Industrial Newspapers Ltd., 1973. – 270 p.

29. Explosive welding, forming and compaction / Ed. T. Z. Blazynski. – London; New York: Appl. Sci. publ., 1983. – 276 p.
30. Банкер, Дж. Г. Промышленное применение сварки взрывом (Обзор) / Дж. Г. Банкер, Автоматическая сварка, 2009. – № 11. – С.49-53.
31. Рабкин, Д.М. Сварка разнородных материалов / Д. М. Рабкин, Р.Р.Рябов, С.М.Гуревич. – Киев: «Техника», 1975. – 206 с.
32. Голованенко, С. А. Сварка прокаткой биметаллов / С. А. Голованенко; под ред. Э.С. Каракозова. – Москва : Металлургия, 1977. – 158 с.
33. Рыбкин, Александр Николаевич. Формирование структуры и свойств коррозионностойкого биметаллического проката, получаемого с использованием метода электрошлаковой наплавки : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.16.01 / ФГУП ЦНИИчермет. - Москва, 2004. - 48 с.
34. Первухина, О. Л. Свойства коррозионностойких биметаллов, полученных сваркой взрывом, для производства оборудования в нефтехимическом машиностроении / О. Л. Первухина, Л. Б. Первухин // Коррозия Территории нефтегаз. – 2015. – № 3(32) . – С.36-39.
35. Плакирование стали взрывом: Структура и свойства биметалла/А.С. Гельман и др.; под ред. А. С. Гельмана. – Москва : Машиностроение, 1978. – 191 с.
36. Конон, Ю.А., Сварка взрывом. /Ю.А. Конон, Л.Б. Первухин, А.Д. Чудновский – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.
37. Первухина, О. Л. Двухслойные стали для ответственных металлоконструкций/ О. Л. Первухина, И. В. Денисов //Известия ВолгГТУ. Серия "Сварка взрывом и свойства сварных соединений". – 2020. – № 11 (246) – С.46-52.
38. Евразийский патент № 016878 ЕАПВ «Многослойный материал повышенной коррозионной стойкости (варианты) и способы его получения», С23F 13/06 В 32В 7/02 // А.Е. Розен, И.С. Лось, Ю.П. Перелыгин, Л.Б. Первухин, Ю. А. Гордополов, Г.В. Кирий, П.И. Абрамов, С.Г. Усатый, Д.Б. Крюков, О.Л. Первухина, И.В. Денисов, А.А. Розен. - выдан 30.06.2012, приоритет от 26.09.2008.

39. Patent № 10-1300674 КИПО Multilayer material with enhanced corrosion resistance (variants) and methods for preparing same. Reg. date: 2013-08-21, Filing date: 2011-04-11.
40. Биметаллические материалы / М. И. Чепурко и др. – Л.: «Судостроение», 1984. – 272 с.
41. SMI - World Market for Clad Plate - Contents and Sample Pages [Электронный ресурс] 2014. URL: <https://www.steel-intelligence.com/product-reports/articles/the-market-for-clad-plate.html>
42. Быков, А. А. Этапы развития производства биметаллов / А. А. Быков // «Металлург». – 2009. №8. – С. 70-75.
43. Седых, В.С. Сварка взрывом, как разновидность процесса соединения металлов в твердой фазе / В. С. Седых // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. трудов / ВолгГТУ. – 1974. – Вып.1. – С. 29 - 38.
44. Каракозов, Э. С. Соединение металлов в твердой фазе / Э. С. Каракозов. – М.: "Металлургия", 1976 – 264 с.
45. Первухин, Л. Б. Биметаллы для машиностроения и их свойства [Электронный ресурс] // Экспозиция металлообработка. – 2013. – №2 (95) – С. 27-28. URL: <http://www.mmsv.ru/upload/iblock/ee3/ee3f2ceed84520384f9a47f2950f4d42.pdf>
46. Рихтер, Д. В. Совершенствование метода сварки взрывом сталей на основе исследования процессов, идущих в сварочном зазоре перед точкой контакта : дис... канд. техн. наук: 05.03.06 / Рихтер Дмитрий Владимирович. – М., 2009. – 135 с.
47. Лось, И. С. Исследование механических свойств и коррозионной стойкости многослойных материалов, полученных сваркой взрывом/ И. С. Лось //Известия Волгоградского государственного технического университета – 2016.– №10(189). – С. 87-94.
48. Ghanadzadeh, A. Shock loading effect on the corrosion properties of low-carbon steel / A. Ghanadzadeh, A. Darviseh, //Materials Chemistry and Physics. 2003.– Vol. 82, №1.– pp. 78-83.

49. Kacar, R. An investigation on the explosive cladding of 316L stainless steel-in-P355GH steel / R. Kacar, M. Acarer // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2004. – Vol. 152, №1. – pp. 91-96.
50. Jiang, Q. T. Heat treatment test of explosion welded stainless steel composite steel plate head / Q. T. Jiang // *The Pressure Vessel*. – 2004. – Vol. 21. – pp. 14-17.
51. Distribution and corrosion behaviors of the triple junctions in a grain boundary engineered 304 stainless steel / X. Fang, W. Wang, H. Guo, C. Q. B. Zhou, B. Zhou // *International Journal of Modern Physics B*. – 2009. – Vol.23, – № 6-7. – pp. 1110-1115.
52. A novel reduction-bonding process to fabricate stainless steel clad plate / Y.A.ing, Y.Qin, X. Zang, Q.Shang, S. Hua // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2014. – Vol. 617. – pp. 688-698.
53. Improving the intergranular corrosion resistance of the weld heat-affected zone by grain boundary engineering in 304 austenitic stainless steel / H. Yang, S. Xia, Z. Zhang, Q. Zhao, T. Liu, B. Zhou, Q. Bai // *Jinshu Xuebao / Acta Metallurgica Sinica*. – 2015 –Vol.51, № 3. – pp. 333-340.
54. Коррозионно-стойкий биметалл для сельхозмашиностроения / Ю.А.Конон, В.Н.Фёдоров, Л.Б. Первухин, А.А. Быков. – М.: «Машиностроение», 1984. – 112 с.
55. Особенности образования несплошности при производстве двухслойных крупногабаритных листов сваркой взрывом / Л. Б. Первухин, Д. В. Рихтер, О.Л. Первухина, С.Ю. Бондаренко // *Сварочное производство*. 2009. №7. С. 32-37.
56. Патент 2253885, ФРГ, МКИ³ В23А 3/09 Способ плакирования металлических изделий сваркой взрывом / Б.Д. Цемахович, Ю.И. Апаликов, Ю.А Конон, Л.Б. Первухин // Запатентовано 03.11.1972.
57. Патент 1402276 Великобритания В23Р3/09 Способ плакирования металлических изделий сваркой взрывом Б.Д. Цемахович, Ю.И. Апаликов, Ю.А Конон., Л.Б. Первухин // Запатентовано 24.10.1972.

58. Чернухин, В.И. О некоторых особенностях краевых эффектов и нестационарных явлений при сварке взрывом/ В.И. Чернухин // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Сб.науч. тр./ Волгоград: Волгогр. политехн. ин-т. – 1991.– С.53-62.
59. Крупин, А. В. Обработка металлов взрывом / А.В. Крупин, В.Я. Соловьев, Г. С. Попов. — М.: Metallurgy, 1991. — 495 с.
60. Деформация металлов взрывом/ А. В. Крупин, В. И. Соловьёв, Н. И. Шефтель, А. Г.Кобелев. – М.: Metallurgy, 1975. – 416 с.
61. Деформационные процессы при сварке взрывом / И.В. Денисов, Л.Б. Первухин, О.Л. Первухина, А.Е. Розен / Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст./ ВолГТУ. Волгоград, 2008. – №3(41) – С. 39.
62. Трыков, Ю. П., Деформация слоистых композитов: Монография/ Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгун, Л. М. Гуревич. – ВолГТУ. Волгоград, 2001.– С. 20-27.
63. Первухин, Л. Б. Развитие технологии производства биметалла сваркой взрывом в России / Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина, Д. В. Рихтер// Технология машиностроения. – 2009. – № 9. – С. 5-11.
64. Шведов, К. К. Процессы детонации и взрыва гетерогенных конденсированных взрывчатых веществ. Физические проблемы разрушения горных пород / К. К. Шведов // Сб. трудов третьей международной конференции. – Новосибирск: Наука. – 2003. – С. 19.
65. Крупин, А. В. Сварка взрывом крупногабаритных биметаллических листов с использованием сварочных аммонитов типа АТ / А. В. Крупин, В. Я. Соловьев, А. Г.Кобелев // Труды Всесоюзной межвузовской конференции по обработке металлов взрывом: Сб. статей МИСИС. – М.: МГУ. – 1980. – С.79-81.
66. А. с. 599438 СССР, МКИ² В23 К 19/00, В 23Р 3/09. Способ плакирования металлических поверхностей сваркой взрывом / Л.Б. Первухин, Ю.А. Конон; заявитель НПО АНИТИМ. – № 2432663/25-27; заявл. 24.11.76.

67. А. с. 1584268 А1 СССР, В23 К 20/08. Способ взрывного плакирования металлических поверхностей / А.А. Бердыченко, Л.Б. Первухин, А.Г. Ломаев, В.В. Митрошкин; заявитель НПО АНИТИМ. – № 4479661/25-27 ; заявл. 05.09.88.
68. Патент Франции № 7245251, МКИ³ В 23Р 3/00. Способ плакирования металлических изделий / Ю. А. Апаликов, Л. Б. Первухин и др. // Запатентовано 24.10.1972.
69. Особенности сварки взрывом стали с титаном в защитной атмосфере / О.Л. Первухина, Л.Б. Первухин, А.А. Бердыченко, Л.Д. Добрушин, В.Г. Петушков, Ю.И. Фадеев // Автоматическая сварка. – 2009. – № 11. – С. 23.
70. Ultrasonic Welding of Magnesium–Titanium Dissimilar Metals: A Study on Thermo-mechanical Analyses of Welding Process by Experimentation and Finite Element Method/ Dewang Zhao, Daxin Ren, Kunmin Zhao, Pan Sun, Xinglin Guo & Liming Liu // Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, Vol. 32, Article number: 97.
71. Бердыченко, А. А. Трудности сварки взрывом крупногабаритных листов биметалла с плакирующим слоем из титана и пути их преодоления А. А. Бердыченко, Л. Б. Первухин // Ползуновский альманах. – 2008. – №3. – С. 25-27.
72. Трыков, Ю.П. Титаностальные композиты и соединения : монография / Ю.П. Трыков, Л.М. Гуревич, В.Г. Шморгун; ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – 344 с.
73. Special features of formation of defects in explosion welding of two-layer large plates /L.B. Pervukhin, D.V. Rikhter, O.L. Pervukhina, S.Y. Bondarenko // Welding International. – 2011. – Vol 25, №2. – pp. 130-134.
74. Особенности образования несплошности при производстве двухслойных крупногабаритных листов сваркой взрывом / Л. Б. Первухин, Д. В. Рихтер, О. Л. Первухина, С. Ю. Бондаренко // Технология машиностроения. – 2009. – № 10. – С. 5-9.

75. Яковлев, И. В. Сварка металлов взрывом : аннотир. библиогр. указ. отеч. и зарубеж. работ за 50 лет / И. В. Яковлев, В. В. Пай. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2013. – 565 с.
76. Волнообразование при косых соударениях / Рос. акад. наук. Сиб. отделение. Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева; [Пер. и редактирование И.В. Яковлев и др.]. – Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, 2000. – 221 с.
77. Захаренко, И. Д., Сварка металлов взрывом / И. Д. Захаренко. – Мн.: "Наука и техника", 1990. – 205 с.
78. Райнхарт, Дж. С. Взрывная обработка металлов / Дж. С. Райнхарт, Дж. Пирсон. – М. Мир, 1966. – 391 с.
79. Cowan, G.R. Flow configuration in colliding plates: Explosive welding / G.R. Cowan, A.H. Holtzman // J. Appl. Phys . – 1963. – Vol. 34. №4. – pp. 928–939.
80. Öberg, Å. Fundamental aspects of formation and stability of explosive welds / Å. Öberg, N. Mårtensson, J. Å. Schweitz. //Metall. Trans. A., 1985. – Vol. 16. – pp. 841–852.
81. Crossland B. Explosive Welding of Metals and Its Applications / B. Crossland - Belfast, Oxford, UK: Clarendon Press, 1982. – 233 p.
82. Findik, F. Recent developments in explosive welding // F. Findik. – Mater. Des., 2011. – Vol. 32, № 3. – pp. 1081–1093.
83. Effect of initial temperature attained at contact point on explosive welding Rikhter D.V., Pervukhin L.B., Pervukhina O.L. В сборнике: Shock-assisted materials synthesis and processing: Science, innovations, and industrial implementation (EPNM-2008). 2008. pp. 104.
84. Гельман, А. С. Основы сварки давлением / А. С. Гельман. – М.: "Машиностроение", 1970. – 312 с.
85. Беляев, В. И. Высокоскоростная деформация металлов / В. И. Беляев, В. Н. Ковалевский, Г. В. Смирнов, В. А.Чекан. – Мн.: "Наука и техника", 1976. – 224 с.

86. Дерибас, А. А. О поверхностных эффектах при косых соударениях металлических пластин / А.А. Дерибас, И.Д. Захаренко // Физика горения и взрыва. – 1975. – Т. 11, № 1. – С.151 - 153.
87. Козловский, С.Н. Введение в сварочные технологии /С.Н.Козловский. – Санкт-Петербург, Изд-во Лань, 2011 – 416 с.
88. Способы получения композиционных материалов методами высокоэнергетического воздействия: монография / Розен А.Е., Кривенков А.О., Крюков Д.Б., Чугунов С.Н., Первухина О.Л., Гуськов М.С. – Пенза, Изд-во ПГУ, 2016. – 136 с.
89. Беликова, А. Ф. Образование микровыступов перед точкой контакта при сварке взрывом. А.Ф. Беликова, С.Н. Буравова, Ю.А. Гордополов // Известия Волгоградского Государственного Технического Университета. – 2010. – № 5 (65) . – С. 83-87.
90. Процессы расплавления, вихреобразования и фрагментации при сварке взрывом / Б. А. Гринберг, М. А. Иванов, В. В. Рыбин, С. В. Кузьмин, д-р техн. наук, В. И. Лысак, Я. Г. Смородинский, О. В. Антонова, О. А. Елкина, А. В. Иноземцев, А. М. Пацелов, В. Е. Кожевников // Сварка и Диагностика. – 2010. – №6. – С.34-38.
91. Добрушин, Л. Д. Тепловые явления на волнообразной поверхности соединения при сварке взрывом/ Л. Д. Добрушин, Ю. И. Фадеенко //Известия ВолгТУ, 2006. – №9. – С. 23-24.
92. Шморгун, В. Г. Комплексные технологические процессы получения слоистых интерметаллидных композитов / В. Г. Шморгун, Ю. П. Трыков, О.В. Слаутин // Конструкции из композиционных материалов. – 2005. – № 3. – С. 3–9.
93. Процессы фрагментации при сварке взрывом (обзор) / Б. А.Гринберг, М. А. Иванов, В. В. Рыбин, О. А. Елкина, А. М. Пацелов, О. В.Антонова, А. В. Иноземцев, Т. П. Толмачев // Деформация и разрушение материалов. – 2012. – № 8. – С. 2–13.

94. Эпштейн Г. Н. Строение металлов, деформированных взрывом/ Г. Н. Эпштейн. – М.: Metallurgy, 1988. – 280 с.
95. Особенности пластической деформации металла околошовной зоны при сварке взрывом разнородных металлов/ С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, В. В. Рыбин, А. П. Пеев/ Известия ВолГТУ. – 2010. – № 4, – С. 4-11.
96. Lysak, V. I. Lower boundary in metal explosive welding. Evolution of ideas / V. I. Lysak, S. V. Kuzmin // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Vol. 212, iss. 1. – pp. 150–156.
97. Локализация пластического низкоуглеродистой стали, деформированной взрывом / И. А. Батаев, А. А. Батаев, И. А. Балаганский, В.Г. Буров, Е. А. Приходько, Н. А. Морева, А. А. Руктуев // Физическая мезомеханика.– 2011.– Т. 14.– № 1.– С. 93-99.
98. Большие пластические деформации и высокие скорости охлаждения на границе свариваемых взрывом материалов / И. А. Батаев, И. В. Иванов, Ю. Н. Малютина, К. И. Эмурлаев, Ю. Ю. Эмурлаева //Металловедение и термическая обработка металлов.– 2018.– Т. 760.– № 10.– С. 60-65.
99. Blazynski, T. Z. Explosive Welding, Forming and Compaction / T. Z. Blazynski. – London.: Applied Science Publishers, 1985. – P.200.
100. Numerical study on the influence of different anvils on explosive welding / J. Feng, P. Chen, K. Dai, E. An, Y. Yuan// Mater. Sci. Forum, 2014. – Vol. 767. – pp. 114 - 119.
101. Saravanan, S. Influence of interlayer in explosive cladding of dissimilar metals // S. Saravanan, K. Raghukandan// Mater. Manuf. Processes. – 2013. – Vol. 28, № 5. – pp. 589 - 594.
102. Grignon, F. Explosive welding of aluminum to aluminum: Analysis, computations and experiments /F. Grignon, D. Benson, K.S. Vecchio, M. A. Meyers // Int. J. Impact Eng., 2004. – Vol. 30. – pp. 1333–1351.
103. Первухина, О.Л. К вопросу об очистке и активации свариваемых поверхностей при сварке взрывом крупногабаритных листов/О. Л. Первухина

//Известия ВолгГТУ. Серия "Сварка взрывом и свойства сварных соединений". – 2020. – № 11 (246), – С.58-63.

104. Добрушин, Л. Д. Канальный эффект при сварке взрывом / Л. Д. Добрушин, Ю. И.Фадеев, С. Ю. Илларионов, П. С. Шленский// Автоматическая сварка. – 2009. – № 11. – С.19 - 21.

105. Злобин Б. С. Сварка стали с алюминием / Б.С.Злобин // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т.38, №3. – С.137-140.

106. Изучение некоторых вопросов очистки поверхностей в процессе сварки взрывом / А. С. Гельман, Л. Б. Первухин, Б. Д. Цемахович и др. // Физика горения и взрыва. – 1974. – №2. – С. 284 – 288.

107. Кузьмин, С. В. Основные закономерности перехода к безволновым режимам формирования соединения при сварке взрывом / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак //Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. трудов / ВолгГТУ. – Волгоград, 1991. – С. 29-38.

108. Моделирование и применение высокоскоростных процессов сварки материалов взрывом /Г. В. Смирнов, А. Д. Шуганов, Р. В. Стефанович, А. И. Ядевич, И. В. Петров, А. А. Коморный, В. А. Конопляник, А. Р. Лученок, А. А. Толошный, П. Т. Богданович, О. А. Дзичковский //Автоматическая Сварка. – 2009. – №11. – С.33-42.

109. Красулин, Ю. Л. О механизме образования соединения разнородных материалов в твердом состоянии / Ю. Л. Красулин, М. Х. Шоршоров // Физика и химия обработки материалов. – 1967. – №1. – С. 89 - 97.

110. Кузьмин, Сергей Викторович. Создание технологических процессов сварки взрывом слоистых металлических композитов на основе исследования кинетики и деформационно-энергетических условий формирования соединения : диссертация ... доктора технических наук : 05.03.06. - Волгоград, 2006. - 298 с. : ил.

111. Каракозов, Э.С. Сварка металлов давлением / Э.С. Каракозов. М.: "Машиностроение", 1986. – 378 с.

112. Бондарь, М. П., Деформация на контактах и критерий образования соединений при импульсных воздействиях // М. П. Бондарь, В. Ф. Нестеренко // Физика горения и взрыва, 1991. – Т.27, № 3. – С. 103 – 117.
113. Седых, В.С. Классификация, оценка и связь основных параметров сварки взрывом / В.С. Седых // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: сб. науч. трудов / Волгоград: ВолгГТУ. – 1985. – С. 3 - 30.
114. Кривенцов, А.Н. О механизме пластической деформации при сварке взрывом / А.Н. Кривенцов, В.С. Седых, И.П. Краснокутская и др. // Физика и химия обработки материалов. – 1969. – №6. – С. 99 – 102.
115. Шмогун В. Г. Расчетное определение оптимальных параметров сварки взрывом/ В. Г. Шморгун // /Металловедение и прочность материалов/ Волгоград: ВолгГТУ. – 1997. – С.26-28.
116. Шморгун, В. Г. Исследование основных закономерностей процесса пластической деформации при сварке взрывом / В. Г. Шморгун // Сварочное производство. – 2000. – №3. – С. 23-25.
117. Бердыченко, А. А. Исследование возможности самоочищения поверхностей при сварке взрывом в результате действия температурных напряжений А.А. Бердыченко, М.Х. Флат, Ползуновский альманах. – 2010. – № 1. – С. 210-214.
118. Richardson, I. M. Role of Gas During Explosive Cladding / I. M. Richardson, E. P. Carton, Y. van der Drift, H. van der Linde // Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations, Lisse, Netherlands. – 2008. – pp.55.
119. Исследование тепловых процессов при сварке взрывом /С. В.Хаустов, С. В.Кузьмин, В. И.Лысак, В. В.Пай // Физика горения и взрыва. – 2014. – Т.50. – №6. – С.122-129.
120. Измерение температуры на границе соединения металлов в процессе сварки взрывом. /В.В.Пай, М.А.Гулевич, И.В.Яковлев, С.В.Кузьмин, С.В.Хаустов. // Известия волгоградского государственного технического университета. – 2012. – №14 (101) . – С. 21-26.

121. Об основных принципах проектирования режимов сварки взрывом металлических слоистых композитов / С.В. Кузьмин, В.И. Лысак, СВ. Хаустов, Т.Ш. Сильченко // Известия ВолгГТУ. Серия "Сварка взрывом и свойства сварных соединений" межвуз. сб. науч ст. Волгоград: ВолгГТУ. – 2006. – №2 (9). – С. 4- 17.
122. Saravanan, S. Thermal kinetics in explosive cladding of dissimilar metals / S. Saravanan, K. Raghukandan // Science and Technology of Welding and Joining. – 2012. – Vol 17, № 2. – pp. 99-103.
123. Сильченко, Т. Ш. Исследование условий формирования соединения при сварке взрывом крупногабаритных заготовок коррозионно-стойкого биметалла и разработка технологии их изготовления : дис...канд. техн. наук: 05.03.06 / Сильченко Тимур Шеримович. - Волгоград, 2008. - 157 с.
124. 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.
125. Сварка взрывом на тонких зазорах: особенности и перспективы применения насыпных взрывчатых веществ /В. В. Гундорин, Е. И. Ермолович, И. А. Кузнецов, А. С. Смирнов, В. Б. Яшин // Вестник технологического университета. – 2016. – Т.19, №19. – С.48-52.
126. Pervukhina, O. L Faulty fusions in large-size explocad sheets and detonation parameters of explosives / O. L. Pervukhina, L. B. Pervukhin // В сборнике: Explosive production of new materials: science, technology, business, and innovations X International Symposium on Explosive Production of New Materials: collection of abstracts. – 2010. – С. 54.
127. Деформационные и термодинамические условия при плакировании титаном цилиндрических деталей методом сварки взрывом /О. Л. Первухина, И. В. Сайков, Л. Б. Первухин, Ф. Б. Хайдаров // Технология машиностроения. – 2010. – №7. – С. 30 - 33.
128. Влияние состава атмосферы на образование соединения титана со сталью при сварке взрывом / О. Л. Первухина, А. А. Бердыченко, Л. Б. Перву-

хин, Д. В. Олейников // Известия ВолГГТУ, межвуз. сб. науч. ст. №9(24) / ВолГГТУ. Волгоград, 2006. – С.59-64.

129. The synthesis of materials in a cumulative jet / О.Л. Первухина, Л. Б. Первухин // AIP Conference Proceedings 849. – 2006, P. 115-120.

130. Pervukhina, O. L. Method of traps for analysis of particles flying out from technological gap / O.L. Pervukhina, A.A. Berdychenko, L.B. Pervukhin // В сборнике: Shock-assisted materials synthesis and processing: Science, innovations, and industrial implementation. – 2008. – С. 101-102.

131. 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.

132. Pervukhina, O. L. On the nature of processes taking place in technological gap during explosive welding /Pervukhina O.L., Pervukhin L.B., Bondarenko S.Yu., Rikhter D.V. // В сборнике : Explosive production of new materials: science, technology, business, and innovations X International Symposium on Explosive Production of New Materials: collection of abstracts. – 2010. – С. 55.

133. Физика взрыва /А. Ф. Баум, П. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. – М.: Наука, 1975. – 704 с.

134. Бердыченко, А. А. Дефекты, возникающие при плакировании крупногабаритных листов стали титаном, причины их возникновения и пути устранения. /Бердыченко А.А., Первухин Л.Б., Первухина О.Л. //Ползуновский вестник. – 2009. – № 4. – С. 216-219.

135. Бондаренко, С. Ю. Определение параметров ударно-сжатого газа в сварочном зазоре впереди точки контакта при сварке взрывом / С. Ю. Бондаренко, Д. В. Рихтер, О. Л. Первухина, Л. Б. Первухин. //Автоматическая сварка. – 2009. – №11. – С. 46 - 48.

136. Parameters of shock-compressed gas in technological gap /Bondarenko S.Yu., Rikhter D.V., Pervukhina O.L., Pervukhin L.B. // В сборнике : Explosive

production of new materials: science, technology, business, and innovations X International Symposium on Explosive Production of New Materials: collection of abstracts. – 2010. – pp. 8.

137. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль.– Ижевск.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.

138. Светцов, В. В. Нестационарный режим сверхзвукового обтекания // В.В. Светцов. – ЖТФ. – 1999. – Т. 69, № 12. – С. 95 – 97.

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

140. Лойцянский, Л. Г. Ламинарный пограничный слой / Л. Г. Лойцянский. – Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1962. – 478 с.

141. Кузнецов, Н. М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах / Н. М. Кузнецов. – М.: Машиностроение, 1965. – 464 с.

142. Дорренс У. Х., Гиперзвуковые течения вязкого газа, пер. с англ./ У. Х. Дорренс. – М.: Машиностроение, 1966. – 440 с.

143. Алексеев, Ю. Л. Формирование соединения при сварке взрывом / Ю.Л. Алексеев, Г.М. Смирнова. // Физика и химия обработки металлов. – 1994. – № 4/5. – С. 126 - 130.

144. Алексеев, Ю. Л. Об условиях образования сварного соединения взрывом / Ю.Л. Алексеев, Г.М. Смирнова. // Физика и химия обработки металлов, 1994. – № 2. – С. 112 -116.

145. Старик, А. М. Неравновесные физикохимические процессы в газовых потоках и новые принципы организации горения / Под ред. А.М. Старика.- М.: ТОРУСС ПРЕСС, 2001. – 864 с.

146. Трубников, Б.А. Теория плазмы / Б. А. Трубников. - М: Энергоатомиздат, 1996. – 460 с.

147. Франк-Каменецкий, Д. А. Лекции по физике плазмы / Д. А. Франк-Каменецкий. – М.: Атомиздат, 1968. – 288 с.
148. Алымов, М.И. О механизмах формирования контакта при сварке взрывом. /М.И.Алымов, А.А.Дерибас, И.С.Гордополова //Перспективные материалы. – 2013. – №12. – С.51-55.
149. Алымов, М. И. Исследование влияния газовой прослойки при сварке взрывом. /М. И.Алымов, А. А. Дерибас, И. С. Гордополова //Перспективные материалы. – 2016. – №9. – С.5-10.
150. Бердыченко, А. А. Исследование возможности самоочистки поверхностей при сварке взрывом в результате действия температурных напряжений /Бердыченко А. А., Флат М. Х. //Ползуновский альманах. – 2010. – № 1. – С. 210-214.
151. Коваленко, А. Д. Введение в термоупругость / А. Д. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1965.– С.180-185.
152. Коваленко, А. Д. Основы термоупругости: учебное пособие / А. Д. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1970.– С. 253-257.
153. Морозов, А. И. Введение в плазмодинамику / А.И. Морозов. – М.: Физматлит, 2006. – 576 с.
154. Зандберг, Э. Я. Поверхностная ионизация / Э.Я. Зандберг, Н.И. Ионов. – М. : Наука, 1969. – 432 с.
155. Строение границ в композиционных материалах, полученных с использованием взрывного нагружения /В.И.Лысак, С.В.Кузьмин, А.В.Крохалев, Б.А.Гринберг //Физика металлов и металловедение. – 2013. – Т.114, №11. – С.1026-1031
156. Первухин, Л. Б. Взаимодействие ударно-сжатого газа в сварочном зазоре со свариваемыми поверхностями при сварке взрывом / Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина // Сварочное производство. – 2016. – № 6. – С. 20–25.

157. Pervukhin, L. B. Interaction of impact-compressed gas in the welding gap with the welded surfaces in explosive welding / L.B. Pervukhin, O.L. Pervukhina, //Welding International. – 2017. – Vol. 31, № 6. – С. 457-461.
158. Первухина, О.Л. К вопросу образования соединения в процессе сварки взрывом Первухина О.Л., Бондаренко С.Ю., Первухин Л.Б /Всероссийская конференция Взрыв в физическом эксперименте/тезисы докладов 16-20 сентября 2013 С. 147-148.
159. Егер, С.М. Основы авиационной техники: Учебник. / С. М. Егер, А. М. Матвеев, И. А. Шаталов. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 576 с.
160. Использование методов сварки взрывом и взрывной термической обработки металлов для создания многослойных броневых композиций, имеющих повышенную пулестойкость и живучесть / В. К. Ашаев, Г. С. Доронин, Е. И. Ермолович, В. П. Новичков, В. Б. Яшин // Вооружение, автоматизация, управление. Сборник научных трудов. – Ковров. – 2006. – С.317.
161. Pervukhina, O.L. Some aspects of join formation during explosive welding / Pervukhina O.L., Rikhter D.V., Denisov I.V., Pervukhin L.B. В сборнике: Shock-assisted materials synthesis and processing: Science, innovations, and industrial implementation (EPNM-2008). 2008. – pp. 7.
162. Чистяков, В.П. Модификация металлических поверхностей с помощью высокоскоростной плазмы/ В.П.Чистяков, Т.М.Соболенко, Г.А. Швецов // Физика горения и взрыва. – 1995. – Т.31, №6. – С.99-105.
163. Сенокосов, Е.С. Плазменная электродуговая очистка поверхности металлических изделий / Е.С.Сенокосов, А.Е. Сенокосов "Металлург". 2005. – № 4. – С.44.
164. Бондарь, М. П., Влияние механизма деформации в зоне соударения пар материалов на выбор оптимальных параметров сварки взрывом/ М. П. Бондарь //Автоматическая сварка. – 2009. – №11. – С.14-18.
165. Бондарь, М.П. Тип локализации пластической деформации на контактах, определяющий образование связи / М. П. Бондарь // Физика горения и

взрыва. – 1995. – Т. 31, № 5. – С. 122-128.

166. Бондарь, М. П. Особенности развития структуры титана при взрывном коллапсе толстостенных цилиндров/ М.П. Бондарь, О.Л. Первухина, В.Ф. Нестеренко, Я.Л. Лукьянов //Физика горения и взрыва. – 1998. – Т.34. – № 5.– С. 122-129.

167. Development of the titanium structure in explosive collapse of thick-walled cylinders / M. P. Bondar, O. L. Pervukhina, V. F. Nesterenko, Yu. L. Lukyanov //Combustion, Explosion and Shock Waves. – 1998. – Vol. 34 (5). – P. 590-597 .

168. Особенности пластической деформации металла околошовной зоны при сварке взрывом разнородных металлов/ С.В.Кузьмин, В.И.Лысак, Рыбин В.В., Пеев А.П //Известия ВолгГТУ. – 2010. – Т.5, №4. – С.4-12.

169. О возможности применения плакированных трубных досок для изготовления теплообменного оборудования/ Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина, А. С. Зубченко, В. П. Рабинович, Н. В. Давыдова //Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. – 2012. – № 31. – С. 83-91.

170. Лысак, В.И. Временные параметры сварки взрывом/ В.И.Лысак, С.В.Кузьмин Временные параметры сварки взрывом //Известия волгоградского государственного технического университета. 2012, №14 (101). С. 4-20.

171. Development of an Explosive Welding Process for Producing High-Strength Welds between Niobium and 6061-T651 Aluminum. /T. A. Palmer, J. W. Elmer, D. Brasher, D. Butler, and R. Riddle //Welding Journal, November 2006. – pp.253-263.

172. Трыков, Ю.П. Диффузия в слоистых композитах / Ю.П. Трыков, Л.М. Гуревич, В.Н. Арисова. – 2006. – 402 с.

173. Бердыченко, А. А. Изменение структуры сварного соединения полученного сваркой взрывом, с увеличением его габаритов и атмосферы в сварочном зазоре на примере титана/ А.А. Бердыченко, Л.Б. Первухин //Ползуновский вестник. - 2008. - №4. - С.76-82.

174. Bondar, M. P. Dependence of the titanium structure formed under high-rate loading on its initial state / M. P. Bondar, O. L. Pervukhina // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 2000. – Vol. 36 (2). – P. 261-271.
175. Бердыченко, А. А. Структурные изменения титана при образовании сварного соединения сваркой взрывом / А. А. Бердыченко // *Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвузовский сборник научных статей № 3 (41) / ВолгГТУ. Волгоград, 2008. – С. 57–67.*
176. Бердыченко, А. А. Эволюция структуры титана в зоне соединения, полученного сваркой взрывом / А. А. Бердыченко, Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина // *Металловедение и термическая обработка металла*. – 2009. – № 10,– С. 19–24.
177. Berdychenko, A. A. Evolution of titanium structure in the zone of the joint formed by explosive welding /A. A. Berdychenko, L. B. Pervukhin, O. L. Pervukhina *Metal Science and Heat Treatment*. – 2009. – Т. 51., № 9-10. – С. 476-481.
178. Бердыченко, А.А. Влияние газовой среды в сварочном зазоре при сварке взрывом на структуру соединения./ А.А. Бердыченко, О.Л Первухина // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. – 2016. – Т. 21., № 3. – С. 894-896.
179. Berdychenko, A.A. Explosive welding of large-size titanium-steel sheets: influence of ambient gas Berdychenko A.A., Pervukhin L.B., Pervukhina O.L. В сборнике : *Explosive production of new materials: science, technology, business, and innovations X International Symposium on Explosive Production of New Materials: collection of abstracts*. – 2010. – С. 5.
180. Титановые сплавы в машиностроении / Б. Б. Чечулин [и др.]. – Ленинград, Машиностроение, 1977. – 248 с.
181. Цвиккер, У. Титан и его сплавы / У. Цвиккер – М.: Metallurgy, 1979. – 511 с.

182. Горелик, С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов / Горелик С. С. – М.: Металлургия, 1978. – 568 с.
183. Беликова, А.Ф., Локализация деформации при динамических нагрузках /А. Ф. Беликова, С. Н. Буравова, Е. В. Петров//Журнал технической физики. – 2013. Т. 83, вып.8. – С. 68-75.
184. Тонков Ю. П. Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении/ Ю. П. Тонков – М.: Наука, 1979. – 192 с.
185. Бердыченко, А.А. Влияние термической обработки на изменение структуры сварного соединения титан-титан, полученного сваркой взрывом /А.А. Бердыченко //В сборнике: Фундаментальное и прикладное материаловедение Сборник трудов X Международной школы-конференции. 2013. С. 9-15.
186. Бердыченко, А. А. Закономерности изменения структуры сварного соединения, полученного сваркой взрывом, с увеличением его габаритов на примере титана / А. А. Бердыченко, Л. Б. Первухин // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвузовский сборник научных трудов – Волгоград, ВолГТУ, 2000. – С. 102-114.
187. Первухина, О.Л.Исследование влияния ударно-волнового нагружения и термической обработки на процесс измельчения структуры в титане / О.Л. Первухина // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2004. – № 6– С. 86-88.
188. Добрушин, Л. Д. Прецизионная сварка взрывом конструкций / Л. Д. Добрушин // Автоматическая сварка. – 2003. – №4. – С.31-34.
189. Производство биметалла сталь-титан сваркой взрывом и его применение в конструкциях теплообменников атомных энергетических установок /Л.Б. Первухин, С. В. Сериков, И. К. Устинов, О. Л. Первухина // Титан. – 2009. – № 1 (23). – С. 37-40.
190. Исследование структуры и свойств по площади крупногабаритных решеток сталь-титан / О. Л. Первухина, И. А. Счастливая, А. М. Федоров, Л. Б.

- Первухин, Т. А. Шишкин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2017. – №13 (208). – С. 46-54.
191. Tensile strength of weld seam in explociad steel/Ti sheets Pervukhina O.L., Schastlivaya I.A., Fedorov A.M., Pervukhin L.B., Nikolaenko P.A. В сборнике : XIII International Symposium on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business and Innovations 2016. pp. 132-133.
192. Исследование структуры и прочности зоны соединения биметаллов на модельных образцах. Промышленных размеров. О.Л. Первухина, Л.Б. Первухин, Т.А. Шишкин, И.В. Денисов, П.Н. Николаенко, Д.В. Ноняк, А.Ю. Малахов, И.В. Сайков. [Электронный ресурс] // В сборнике ежегодной научной конференции ИСМАН, 2017. URL: <http://www.ism.ac.ru/events/isman30/conf/pdf/Pervukhina.pdf>
193. ТУ 27.81.09.009-2005 «Заготовки двухслойные сталь + титан, полученные сваркой взрывом». Технические условия.
194. Седых, В. С. Расчёт условий оплавления и количества оплавленного металла при сварке взрывом / В. С. Седых, А. П. Соннов // Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 1974. – № 1. – С. 25 – 34.
195. Первухина, О. Л. Влияние термической обработки на структурные изменения биметалла сталь+титан, полученного сваркой взрывом в среде аргона / О. Л. Первухина, Б. А. Ахметова / Сборник материалов VII международная конференция "деформация и разрушение материалов и наноматериалов", Москва, 2017. – С. 191-193.
196. Цыбочкин, С.Г. Сварка взрывом: деформирование и разрушения плакированных изделий / С. Г. Цыбочкин. – Барнаул: Си пресс, 2017.– 116 с.
197. Denisov, I.V. Explosive welding of large-sized sheets: tensile deformation of base sheet / I.V. Denisov, O.L. Pervukhina, L.B. Pervukhin //В сборнике: Shock-assisted materials synthesis and processing: Science, innovations, and industrial implementation.– 2008.– С. 76.
198. Денисов, Игорь Владимирович. Создание многослойных коррозионно-стойких материалов и получение их сваркой взрывом : диссертация ... канди-

дата технических наук : 05.16.09, 05.02.10 / Денисов Игорь Владимирович; [Место защиты: Пенз. гос. ун-т]. - Пенза, 2011. - 215 с. : ил.

199. Компьютерное моделирование деформации составляющих слоёв биметалла в процессе сварки взрывом с использованием программы LS-DYNA / И.В. Денисов, А.Ю. Муйземнек, А.Е. Розен, О.Л. Первухина, Ю.А. Гордополов // Известия Волгоградского государственного технического университета.– 2010.– Т. 4, № 5 (65).– С. 66-74.

200. Deformation of long-length explociad sheets: mathematical modeling / Muizemnek A.Yu., Denisov I.V., Pervukhina O.L., Rozen A.E., Los' I.S., Gordopolov Yu.A. // В сборнике : Explosive production of new materials: science, technology, business, and innovations X International Symposium on Explosive Production of New Materials: collection of abstracts.– 2010.– pp. 45.

201. LS-DYNA. Keyword User's Manual / Volume I, II.– Livermore: LSTC, 2007. – 2206 p.

202. Hallquist, J. O. LS-DYNA Theory Manual /J. O. Hallquist – Livermore: LSTC, 2006.– 680 p.

203. ООО «Битруб Интернэшнл» : офиц. сайт. – Референц лист [Электронный ресурс] URL: <http://www.bitrub.ru/content/view/38/43/>

204. Развитие технологии и производства биметалла сваркой взрывом в Подмосковье / Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина [Электронный ресурс] // Ритм специализированный журнал №2 (50) 2010 С.45-46 <https://ritm-magazine.ru/ru/magazines/2010/ritm-2-50-2010#page-4546>

205. Первухина, О.Л. Влияние температуры на деформацию и разрушение титана в процессе сварки взрывом в краевых зонах / О.Л. Первухина, И.В. Денисов, Т.А. Шишкин //Материаловедение.– 2016.– № 1.– С. 40-44.

206. Pervukhina, O. L. Deformation and damage of ti during explosive welding: effect of ambient temperature / O. L. Pervukhina, I. V. Denisov, T. A. Shishkin // В сборнике : Explosive production of new materials: science, technology, business, and innovations XI International Symposium on Explosive Production of New Materials.– 2012.– pp. 93-94.

207. Бондарь, М. П. Зависимость структуры титана, формирующейся при высокоскоростном нагружении, от его исходного состояния/ М. П. Бондарь, О. Л. Первухина //Физика горения и взрыва. – 2000. – Т. 37, №2. – С. 110-121.
208. Атрощенко, С. А. Локализованная скорость сдвига в откольной зоне при импульсном нагружении металлов/ С. А. Атрощенко, Д. М. Оленин // Физика металлов и металловедение. – 1999. – Т.87, №2. – С. 90-96.
209. Deformation and thermodynamic processes in explosion cladding of cylindrical components with titanium O. L. Pervukhina, I. V. Saikov, L.V. Pervukhin, F.V. Khaidarov // Welding International. – 2012. – Vol 26, №4. – pp. 318-321.
210. Сварка взрывом в среде аргона титана со сталью при изготовлении трубных решёток конденсаторов АЭС (свойства и опыт производства для Ростовской и Балаковской АЭС)/ Первухин Л.Б., Счастливая И.А., Федоров А.М., Первухина О.Л., Шишкин Т.А. // 14 Международная Конференция «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС».
211. Первухин, Л. Б. Развитие технологии и производства биметалла ООО «Битруб Интернэшнл» / Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина, С. Ю. Агауров // Neftegaz.RU. – 2014. – №5. – С. 58-59.
212. Технологические основы и опыт производства крупногабаритного биметалла сваркой взрывом. / Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина, П. А. Николаенко, И. В. Денисов. // Взрыв в физическом эксперименте. Сборник тезисов докладов 16-20 сентября 2013. – С. 211-212.
213. Даниленко, В. А. Особенности детонации крупногабаритных смесевых зарядов / В. А. Даниленко, В. М. Кудинов // Физика горения и взрыва. – 1980. – №5. – С. 56-63.
214. Первухин, Л. Б. К вопросу стабилизации детонации крупногабаритных зарядов низкоскоростных ВВ при сварке взрывом / Л. Б. Первухин //Сварка

взрывом и свойства сварных соединений: сб. науч. тр. Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2000. – С.82-87.

215. Первухин, Л. Б. Особенности взрывчатых веществ для промышленного производства биметаллов сваркой взрывом /Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина //Взрывное дело. – 2009. – № 102-59. – С. 47-57.

216. Беляев, А. Ф. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем./ А. Ф. Беляев М.: Наука, 1968. – 256 с.

217. Литовка, О. Б. Исследование физико-химических и взрывчатых свойств аммиачной селитры и смесей на ее основе дис.... канд. техн. наук: 05.17.07/ Литовка Ольга Борисовна. – М., 2010 - 178 с.

218. Физико-химические и взрывчатые характеристики простейших составов на основе пористой гранулированной аммиачной селитры / О. Б. Литовка, Е. Ю. Чугреева, А. В. Старшинов, Г. Д. Козак // Сб. науч. тр. «Успехи в химии и химической технологии». М.: Изд. центр РХТУ им Д.И. Менделеева. – 2007. – №4. – С. 82-86.

219. Лысак, В. И. Опыт изготовления сваркой взрывом крупногабаритных биметаллических листов с коррозионно-стойким слоем / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин // Известия ВолгГТУ. Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений». Вып. 7 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – № 20 (147). – С. 4-15.

220. Сильченко, Т. Ш. Анализ причин изменения структуры и свойств зоны соединения по длине сваренных взрывом биметаллических заготовок / Т. Ш. Сильченко, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. С. Горобцов, Ю. Г. Долгий // Известия ВолгГТУ. Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений». Вып. 3 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – № 3. – С. 31-38.

221. Пат. 2417868 РФ, МПК В23К20/08, В32В15/01. Способ получения крупногабаритных биметаллических листов сваркой взрывом / Т. Ш. Сильченко, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Ю. Г. Долгий, В. А. Чувичилов, В. В. Юрасов, В. В. Рыбин, И. А. Счастливая, А. Ю. Василенко; ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»; заявл. 27.05.2009; опубл. 10.05.2011.

222. Mixture of porous ammonium nitrate with diesel oil for use in industrial-scale explosive welding / N. A. Denisova, O. L. Pervukhina, L. B. Pervukhin, G. S. Doronin, V. V. Alekseev, G. Kh. Kim В сборнике: Shock-assisted materials synthesis and processing: Science, innovations, and industrial implementation. – 2008. – pp. 77-78.
223. К вопросу о предельных размерах листов, получаемых сваркой взрывом /Л.Б. Первухин, О.Л. Первухина, И.В. Денисов, Т.А. Шишкин, Д.В. Ноняк //Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2016. – № 10 (189) . – С. 76-86.
224. Лысак, В. И. Опыт изготовления сваркой взрывом крупногабаритных биметаллических листов с коррозионно-стойким слоем / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин // Известия ВолгГТУ. Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений». Вып. 7 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – № 20 (147). – С. 4-15.
225. Сильченко, Т. Ш. Анализ причин изменения структуры и свойств зоны соединения по длине сваренных взрывом биметаллических заготовок / Т. Ш. Сильченко, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. С. Горобцов, Ю. Г. Долгий // Известия ВолгГТУ. Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений». Вып. 3 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – № 3. – С. 31-38.
226. Пат. 2417868 РФ, МПК В23К20/08, В32В15/01. Способ получения крупногабаритных биметаллических листов сваркой взрывом / Т. Ш. Сильченко, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Ю. Г. Долгий, В. А. Чувичилов, В. В. Юрасов, В. В. Рыбин, И. А. Счастливая, А. Ю. Василенко; ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»; *заявл.* 27.05.2009; *опубл.* 10.05.2011.
227. Pervukhin, L. B. Experimental evidence for formation of shock plasma during explosive welding / L. B. Pervukhin, O. L. Pervukhina, I.V. Denisov, T. A. Shishkin //В сборнике : XIII International Symposium on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business and Innovations. – 2016. – pp. 129-131.

228. Кирко, В. И. Численное исследование воздействия газового потока на поверхность сталкивающихся пластин / В. И. Кирко, Н. И. Пак., С. Н. Ишуткин, // Физика горения и взрыва. – 1981. – № 1. – С. 151-153.
229. Действие излучения большой мощности на металлы / С. И. Анисимов, Я. А. Имас, Г. С. Романов, Ю. В. Ходыко – М.: Наука, 1970. – 272 с.
230. Рихтер Д.В. Особенности трещинообразования в высокопрочных сталях при сварке биметалла взрывом / Д.В. Рихтер, Л.Б. Первухин, О.Л. Первухина // Ползуновский альманах. 2007. – № 1-2. – С.143-144.
231. Pervukhina, O.L. The specifics of producing steel to brass bimetal using explosion welding / Pervukhina O.L., Denisov I.V. //Advanced Materials and Technologies. 2017. – №3. – pp. 44-46.
232. Опыт производства крупногабаритного биметалла титан-сталь для трубных досок конденсаторов АЭС /Л. Б. Первухин, И. В. Денисов, Т. А. Шишкин, О. Л. Первухина //Известия ВолгГТУ. Серия "Сварка взрывом и свойства сварных соединений" . – 2020. – № 11 (246) . – С.37-40.
233. Пат. 2174458 С2 РФ, МПК В23К 20/08, В32В 7/04 Способ получения крупногабаритных биметаллических листов сталь-титан сваркой взрывом./ В. В. Тетюхин, Л. Б. Первухин, А. А. Бердыченко; С. Г. Цыбочкин, ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» ; заявл. 12.01.2000.; опубл. 10.10.2001.
234. Пат. 2453409 С2 РФ, МПК В23К 20/08, В32В 7/04, Способ получения крупногабаритных листов композиционного материала сваркой взрывом / В. А. Авенян, Н.Н. Ларюшина, А.С. Смирнов, Г.Х. Ким; ОАО "ГосНИИмаш"; заявл. 2010.08.17; опубл. 2012.06.20.
235. Оборудование и трубопроводы атомных энергоустановок. Сварка и наплавка. Основные положения. ПН АЭ Г-7-009-89. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля. ПН АЭ Г-7-010-89. М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 320 с.
236. ПНАЭ Г-7-008-89 Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (с Изменением N 1 от 27.12.1999, с Изменением от 14.08.2006).

237. Соболев, Е. Н. Исследование материала корпуса сосуда давления после эксплуатации/ Е. Н. Соболев, А. Д. Чудновский, Т. Ф. Акулич //Металлургическое производство. М., НИИЭинформэнергомаш. – 1984. – №5 – 84 – 7. – С.27-31.
238. Тестов, И. Н. Эксплуатационная надежность плакированной корпусной стали / И. Н. Тестов, А. Д. Чудновский //Технология машиностроения. М., НИИЭинформэнергомаш. – 1985. №5 – 85 – 3. С.11-14.
239. Чудновский, А. Д. Несущая способность стали плакированной взрывом/ А. Д. Чудновский, А. Н. Дубков, Л. Б. Первухин //Вестник машиностроения. 1975. – №9. – С.26-29.
240. Чудновский, А. Д. Усталостная прочность низколегированной стали, плакированная с применением энергии взрыва /А. Д. Чудновский, С. А. Савельев, А. Н. Дубков //Новые разработки в области сварки давлением в машиностроении: Тр. ЦНИИТМАШ. – 1981. – №161. – С.79-81.
241. Покатаев, Е. П. Основные закономерности образования остаточных напряжений в биметаллических и многослойных соединениях, полученных сваркой взрывом/ Е. П. Покатаев, В. С. Седых, А. Ф. Гончаров // Сварочное производство. – 1981. – №4. – С. 10-12.
242. НП-071-06 Правила оценки соответствия оборудования, комплектующих, материалов и полуфабрикатов, поставляемых на объекты использования атомной энергии. Дата введения 01.07.2007.
243. Газета " Вестник промышленности" Свойства биметаллов, полученных сваркой взрывом - Газета "Вестник промышленности" 27.01.2018 [Электронный ресурс] <https://pronowosti.ru/2018/01/27/svoystva-bimetallov-poluchennyh-svar/>
244. НД 2-020101-095 Правила классификации и постройки морских судов (редакция 2017 года) / 2 020101 095.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ОКП 09 7110
09 7120
09 8131
098002

Группа В23

УТВЕРЖДАЮ
Директор испытательного центра
«ЦНИИТМАШ. Аналитика-Прочность»


М.М. Колосков
2005 г.

**СТАЛЬ ЛИСТОВАЯ ДВУХСЛОЙНАЯ КОРРОЗИОННО-СТОЙКАЯ,
ИЗГОТОВЛЕННАЯ МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ**

**Технические условия
ТУ 27.32.09.010-2005
(впервые)**

Держатель подлинника – ФГУП «ЦНИИТМАШ»

Срок действия с « 05 » 04 2006 г.
~~до « 05 » 04 2010 г.~~

Ограничение срока действия снято
Извещение 1-2011 от 20.12.2011

СОГЛАСОВАНО
Зам. генерального директора
ОАО «ВНИНЕФТЕМАШ»


В.А. Емелькина
« 23 » 11 2005 г.

Генеральный директор
ОАО «Металхиммаш»

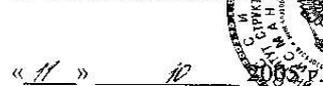

Н.И. Матвеев
2005 г.

РАЗРАБОТАНО:
Генеральный директор ООО
«Институт биметаллических

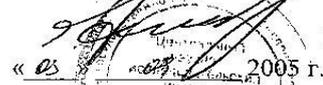

« 14 » 2005 г.

Генеральный директор
ФГУП «ЦНИИТМАШ»
« 15 » 2005 г.

Директор института структурной
макркинетики и проблем материаловедения
Российской Академии наук


« 11 » 10 2005 г.

Директор института качественных сталей
ФГУП ЦНИИТермет им. И.П. Бардина


« 03 » 2005 г.

г. Москва
2005 г.



УТВЕРЖДАЮ

Директор института материаловедения
ОАО "НПО ЦНИИТМАШ"

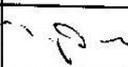
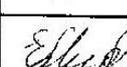

В.Н. Скоробогатых
"20" декабря 2011 г.

ИЗВЕЩЕНИЕ 1-2011

ОБ ИЗМЕНЕНИИ ТУ 27.32.09.010-2005

**СТАЛЬ ЛИСТОВАЯ ДВУХСЛОЙНАЯ КОРРОЗИОННО-СТОЙКАЯ,
ИЗГОТОВЛЕННАЯ МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ**

Подпись и дата			
Инв. № дубл.		СОГЛАСОВАНО	РАЗРАБОТАНО
Взам. инв. №		Генеральный директор Институт биметаллических сплавов <u>письмо № БМ- 409 И.Г. Родионова</u> "19" декабря 2011 г.	Заместитель руководителя испытательного центра "ЦНИИТМАШ – Аналитика- Прочность"
Подпись и дата		Директор ООО "Битруб интернэшнл" <u>письмо № 201 Л.Б. Первухин</u> "19" декабря 2011 г.	 А.Г. Казанцев "15" декабря 2011 г.
Инв. № подл.			

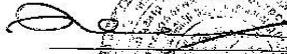
ОАО НПО "ЦНИИТМАШ"	Отдел № 23	ИЗВЕЩЕНИЕ			ОБОЗНАЧЕНИЕ		
		1-2011			ТУ 27.32.09.010-2005		
ДАТА ВЫПУСКА		СРОК ИЗМ.			Лист	Листов	
12.2011					2	2	
ПРИЧИНА		Продление срока действия			КОД	7	
УКАЗАНИЕ О ЗАДЕЛЕ		Не отражается					
УКАЗАНИЕ О ВНЕДРЕНИИ		-					
ПРИМЕНЯЕМОСТЬ		На применяемости не отражается					
РАЗОСЛАТЬ		-					
ПРИЛОЖЕНИЕ		-					
ИЗМ.	СОДЕРЖАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ						
1	<p>Титульный лист:</p> <p>Снято ограничение срока действия.</p> <p>Лист 10. Заменить: ГОСТ 380-94 на ГОСТ 380-2005, ГОСТ 492-73 на ГОСТ 492-2006, ГОСТ 14019-80 на ГОСТ 14019-2003.</p>						
Составил	Фамилия	Подпись	Дата	Н. контр.	Фамилия	Подпись	Дата
Гл. научн. сотр.	Чудновский		12.12.2011		Митина		13.12.2011
ИЗМЕНЕНИЕ ВНЕС							

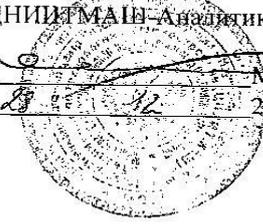
ОКП 09 7110

Группа В 23

УТВЕРЖДАЮ

Директор департаментального центра
«ЦНИИТМАШ-Аналитика-Прочность»


" 28 " 12 2004 г. М.М. Колосков



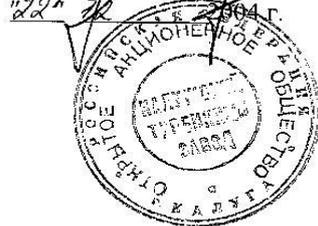
**ЗАГОТОВКИ ДВУХСЛОЙНЫЕ СТАЛЬ+ТИТАН,
ИЗГОТОВЛЕННЫЕ МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ**

**Технические условия
ТУ 27.81.09.009-2005
(впервые)**

Держатель подлинника – ФГУП «ЦНИИТМАШ»

Срок действия с " 25 " 03 2005 г. Ограничение срока действия снято
до " 25 " 03 2008 г. Извещение 1-2011 от 09.01.2012

СОГЛАСОВАНО:
Главный инженер
ОАО «Калужский турбинный завод»
С.Д. Циммерман



РАЗРАБОТАНО:
Генеральный директор
«Институт биметаллических сплавов»
И. Рыбкин

" 24 " 12 2004 г.



Генеральный директор
ФГУП «ЦНИИТМАШ»
С. В. Зубченко

" 21 " 12 2004 г.



Директор института структурной
макроструктурной и проблем материаловедения
Российской Академии наук
Ю.А. Гордополов

" 21 " 12 2004 г.

Одобрены Федеральной службой по
экологическому, технологическому
и атомному надзору
Письмом № 06-07/298 от 24.03.05

Директор института качественных сталей
ФГУП ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина
А. Филиппов

" 23 " 12 2004 г.



г. Москва



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ,
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И
АТОМНОМУ НАДЗОРУ**

109147, Москва, ул. Таганская, д. 34

Телефон: 912-39-11

Телетайп: 111633 "БРИДЕР"

Телефакс: (095) 912-40-41

E-mail: atomnadzor@gan.ru

24.03.05 № 06-07/298
На № 16-30/288АД от 16.03.05

ГО ТУ 27.81.09.009.2005

Генеральному директору
ФГУП «ЦНИИТМАШ»
А.В.Дубу
115088, Москва,
Шарикоподшипниковская, 4

Рассмотрев представленную Вами информацию по обоснованию возможности применения для изготовления оборудования АЭУ двухслойных биметаллических заготовок сталь+титан, изготовленных методом сварки взрывом (исх. №16-30/288АД от 16.03.05), одобряем ТУ 27.81.09.009-2005 «Заготовки двухслойные сталь +титан, изготовленные методом сварки взрывом» в части материалов, допущенных Приложением 9 ПНАЭ Г-7-008-89.

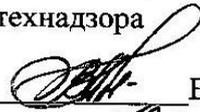
Заместитель начальника Управления по
регулированию безопасности атомных
станций

В.А.Гривизирский

ОДОБРЕНО**УТВЕРЖДАЮ**

Зам. начальника управления по
регулированию безопасности
атомных станций
Ростехнадзора

Директор института материаловедения
ОАО "НПО ЦНИИТМАШ"



В.А. Гривизирский

"16" января 2011 г.



В.Н. Скоробогатых

"20" декабря 2011 г.

ИЗВЕЩЕНИЕ 1-2011

ОБ ИЗМЕНЕНИИ ТУ 27.81.09.009-2005

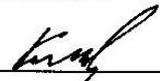
**ЗАГОТОВКИ ДВУХСЛОЙНЫЕ СТАЛЬ-ТИТАН,
ИЗГОТОВЛЕННЫЕ МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ**

СОГЛАСОВАНО**РАЗРАБОТАНО**

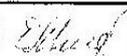
Генеральный директор
Институт биметаллических сплавов
письмо № БМ- 409 И.Г. Родионова
"19" декабря 2011 г.

Заместитель руководителя
испытательного центра
"ЦНИИТМАШ – Аналитика-
Прочность"

Директор ООО
"Битруб интернэшнл"
письмо № 202 Л.Б. Первухин
"19" декабря 2011 г.

 А.Г. Казанцев
"15" декабря 2011 г.

Иинв. № полп.	Подпись и дата
Взам. инв. №	Иинв. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

ОАО НПО "ЦНИИТМАШ"	Отдел № 23	ИЗВЕЩЕНИЕ			ОБОЗНАЧЕНИЕ		
		1-2011			ТУ 27.81.09.009-2005		
ДАТА ВЫПУСКА		СРОК ИЗМ.			Лист	Листов	
12.2011					2	2	
ПРИЧИНА		Пролонгация срока действия			КОД 7		
УКАЗАНИЕ О ЗАДЕЛЕ		Не отражается					
УКАЗАНИЕ О ВНЕДРЕНИИ							
ПРИМЕНЯЕМОСТЬ		На применяемости не отражается					
РАЗОСЛАТЬ							
ПРИЛОЖЕНИЕ							
ИЗМ.	СОДЕРЖАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ						
1	<p>Титульный лист:</p> <p>Снято ограничение срока действия.</p> <p>Лист 10. Заменить: ГОСТ 380-94 на ГОСТ 380-2005, ГОСТ 14019-80 на ГОСТ 14019-2003.</p>						
Составил	Фамилия	Подпись	Дата	Н. контр.	Фамилия	Подпись	Дата
Гл. научн. сотр.	Чудновский		12.12.2011		Митина		13.12.2011
ИЗМЕНЕНИЕ ВНЕС							

Код ОКП 0993 Для АЭС

Группа В33

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ООО «Битруб Интернэшнл»

[Signature] Л.Б. Первухин
» 2014

ИЗВЕЩЕНИЕ 2-2014
ОБ ИЗМЕНЕНИИ ТУ 0993-001-21414987-2012

**Лист стальной двухслойный коррозионно-стойкий,
изготовленный методом сварки взрывом**

Срок введения: 10.12.2014

Держатель подлинника – ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»

СОГЛАСОВАНО:

РАЗРАБОТАНО:

Заместитель генерального директора-
директор по производству и эксплуатации
АЭС
ОАО «Концерн Росэнергоатом»
письмо №9/04/6635

Заместитель директора
ООО «Битруб Интернэшнл»
[Signature] О.Л. Первухина
«22» сентября 2014

А.В. Шутиков
«12» декабря 2014

Генеральный директор
ООО «Химаш-Аппарат»
[Signature] С.Ю. Агауров
«26» сентября 2014

Заместитель генерального конструктора -
начальник отделения конструкционной
целостности
ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»
письмо №044/10-35/17411
С.И. Сероштан
«03» декабря 2014

Заместитель генерального директора-
директор Института материаловедения
ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»
письмо № 04/23-5934BC
В.Н. Скоробогатых
«17» ноября 2014

ОДОБРЕНО:

Управление по регулированию
безопасности атомных станций
и исследовательских ядерных
и установок

письмо №05-03-01/2576

«24» декабря 2014

Подп. и дата	
Инов. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подп. и дата	<i>[Signature]</i>
Инов. № подл.	<i>И-028</i>

		<p>Настоящие технические условия распространяются на лист двухслойный коррозионно-стойкий, полученный методом сварки взрывом, с основным слоем из углеродистой стали марок 22К, 22К-Ш, 22К-ВД и плакирующим слоем из коррозионно-стойкой стали 08Х18Н10Т. Листы предназначены для изготовления гидроёмкости систем аварийной защиты и другого оборудования АЭС.</p> <p>Двухслойные листы изготавливают толщиной от 22 до 140 мм, шириной - от 1000 до 4400 мм, длиной - от 2000 до 12000 мм.</p> <p>Изготовление листов производится с соблюдением ПНАЭ Г-7-008-89 и требований НП-071-06.</p> <p>Пример условного обозначения двухслойного листа толщиной 50 мм, с толщиной коррозионно-стойкого слоя из стали марки 08Х18Н10Т толщиной 4 мм, с основным слоем из стали марки 22К категории 18 по ГОСТ 5520, шириной 1400 мм и длиной 5900 мм, 0 класса сплошности сцепления слоев по ГОСТ 22727:</p> <p style="text-align: center;">50 (46+4) × 1400 × 5900 ТУ 0993-001-21414987-2012</p> <p>ЛИСТ-----</p> <p style="text-align: center;">(22К 18 + 08Х18Н10Т) – кл. 0 ГОСТ 22727</p> <p>1. Технические требования.</p> <p>1.1 Листы двухслойные коррозионно-стойкие, полученные методом сварки взрывом, с основным слоем из углеродистой стали марок 22К, 22К-Ш, 22К-ВД и плакирующим слоем из коррозионно-стойкой стали 08Х18Н10Т должны соответствовать требованиям настоящих технических условий.</p> <p>1.2 В качестве основного слоя применяются листы из стали 22К по ГОСТ 5520 или ТУ 302.02.092 и из стали марок 22К-Ш и 22К-ВД по ТУ302.02.092. В качестве плакирующего слоя применяются листы из стали 08Х18Н10Т по ГОСТ 5582 или ГОСТ 7350.</p> <p>1.3 Размеры листов должны соответствовать требованиям чертежа (заказа) и таблицы 1.</p> <p>Ширина и длина листов плакирующего слоя устанавливается по ширине и длине основного слоя. Допускается перед сваркой взрывом укрупнять листы плакирующего слоя электродуговой сваркой в карты с зачисткой усиления сварного шва.</p>					
	Подп. и дата						
	Инв. № дубл.						
	Взам. инв №						
	Подп. и дата						
	Инв. № подл.						
	2	2	2-2014				
	Изм. Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ТУ 0993-001-21414987-2012		
	Разраб.	Сайков					
	Пров.	Денисов					
	Н. контр.	Капустин					
	Утв.	Первухина					
					Лит.	Лист	Листов
						2	24

Код ОКП 0993 Для АЭС

Группа В33

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ООО «Битруб Интернэшл»

Л.Б. Первухин
Л.Б. Первухин
» 2014

ИЗВЕЩЕНИЕ 2-2014

ОБ ИЗМЕНЕНИИ ТУ 0993-001-21414987-2012

**Лист стальной двухслойный коррозионно-стойкий,
изготовленный методом сварки взрывом**

Срок введения: 10.12.2014

Держатель подлинника – ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»

СОГЛАСОВАНО:

РАЗРАБОТАНО:

Заместитель генерального директора-
директор по производству и эксплуатации
АЭС
ОАО «Концерн Росэнергоатом»
письмо №9/04/6635

Заместитель директора
ООО «Битруб Интернэшл»
О.Л. Первухина
О.Л. Первухина
«22» сентября 2014

А.В. Шутиков
«12» декабря 2014

Генеральный директор
ООО «Химаш-Аппарат»
С.Ю. Агауров
С.Ю. Агауров
«26» сентября 2014

Заместитель генерального конструктора -
начальник отделения конструкционной
целостности
ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»
письмо №044/10-35/17411
С.И. Сероштан
«03» декабря 2014

Заместитель генерального директора-
директор Института материаловедения
ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»
письмо № 04/23-5934BC

В.Н. Скоробогатых
«17» ноября 2014

ОДОБРЕНО:

Управление по регулированию
безопасности атомных станций
и исследовательских ядерных
и установок

письмо №05-03-01/2576

«24» декабря 2014

Подп. и дата	
Инов. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подп. и дата	<i>20.12.2014</i>
Инов. № подл.	<i>И-028</i>

ООО «Битруб Интернэшл»	Технологический отдел	ИЗВЕЩЕНИЕ			ОБОЗНАЧЕНИЕ	
		2-2014			ТУ 0993-001-21414987-2012	
ДАТА ВЫПУСКА		СРОК ИЗМ.			Лист 2	Листов 6
11.2014						
ПРИЧИНА		Требования заказчика			КОД 0993	
УКАЗАНИЕ О ЗАДЕЛЕ		Не отражается				
УКАЗАНИЕ О ВНЕДРЕНИИ		-				
ПРИМЕНЯЕМОСТЬ		На применяемости не отражается				
РАЗОСЛАТЬ		-				
ПРИЛОЖЕНИЕ		Листы 2, 3, 4, 7.				
ИЗМ.	СОДЕРЖАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ – Уточнение требований к допускаемым отклонениям химического состава металла листов и требований к плоскостности листов, предназначенных для вальцовки и горячей штамповки. Введение единых норм УЗК основного, лакирующего слоёв и зоны соединения слоёв, а также нормативных требований при КД сварного соединения лакирующего слоя.					
2	Заменили листы: 2, 3, 4, 7.					
Составил	Сайков	Проверил	Денисов	Н. контр.	Капустин	
ИЗМЕНЕНИЕ ВНЕС:		И.В. Сайков		<i>Вай</i>		

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора

ФКП НИИ «Геодезия» по науке и
испытаниям

А.О. Пизаев

2019 г.



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «Битруб Интернэшнл»

Г.А. Шишкин

2019 г.



АКТ

**освоения промышленных технологий производства сваркой взрывом двухслойных
крупногабаритных листов при совместном производстве ООО «Битруб
Интернэшнл» и ФКП НИИ «Геодезия».**

г. Красноармейск, Московская область

На основании комплекса исследований процесса образования соединения при сварке взрывом, создания технологических основ промышленного производства крупногабаритных двухслойных листов с основой из конструкционных сталей и плакирующего слоя из титана и коррозионностойких сталей, выполненных под научным руководством к.т.н. Первухиной О.Л., разработаны и освоены импортозамещающие современные промышленные технологии круглогодичного производства крупногабаритного биметалла на территории ФКП НИИ «Геодезия» в г. Красноармейске, Московской области:

1. Технология круглогодичного производства двухслойных коррозионностойких листов для изготовления нефтехимического оборудования, которая обеспечила изготовление только в период с 2014 по 2018 гг. свыше 7000 кв.м. высококачественного биметалла, соответствующего требованиям ГОСТ 10885 -85, технических условий ТУ 27.32.09.010-2005 и требованиям заказчика (Таблица 1). При этом площадь листов достигала 26 м² с 100% сплошностью соединения слоёв по 1 классу и прочностью на отрыв и срез не менее 200 МПа. При изготовлении оборудования из этого биметалла не выявлено дефектов и качество биметалла получило высокую оценку потребителей. (Отзыв о сотрудничестве АО «Волгограднефтемаш», Приложение А)
2. Промышленная технология производства крупногабаритных листов титана со сталью сваркой взрывом в среде защитных газов, которая позволяет качественно без дефектов сплошности производить двухслойные листы неограниченных размеров. По этой технологии в период с 2013 по 2019 гг. произведено свыше 200 биметаллических плит марки 09Г2С-13+ВТ1-0 (Grade 1) площадью от 8 до 12 м² с толщиной титана от 5 до 8 мм, качество которых соответствует требованиям технических условий ТУ 5.961-11917-2015 «Плиты биметаллические «сталь – титан», изготовленные методом сварки взрывом» и ТУ 27.81.09.009-2005 «Заготовки двухслойные сталь+титан, изготовленные методом сварки взрывом». В том числе по сплошности соединения 0 класс по ГОСТ 22727-88, по прочности соединения на отрыв и срез более 200 МПа, отклонение от плоскостности не более 2 мм /п.м. Биметаллические плиты поставлены ООО «КомплектЭнерго» из которых на АО «Турбоатом» изготовлены трубные доски для конденсаторов Ростовской и Балаковской АЭС, АО «Калужский турбинный завод» для изготовления трубных досок и ПАО «Силовые машины» для изготовления трубных досок АЭС «Руппур». Двухслойные листы поставлены АО Уралхиммаш и АО Уральский турбинный завод для

изготовления трубных досок конденсаторов атомного ледокола проекта 22220 (Таблица 2). Отзывы предприятий ООО «КомплектЭнерго», АО «Уральский турбинный завод» и АО «Калужский турбинный завод» о высоком качестве биметалла приведены в Приложениях Б-Г. Работы выполнялись при техническом сопровождении НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей».

3. Технология производства биметалла марки 22К +08Х18Н10Т для изготовления емкостей САОЗ АЭС по второму классу безопасности. Произведены и поставлены листы размерами 110(105+5)х4050х4700 мм для изготовления днищ и комплект листов для изготовления 4 корпусов емкостей САОЗ для Нововоронежской АЭС, площадь листов достигала 25 кв. м. (Таблица 2). Работы выполнялись по плану качества под контролем уполномоченных организаций ФГУП ВО «Безопасность» и АО «ВПО «ЗАЭС». Изготовленные листы по всем параметрам соответствовали ТУ 0993-001-21414987-2012 и получили высокую оценку заказчика ООО «КомплектЭнерго» (Приложение Б).

Одновременно разработана, согласована и зарегистрирована в установленном порядке нормативно-техническая документация на производство биметаллов ответственного назначения, в том числе:

- ТУ 27.32.09.010-2005 «Сталь листовая двухслойная коррозионно-стойкая, изготовленная методом сварки взрывом». Технические условия. С изменениями Извещение 1-2011 от 20.12.2011.
- ТУ 27.81.09.009-2005 «Заготовки двухслойные сталь + титан, полученные сваркой взрывом». Технические условия. Одобрены Управлением по регулированию безопасности атомных станций и исследовательских ядерных установок Ростехнадзора. Технические условия. С изменениями Извещение 1-2011 от 20.12.2011.
- ТУ 0993-001-21414987-2012 «Лист стальной двухслойный коррозионно-стойкий, изготовленный методом сварки взрывом». Технические условия. Одобрены Управлением по регулированию безопасности атомных станций и исследовательских ядерных установок Ростехнадзора. Внесены в НП-089-15 приложение №1 к Сводному перечню документов по стандартизации.

Приложение:

1. Таблица 1. Объем производства двухслойных листов в ООО «Битруб Интернэшнл» и ООО «Битруб» для нефтехимического машиностроения в 2014-2018 г.
2. Таблица 2. Результаты производства в ООО «Битруб Интернэшнл» двухслойных листов для АЭС в 2013-2019 г.
3. Приложение А. Отзыв о сотрудничестве АО «Волгограднефтемаш»
4. Приложение Б. О качестве изготовления продукции ООО «КомплектЭнерго»
5. Приложение В. Отзыв о сотрудничестве по поставке биметалла АО «Уральский турбинный завод»
6. Приложение Г. Отзыв о сотрудничестве ОАО «Калужский турбинный завод»

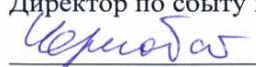
Начальник НИО-1


_____ А.В.Золотухин

Главный инженер, к.т.н,


_____ И.В.Денисов

Директор по сбыту и маркетингу


_____ Ю.П.Чернобай


Волотухин А.В.

Таблица 1. Объём производства двухслойных листов в ООО «Битруб Интернэшнл» и ООО «Битруб» для нефтехимического машиностроения в 2014-2018 г.

№п /п	Марка биметалла Размеры мм	Объём произво дства. шт.	Год	Заказчик	Потребитель
1	09Г2С-12 + 08Х18Н10Т 12(9+3)х2000х3200 20(17+3)х1400х5700 20(17+3)х1400х4000 12(8+4)х1500х6000 12(8+4)х1400х5900 14(10+4)х1400х5900 16(12+4)х1400х5900 11(8+3)х1400х5900 36(30+6)х1950х5000 20(16+4)х1400х5900 15(12+3)х1400х5900	6 3 1 12 3 1 1 1 6 12 1 11	2014	ООО «Институт Биметаллических сплавов» * ООО СЦ «Металл Маркет» * ООО «ПТИМАШ» АО «Бормаш»	АО «Пензахиммаш» ООО «Зенит-Химмаш» ООО «ПТИМАШ» АО «Бормаш»
2	09Г2С(17)+08Х13 36(28+8)х1950х6900 36(28+8)х1950х5900 36(28+8)х1950х1950	1 3 1	2014	ООО СЦ «Металл Маркет» *	ООО «ПТИМАШ»
3	09Г2С+ AISI 316L 20(16+4)х1450х5950 22(18+4)х1450х5950 22(18+4)х1900х5900 21(17+4) х1800х7700	17 6 2 13	2014	ООО «Институт Биметаллических сплавов» *	АО «Пензахиммаш»
4	09Г2С-15+ AISI 321 36(30+6)х1950х5000	12	2014	ОАО «Первомайскхиммаш »	ОАО «Первомайскхиммаш»
5	09Г2С-15+ AISI 321 15(12+3)х1400х5900	12	2014	ООО СЦ «Металл Маркет» *	ООО «Метроком»
6	20К (3)+ AISI 321 40(26+14)х1400х5900	1	2014	ООО СЦ «Металл Маркет» *	ЗАО «ОЗНА- Измерительные системы»
7	09Г2С-12+12Х18Н10Т 13(10+3)х1500х6000 13(10+3)х2000х3200 14(10+4)х1700х2800	23 2 1	2015	ООО НПО «ВТМ»* ООО СЦ «Металл Маркет» *	ООО «Зенит-Химмаш»
8	09Г2С-6+ AISI 316Ti 16(12+4)х1400х5900	5	2015	ООО СЦ «Металл Маркет» *	АО «ВОСТСИБМАШ»
9	09Г2С-17+ AISI 410S 25(21+4)х1900х8100 28(24+4)х2000х9500 30(26+4)х1900х5000 32(28+4)х1700х7100 36(32+4)х1900х11500 12(9+3)х2000х8000 14(11+3)х2000х8000 14(11+3)х1500х6000 12(9+3)х2000х8000 68(60+8)х1100х4300	8 2 1 8 1 3 10 3 1 1	2015	ООО «ПТИМАШ»	ООО «ПТИМАШ»

№п /п	Марка биметалла Размеры мм	Объём произво дства. шт.	Год	Заказчик	Потребитель
10	09Г2С-6 + AISI 316Ti 11(8+3)x1400x4100 13(10+3)x1900x4100	13 3	2015	ООО «ПТИМАШ»	ООО «ПТИМАШ»
11	12ХМ-3+08Х18Н10Т(AISI 321) 16(12+4)x400x2200 25(21+4)x2400x10400 30(26+4)x1400x10400 30(26+4)x1400x4100 32(28+5)x2300x5500 37(32+5)x1800x5000 41(36+5)x1800x6700 25(21+4)x1500x5500 30(26+4)x1500x4100 32(28+4)x1800x6900 36(30+6)x1500x4200 40(34+6)x1700x7000 40(34+6)x1800x4200 45(39+6)x1700x7000	1 4 1 2 1 1 1 6 4 6 1 1 16 4	2015	ООО СЦ «Металл Маркет» * ООО «Институт Биметаллических сплавов» *	АО «Волгограднефтемаш»
12	09Г2С-12+ AISI Тр321 12(9+3)x1600x5500 4(10+4)x1700x600	3 2	2015	ООО «Институт Биметаллических сплавов» *	
13	09Г2С-12+ AISI 316Ti 18(14+4)x2300x6000 18(14+4)x1800x7000 18(14+4)x2000x5000	6 2 1	2015	ООО «Институт Биметаллических сплавов» *	
14	09Г2С-17+ AISI 316Ti 16(13+3)x1500x6000	4	2015	ООО «Институт Биметаллических сплавов» *	
15	09Г2С-17+ AISI 321 18(15+3)x1500x6000 20(17+3)x1850x5100 20(17+3)x2000x6000	3 3 1	2015	ООО «Институт Биметаллических сплавов» *	
16	12ХМ-3+ AISI 321 55(49+6)x1500x4500 60(54+6)x2100x4200 60(54+6)x1900x4000 60(54+6)x1400x5000 60(54+6)x1900x4500	4 1 1 1 2	2016	ООО СЦ «Металл Маркет»*	АО «Волгограднефтемаш»
17	09Г2С-15+ AISI 410S 35(30+5)x1600x9700 14(10+4)x1500x6000 16(12+4)x1500x6000 18(14+4)x1500x6000 24(20+4)x1500x6000 12(8+4)x1500x6000 14(10+4)x1500x6000 18(14+4)x1500x6000 17(12+5)x1500x6000 20(16+4)x1500x6000 17(13+4)x1500x6000 19(15+4)x1500x6000 21(17+4)x1500x6000 23(19+4)x1500x6000	4 10 4 2 2 3 5 22 14 35 18 10 5 33 3	2016	ООО СЦ «Металл Маркет»* ООО НПО «ВТМ» *	АО «Волгограднефтемаш»

№п /п	Марка биметалла Размеры мм	Объём произво дства. шт.	Год	Заказчик	Потребитель
18	09Г2С-12 + AISI 410S 27(22+5)x2000x8000 31(26+5)x2000x7000 14(10+4)x1500x6000 16(12+4)x1500x6000 16(12+4)x1500x3000	11 2 5 2 1	2016	ООО СЦ «Металл Маркет»* ООО «Неватоника»*	ЗАО НПО «НАТЭК- Нефтехиммаш»
19	09Г2С-6+10Х17Н13М3Т 16(12+4)x1500x6000 42(36+6)x1500x6400 42(36+6)x1150x1150	5 4 1	2016	ООО СЦ «Металл Маркет»*	АО «Волгограднефтемаш»
20	12ХМ-18+12Х18Н10Т 14(10+4)x1500x6000 16(12+4)x1000x2000	2 1	2016	ООО «Неватоника»*	
21	09Г2С-12+ AISI 316Ti 20(16+4)x2000x6000 16(12+4)x1500x6000	1 2	2016	ООО «Неватоника»*	
22	09Г2С-12 + AISI 410S 13(10+3)x1450x6000	3	2017	ООО СЦ «Металл Маркет»*	ЗАО НПО «НАТЭК- Нефтехиммаш»
23	09Г2С+ AISI 321 15(12+3)x1250x6000 13(10+3)x1500x6000 24(20+4)x1500x6000 13(10+3)x1500x6000	67 12 4 3	2017	ООО НПО «ВТМ»*	
24	12ХМ-3+АISI 321 39(23+6)x2100x6700 39(33+6)x1500x6000	6 12	2017	ООО «Строй Газ Монтаж» ООО НПО «ВТМ»*	АО «Волгограднефтемаш»
25	12ХМ-16+АISI 321 46(40+6)x1450x6500мм 46(40+6)x1450x6000мм 56(50+6)x1500x7200мм 56(50+6)x1450x6000мм 56(50+6)x1450x7800мм 56(50+6)x2000x7000мм 61(55+6)x1450x9100мм 61(55+6)x2000x8000мм	3 2 4 2 3 2 4 2	2018	ООО ПО «Силур»	Акционерное общество «Рязанская нефтеперерабатывающа я компания»
26	12ХМ-3+АISI 410S 24(20+4)x1700x5500мм 30(25+5)x1800x5500мм 36(30+6)x1400x5600мм	7 1 1	2018	АО «Волгограднефтемаш »	АО «Волгограднефтемаш»
27	12ХМ-3+АISI 321 20(16+4)x1700x5500мм	6	2018	ООО «Строй Газ Монтаж»	АО «Волгограднефтемаш»
28	09Г2С(15)+12Х18Н10Т 17(14+3)x1450x6000мм 19(16+3)x1450x6000мм	9 2	2018	ООО «Нефтегазовые технологии» (в работе)	ООО «Нефтегазовые технологии»
29	12ХМ(3)+08Х18Н10Т 65(62+3)x1450x6000мм 61(58+3)x1450x6000мм	4 15	2018	ООО «Нефтегазовые технологии»	ООО «Нефтегазовые технологии»

* - производство двухслойных листов из давальческого материала

Генеральный директор ООО «Битруб Интернэшнл»  Т.А.Шишкин



Таблица 2. Результаты производства в ООО «Битруб Интернэшнл» двухслойных листов для АЭС в 2013-2019 г.

№ п/п	Марка биметалла Размеры мм	Объём производства		Заказчик	Потребитель	Оборудование АЭС
		шт.	м ²			
1	09Г2С-13+ ВТ1-0 30(25+5)х3200х3600	36	414,72	ООО «Авента»	ОАО «Турбоатом» 2013	Трубные решётки Конденсатора Блок №3 Ростовской АЭС
2	09Г2С-12+ ВТ1-0 30(25+5)х3200х3600	36	414,72	ООО «Комплект Энерго»	ОАО «Турбоатом» 2013	Трубные решётки Конденсатора Блок №4 Ростовской АЭС
3	09Г2С-12+ ВТ1-0 30(25+5)х3200х3600	36	414,72	ООО «Комплект Энерго»	ОАО «Турбоатом» 2014	Трубные решётки Конденсатора Блок №4 Балаковская АЭС
4	09Г2С-12+ ВТ1-0 30(25+5)х3200х3600	36	414,72	ООО «Комплект Энерго»	ОАО «Турбоатом» 2014	Трубные решётки Конденсатора Блок №4 Балаковская АЭС
5	22К+08Х18Н10Т 110(105+5)х4050х4700	8	152	СЦ «Металл Маркет» *	ОАО «АЭМ-технологии» 2015	Днища ёмкостей САОЗ Ленинградской АЭС
6	09Г2С-12+ ВТ1-0 33(25+8)х3150х3200	4	40,32	СЦ «Металл Маркет» *	ОАО «Калужский турбинный завод» 2015	
7	09Г2С-12+ Grade-1 30(25+5)х3200х3600	72	829,44	ООО «Комплект Энерго»	ОАО «Турбоатом» 2015	Трубные решётки Конденсатора Блок №2 Балаковская АЭС
8	22К+08Х18Н10Т 60(55+5)х2500х9900 80(75+5)х2550х4300 80(75+5)х1500х4300	12 8 8	297 87,72 51,6	ООО «Комплект Энерго» 2016		Нововоронежская АЭС
9	09Г2С(13) + ВТ1-0 38(30+8)х2600х2700	8	56,16	СЦ «Металл Маркет» *	ОАО «Калужский турбинный завод» 2017	Трубные решётки АЭС «Кудан Кулам»
10	09Г2С(13)+ВТ1-0 35(30+5)х2900х3450	6	60,06	АО «Уралхиммаш» АО «УТЗ»	АО «Уральский турбинный завод» 2017- 2018	трубная решётка конденсатора атомного ледокола проекта 22220
11	09Г2С-13+ ВТ1-0 60(55+5)х2600х3406	64	575	ПАО «Силовые машины» 2019	ПАО «Силовые машины» 2019	Трубные доски конденсатора АЭС «Руппур»

Генеральный директор ООО «Битруб Интернэшнл»



Т.А.Шишкин



Расчёт экономического эффекта от замены импортного листа, плакированного взрывом на отечественный

Для оценки экономической эффективности от замены импортного листа, плакированного взрывом, на отечественный производства ООО «Битруб Интернэшнл» взята стоимость листового биметалла «сталь + коррозионно-стойкая сталь» и «сталь-титан» в соответствии с коммерческим предложением завода «Dynamic Materials Corporation» во Франции «Нобельклад». Американская компания «Dynamic Materials Corporation» является основным производителем биметалла сваркой взрывом в мире.

Исходные данные для расчёта экономического эффекта

1. **Общий объём производства согласно** Акту «Освоения промышленной технологии производства сваркой взрывом двухслойных крупногабаритных листов при совместном производстве ООО "Битруб Интернэшнл" и ФКП НИИ "Геодезия"» составил:
 - Двухслойные листы «Сталь- коррозионностойкая сталь» 7000,0 м² или 1659 т.
 - Двухслойные плиты «сталь-титан» - 294 шт. или 826 т.
 - Двухслойные листы «Сталь- коррозионностойкая сталь» для АЭС -380 т.
2. **Листы двухслойные «сталь + коррозионно-стойкая сталь»**

Поставка «Nobelclad» (Франция)	Поставка ООО «Битруб Интернэшнл»
Марка: основной слой 8A 516-60, плакирующий слой А 240-316L	Марка: основной слой 12ХМ ГОСТ 5520 плакирующий слой А 240-316L
Условия поставки: Плакирование по методу DETACLAD, SA 264 и спецификации № С 501 издание DMC 100 Взрыватель: в неповрежденной зоне плакирования (приблизительный диаметр дефекта от запала 50 мм). Без термообработки. Лист поставляется без обрезки. При наличии вероятных негарантированных участков, которые вы должны отрезать, они будут обведены краской Технические требования и допуски по толщине, плоскостность, состояние поверхности, маркировка, упаковка по NC 501 Размеры и цены: (26+4)х1880х5830 мм, кол-во 58 шт. Цена в Евро за шт. 28 480,00 или за 1 т 10 962,00 Цена на складе завода производителя без пошлин и налогов	Условия поставки: Плакирование по методу сварка взрывом, технические условия ТУ27.32.09.010-2005 Взрыватель: вне зоны плакирования Лист поставляется с термообработкой, холодной правкой и обрезкой в заданный размер. Технические требования и допуски по толщине, плоскостность, состояние поверхности, маркировка, упаковка по ТУ27.32.09.010-2005 Размеры и цены: (26+4)х1900х6000 мм, кол-во 26 шт. Цена без НДС в руб. за шт. 707 924,00 или 262 000,0 за 1 т. Цена в Евро за шт. 11 040,60 или за 1 т 4 086,00 Принято усредненное годовое значение курса Евро за период с 2013 - 2019 гг. в размере 64,12 руб. Цена на складе завода производителя без НДС

3. Плиты двухслойные «сталь-титан» для трубных досок конденсаторов АЭС

Поставка «Nobelclad» (Франция)	Поставка ООО «Битруб Интернэшнл»
Марка: основной слой 8A 516-60, плакирующий слой Grade-1 ASTM B265-11	Марка: основной слой 09Г2С-12 ГОСТ 5520 плакирующий слой ВТ1-0 ГОСТ 22178
Условия поставки: Плакирование по методу DETACLAD, SA 264 и спецификации № С 501 издание DMC 100 Взрыватель: в неповрежденной зоне плакирования (приблизительный диаметр дефекта от запала 50 мм). Лист поставляется с термообработкой, холодной правкой и обрезкой в заданный размер. Технические требования и допуски по толщине, плоскостность, состояние поверхности, маркировка, упаковка по NC 501 Размеры и цены: (25+5)х3200х3600 мм, кол-во 36 шт. Цена в Евро за шт. 32 916,00 или за 1 т 12 990,00 Цена на складе завода производителя без пошлин и налогов	Условия поставки: Плакирование по методу сварка взрывом, технические условия ТУ 5.961-11917-2007 Взрыватель: вне зоны плакирования Лист поставляется с термообработкой, холодной правкой и обрезкой в заданный размер. Технические требования и допуски по толщине, плоскостность, состояние поверхности, маркировка, упаковка по ТУ 5.961-11917-2007 Размеры и цены: (25+5)х3200х3600 мм, кол-во 36 шт. Цена без НДС в руб. за шт. 1 348 088,00 или 532 000,0 за 1 т. Цена в Евро за шт. 21 024,45 или за 1 т 8297,00 Принято усредненное годовое значение курса Евро за период с 2013-2019 гг. в размере 64,12 руб. Цена на складе завода производителя без НДС

Расчёт экономического эффекта. В расчёте принято усредненное годовое значение курса Евро за период с 2013-2019 гг, в сумме 64,12 руб.

Марка биметалла	Объём производства, т	Nobelclad Цена за 1 т Евро	«Битруб Интернэшнл» Цена за 1 т Евро	Экономический эффект Евро/ руб.
Листы двухслойные «сталь + коррозионно-стойкая сталь»	1 659,0	10 962,00	4 086,00	11 407 284,00/ 731 435 050,08
Плиты двухслойные «Сталь-титан»	826,0	12 990,00	8 297,00	3 876 418,00/ 248 555 922,16
Листы двухслойные «сталь + коррозионно-стойкая сталь»	380,0	10 962,00	4 086,00	2 612 880,00/ 167 537 865,6
Суммарный экономический эффект за период с 2013 - 2019 гг. составил				17 896 582,00/ 1 147 528 837,84

Таким образом, годовой экономический эффект от замены импортного листа, плакированного взрывом, на отечественный, произведенный ООО «Битруб Интернэшнл» за семь лет в период с 2013-2019 гг., составляет $1\,147\,528\,837,84:7 = 163\,932\,691,00$ (Сто шестьдесят три миллиона девятьсот тридцать две тысячи шестьсот девяносто один) руб.

Директор по сбыту и маркетингу



Ю.П. Чернобай

Бухгалтер



М.А. Гусева



ОАО "ВОЛГОГРАДНЕФТЕМАШ"

Электролесовская ул., 45, Волгоград, 400011
 Тел. (8442) 41-02-20, факс (8442) 416-416, 407-333
 E-mail: office@vnm.ru
 ОКПО 00217610 ОГРН 1023404238384
 ИНН/КПП 3446003396/345250001

08.08.2014 № 359/1923

на № _____ от _____ **ОТЗЫВ О СОТРУДНИЧЕСТВЕ**

ООО «Битруб Интернэшнл» является производителем двухслойных листов, сотрудничает с ОАО «Волгограднефтемаш», через ООО «СТРОЙГАЗМОНТАЖ» с 2015 года. ООО «Битруб Интернэшнл» производит двухслойные листы различных марок и форматов изготовленных методом сварки взрывом.

За период с 2015 года по 2017 год ООО «Битруб Интернэшнл» изготовил и поставил, для ОАО «Волгограднефтемаш» двухслойные листы марок 09Г2С(17) + 410S, 09Г2С(17) + AISI 316Ti, 12ХМ(3) + AISI 321, 09Г2С(17) + AISI 304L, общим весом 192,06тн.

Все заказы исполняются в полном объеме, с надлежащим качеством и в установленные сроки. Предприятие обладает всей требуемой для проведения работ техникой и оборудованием. Работы ведутся квалифицированным персоналом, обученным всем необходимым видам работ, и имеют необходимую для этих работ аттестацию.

Наличие и соответствие квалифицированного персонала подтверждается надежным и качественным исполнением заказов.

За весь период сотрудничества предприятие ООО «Битруб Интернэшнл» показало себя надежным производителем двухслойных листов, способным исполнять сложные и нестандартные заказы в согласованные сроки с надлежащим качеством.

Начальник СМТО

А.С. Павленко

062680



СИЛУР
ГРУППА КОМПАНИЙ

Общество с ограниченной
ответственностью «Силур»
624000 Свердловская область,
Сысертский район, г. Арамилы, пер. Речной, д.1Г
ИНН 6672280040, КПП 667201001, ОКПО 85420077
т./ф. (343) 385-32-25 (26), e-mail: silur@silur.ru

Исх. № 1940-НГО
от 14.09.2018г.

Генеральному директору
ООО «Битруб Интернэшнл»
Л.Б. Перухину

Отзыв о поставке

Уважаемый Леонид Борисович!

В первом квартале 2018 года ООО «Битруб Интернэшнл» по заказу ООО «Силур» изготовило методом сварки взрывом и произвело поставку двухслойных листов марки 12ХМ(16) + AISI 321 общим объемом 109,44 тн. для изготовления корпусов реакторов Р-1-4 установки ЛГ-35-8/300Б (АО «РНПК»).

Поставка произведена в рамках договорных сроков, в полном объеме. Качество двухслойных листов соответствует ГОСТ 10885-85 и техническому заданию Заказчика, что подтверждено результатами испытаний и сертификатами на материал.

При решении технических вопросов в рамках поставки сотрудники ООО «Битруб Интернэшнл» зарекомендовали себя как компетентные специалисты, обладающие значительным опытом в данной сфере.

Таким образом, ООО «Битруб Интернэшнл» может быть рекомендовано в качестве производителя двухслойных листов, соответствующих требованиям машиностроения в нефтехимической отрасли.

С уважением,

Заместитель директора
Департамента НХО

В.С. Семёнов



КомплектЭнерго

ООО "КомплектЭнерго" 127247, Москва, Бескудниковский бульвар 46, корп. 3, Тел: (495) 641 0274 Факс: (495) 641 0273 E-mail: komplektenergo@kegroup.ru

Исх. № 1234 от 14 августа 2015 г.

Директору
ООО «Битруб Интернешнл»
Г-ну Первухину Л.Б.
E-mail: bitrub@mail.ru

О качестве изготовленной продукции

Уважаемый Леонид Борисович!

Для изготовления наружных трубных решёток конденсаторов «блочно-модульного» исполнения турбоустановок К-1000-60/1500-2 Ростовской и Балаковской АЭС, ООО «Битруб Интернешнл» в период с 2012 по 2015 гг. по заказу ООО «КомплектЭнерго» были изготовлены двухслойные листы сталь-титан размерами 30(25+5)х3200х3600 мм:

1. в 2012 г. по договору № 97/БТ/2012 от 21.05.2012г. -36 листов марки 09Г2С+ВТ1-0 для трубных решёток конденсатора Блок №4 Ростовской АЭС;
2. в 2013 г. по договору № 158/БТ/2013 от 29.04.2013г.-36 листов марки 09Г2С+ВТ1-0 для трубных решёток конденсатора Блок №1 Балаковской АЭС;
3. в 2014 г. по договору № 3/БТ/2014 от 17.01.2014г.-36 листов марки 09Г2С-12+ Grade-1 для трубных решёток конденсатора Блок №2 Балаковской АЭС;
4. в 2015 г. по договору № 248/БТ/2013 от 18.09.2014 г.-36 листов марки 09Г2С-12+ Grade-1 для трубных решёток конденсатора Блок №3 Балаковской АЭС;

Двухслойные листы поставлены после термической обработки и по качеству соответствовали требованиям ТУ5.961-11917-2007 "Плиты биметаллические "сталь-титан": сплошность соединения по данным ультразвукового контроля - 100%, прочность соединения на отрыв и срез плакирующего слоя более 150 МПа, отклонение от плоскостности поверхности не более 2 мм на площади 1000 x 1000 мм, шероховатость поверхности титана Ra = 3,2 мкм. Высокое качество двухслойных листов подтверждено материаловедческой организацией ФГУП ЦНИИ КМ "Прометей".

Входной контроль двухслойных листов на заводе-изготовителе конденсаторов (ОАО "Турбоатом", Украина, г. Харьков), не выявил отклонений от требований ТУ5.961-11917-2007. Конденсаторы с двухслойными наружными трубными решётками изготовлены и отгружены на Ростовскую и Балаковскую АЭС.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что технология и производство ООО "Битруб Интернешнл" обеспечивают изготовление методом сварки взрывом высококачественных двухслойных листов сталь-титан, отвечающих современным требованиям к материалам для производства оборудования АЭС.

С уважением,

Технический директор

Исп. Старков Владимир
Т. +7(495)641-02-74 (доб. 109)
Моб. +7-916-112-14-63

С.Р. Мамонтов



**УРАЛЬСКИЙ
ТУРБИННЫЙ
ЗАВОД**

Акционерное общество
"Уральский турбинный завод"
620017, г. Екатеринбург, ул. Фронтовых бригад, 18,
ОАО "Меткомбанк" г. Каменск-Уральский БИК 046577881
р/с 40702810413000001749 к/с 30101810500000000881
ИНН 6673100680 КПП 660850001
Тел. (343) 300-13-48, факс. (343) 300-14-60,
mail@utz.ru, www.utz.ru

Генеральному директору
ООО «Битруб Интернэшнл»
Л.Б. Первухину

От 05.03.2018 исх. № ЗГДП/97

**ОТЗЫВ О СОТРУДНИЧЕСТВЕ
ПО ПОСТАВКЕ БИМЕТАЛЛА**

09Г2С(13)+ВТ1-0 по ТУ 5.961-11917-2015

В 2017 году предприятие ООО «Битруб Интернэшнл» по заказу АО «Уральский турбинный завод» изготавливало методом сварки взрывом в сжатые сроки двухслойные заготовки марки 09Г2С(13)+ВТ1-0 размерами 35(30+5)x2800x3450мм, в количестве 4 штук, для трубных решёток конденсаторов.

Ответственный заказ выполнен досрочно, в полном объеме. Качество двухслойных заготовок соответствует ТУ 5.961-11917-2015 (держатель ТУ ФГУП ЦНИИ КМ Прометей) и требованиям "Правил классификации и постройки морских судов" РМРС, что было подтверждено испытаниями в аттестованной РМРС лаборатории АО "Калужский турбинный завод" и освидетельствовано РМРС, свидетельство № 18.90055.120 от 16.02.2018 по форме 6.5.30. Результаты испытаний подтвердили соответствие сплошности соединения 0 классу по ГОСТ 22727.

Таким образом, ООО «Битруб Интернэшнл» показало себя надежным производителем двухслойных листов, способным исполнять сложные и нестандартные заказы как изготовитель (свидетельство №17.21449.12 от 28.12.2017г) в согласованные сроки и в соответствии с требованиями ГУ РМРС РФ.

С уважением,
Заместитель генерального
директора по производству

А.А.Козырев



КАЛУЖСКИЙ ТУРБИННЫЙ ЗАВОД

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

Сертифицировано
Русским Регистром

Российская Федерация, 248010, г. Калуга, ул. Московская, 241

Телефон: (4842) 76-70-54

Факс: (4842) 56-22-90

«10» 08 2017 г. № 50/16

На № _____ от «_» _____ 20 г.

Генеральному директору
ООО «Битруб Интернэшнл»
Л.Б. Первухину

ОТЗЫВ О СОТРУДНИЧЕСТВЕ

ООО «Битруб Интернэшнл» поставляет двухслойные листы в адрес ОАО «Калужский турбинный завод» с 2007 года по настоящее время.

За период сотрудничества с 2013 года по 2017 год ООО «Битруб Интернэшнл» изготовил и поставил в адрес ОАО «Калужский турбинный завод» следующие двухслойные листы:

№	Через кого	Год пост-ки	Номенклатура биметалла	Кол-во, тн
1	ООО «СЦ Металл Маркет»	2013	Биметалл: 09Г2С+08Х18Н10Т 68(60+8)х1000х1000 - 6 шт	3 тонны
2	ООО «СЦ Металл Маркет»	2014	Биметалл: 09Г2С+ВТ1-0 33(25+8)х3150х3200 - 4 шт	10 тонн
3	ООО «СЦ Металл Маркет»	2015	Биметалл: 20К(18)+08Х18Н10Т 68(60+8)х1050х1050 - 4 шт	4 тонны
4	ООО «СЦ Металл Маркет»	2017	Биметалл: 09Г2С(13)+ВТ1-0 38(30+8)х2600х2700 - 8 шт (ТУ 5.961-11917-2015), для АЭС	15,40 тонн

Все заказы были исполнены в полном объеме, с надлежащим качеством и в установленные сроки. Предприятие обладает всей требуемой для проведения работ техникой, оборудованием, технической компетенцией для производства двухслойных листов, как для нефтехимической, так и для атомной отраслей промышленности. Работы ведутся квалифицированным персоналом, обученным всем необходимым видам работ, и имеют необходимую для этих работ аттестацию.

Наличие и соответствие квалифицированного персонала подтверждается надежным и качественным исполнением заказов.

За весь период сотрудничества предприятие ООО «Битруб Интернэшнл» показало себя надежным производителем двухслойных листов, способным исполнять сложные и нестандартные заказы в согласованные сроки с надлежащим качеством.

Технический директор

Л.А. Мамонов

Исп. Карабахин Г.Ю.
Тел. 59-17-50