

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

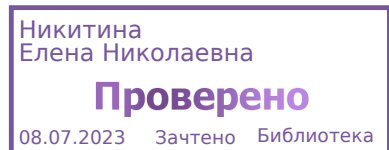
Старничук Екатерина Павловна

**Исследование влияния траектории движения источника питания на структуру и свойства сварочного соединения**

Направление подготовки

15.04.01 «Машиностроение»

АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ



2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» на кафедре «Технология сварочного и металлургического производства имени В.И. Муравьева»

**Научный руководитель**

кандидат технических наук, доцент  
**Клешнина Оксана Николаевна**

**Научный консультант**

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Технология  
сварочного и металлургического  
производства»  
**Бахматов Павел Вячеславович**

**Рецензент**

кандидат технических наук, доцент,  
ведущий научный сотрудник ИМиМ  
ДВО РАН обособленное подразделение  
ХФИЦ ДВО РАН  
**Жилин Сергей Геннадьевич**

Защита диссертации состоится «23» июня 2023 г. в 08:30 часов на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, учебный корпус 2, аудитория 221.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <https://knastu.ru/page/1519> и на кафедре «Технология сварочного и металлургического производства» ФГБОУ ВО «КНАГУ».

Секретарь ГЭК,  
к.т.н., доцент

О.Н. Клешнина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Проведение исследований влияния осцилляции параметров режима импульсной аргонодуговой сварки (траектории движения, следовательно, скорости сварки скорости нарастания импульса движения, времени паузы, силы тока, скорости нарастания и спада импульса тока, амплитуды и времени импульса) на структуру и свойства сварных соединений является актуальной задачей в современной промышленности, где требуется высокое качество сварных соединений и повышенная производительность при сварке тонкостенных материалов. Использование импульсной технологии позволяет управлять термическим циклом сварки при дозированном вводе тепловой энергии, а при роботизации процесса назначать конкретный режим сварки в каждую точку траектории движения дуги, проводить локальную термообработку кристаллизующегося металла шва применяя двойной импульс, тем самым управлять структурой и свойствами металла шва по уровню близким к основному металлу. Кроме того это дает возможность снизить количество дефектов, улучшить качество сварных соединений, а также сократить время на процесс сварки. Эта технология находит широкое применение в автомобильной, судостроительной, аэрокосмической и других отраслях машиностроения. Поэтому изучение траекторий импульсной аргонодуговой сварки и их оптимизация являются важными задачами для повышения эффективности производства и улучшения качества сварных соединений.

Исследования по осцилляции режимов сварки расширяют область теоретических знаний, позволяют унифицировать требования к траекториям и энергозатратам в сварочную дугу, достаточного для плавления основного и присадочного материала и минимизирующего остаточные напряжения. Поэтому исследование траекторий сварочной дуги при формировании сварного шва является весьма актуальной.

В работе рассматриваются различные виды траекторий сварочной горелки на установке автоматической сварки тел вращения с многокоординатным управлением перемещения горелки, импульсной подачей проволоки.

Решение этих вопросов позволит снизить порообразование и послужит достижению равнопрочности сварного соединения с основным металлом, а также поспособствует в ряде проведенных научных исследований в области влияния техники и технологии формирования сварных швов на качество и экономическую эффективность создания соединений и, безусловно, требует сотрудничества специалистов различных отраслей науки и техники: сварки, электроники, материаловедения и др.

**Цель работы:** исследование влияния параметров роботизированной аргонодуговой сварки пульсирующей дугой без применения присадочных материалов на структуру и свойства полученных сварных соединений тонкостенных труб из аустенитной стали.

Для реализации цели работы поставлены следующие задачи:

- используя роботизированную сварочную систему и управляющие программы сварки пульсирующей дугой получить сварные соединения тонкостенных труб из аустенитной стали;
- провести исследование микроструктуры и определение свойств сварных соединений;
- установить зависимости влияния параметров сварки пульсирующей дугой на структуру и свойства сварных соединений.

**Объект исследования** – стыковые сварные соединения тонкостенных труб из аустенитной стали, полученные роботизированной аргонодуговой сваркой пульсирующей дугой без подачи сварочной проволоки.

**Предмет исследования** – изменение микроструктуры и механических свойств сварных соединений в зависимости от параметров режима сварки и защитной среды поддува.

**Научная новизна:**

- установлено влияние параметров режима роботизированной бесприсадочной аргонодуговой сварки пульсирующей дугой тонкостенных труб из аустенитной стали с различной защитной средой поддува (воздух, аргон, азот).

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов основывается на использовании поверенного комплекса контрольно-измерительного оборудования для проведения экспериментальных исследований, использованием нормированных методик определения физико-механических свойств и макро- и микроструктурных параметров.

**Практическая значимость.**

- показана целесообразность применения в качестве поддува азота, способствующего повышению предела прочности и относительного удлинения, получению эстетически лучшего качества корневой части валика.

- установлены режимы роботизированной сварки пульсирующей дугой, позволяющие получать мелкозернистую структуру металла шва и околошовной зоны.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических мероприятиях: Международной научно-практической конференции «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению». Секция Прогрессивные технологии и процессы в машиностроении» (ФГБОУ ВО «КнАГУ», г. Комсомольск-на-Амуре, февраль 2022г.); V Всероссийской национальной научной конференции молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований». Секция Машиностроение и металлургия (ФГБОУ ВО «КнАГУ», г. Комсомольск-на-Амуре, апрель 2022г.); II Международной научно-практической конференции молодых ученых «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению» (ФГБОУ ВО «КнАГУ» г. Комсомольск-на-Амуре, ноябрь 2022г.)

**Личный вклад автора.** Соискатель активно участвовал в процессе отработки режимов сварки, исследовании микроструктуры и механических испытаниях сварных образцов, а также в написании и публикации полученных научных результатов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- результаты исследования структуры и механических испытаний сварных соединений, полученных на роботизированной системе аргонодуговой сварки пульсирующей дугой тонкостенных труб

**Публикации результатов исследований:** По материалам диссертационной работы опубликовано 4 печатных работ в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы:**

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы и 6 приложений. Работа изложена на 113 страницах машинописного текста (включая приложения), содержит 26 таблиц, 32 рисунка, список литературы из 87 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, объект и предмет, сформулированы цели и задачи работы, используемые методы исследования, показана научная новизна.

В первой главе представлен литературный обзор и анализ роли в исследовании импульсной сварки.

Во второй главе рассмотрены используемое оборудование, интерфейс приложения генерирующее управляющий G-код под конкретную траекторию перемещения сварочной головки. Спроектированная установка позволяет сваривать трубные заготовки в автоматическом режиме по заранее составленной программе с неограниченным количеством проходов и неограниченным количеством траекторий.

Приложение позволяет выполнять сварку с любой траекторией перемещения сварочной горелки, рекомендованной для сварщиков. Интерфейс разрабатываемого приложения (рис. 1) с возможными траекториями для выполнения сварного соединения (рис. 2, 3, 4).

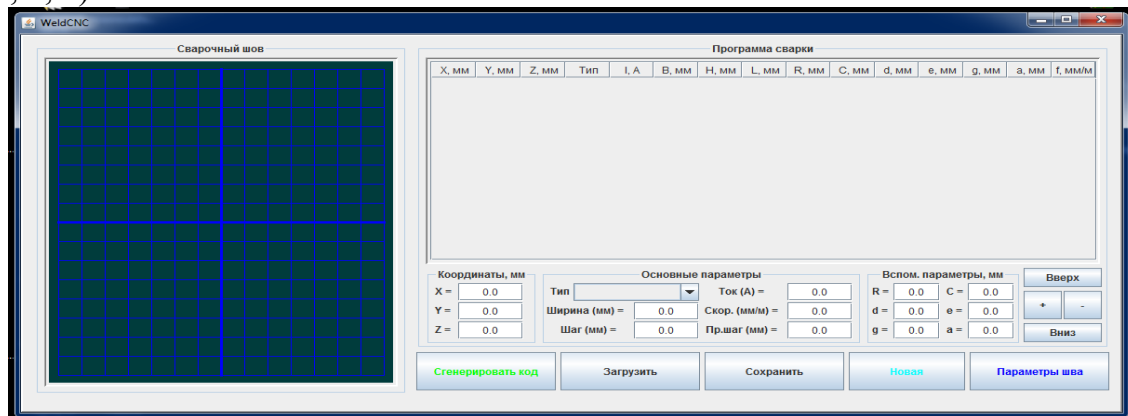


Рисунок 1 – Интерфейс разрабатываемого приложения

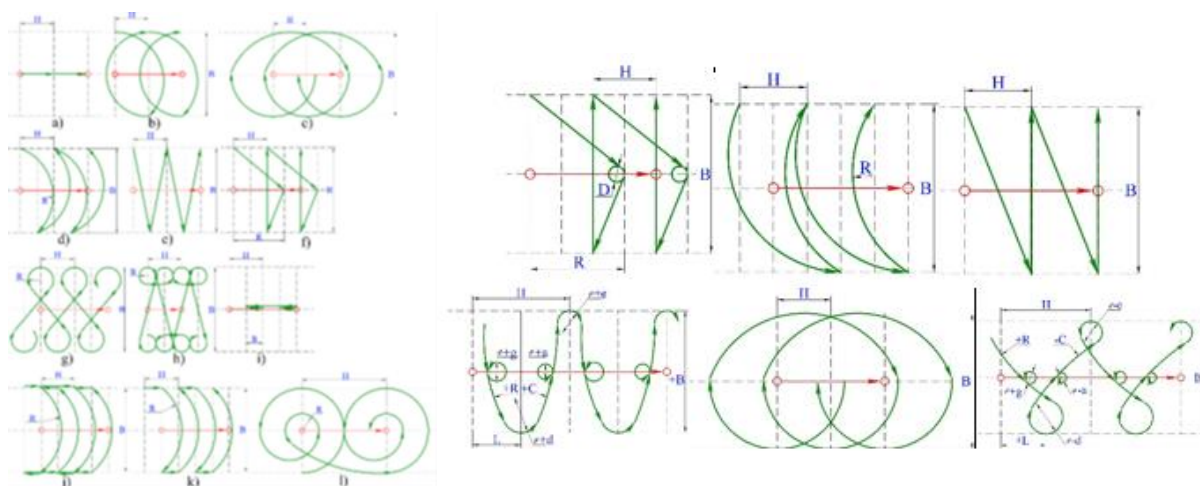


Рисунок 2 – Траектории движения сварочной горелки.

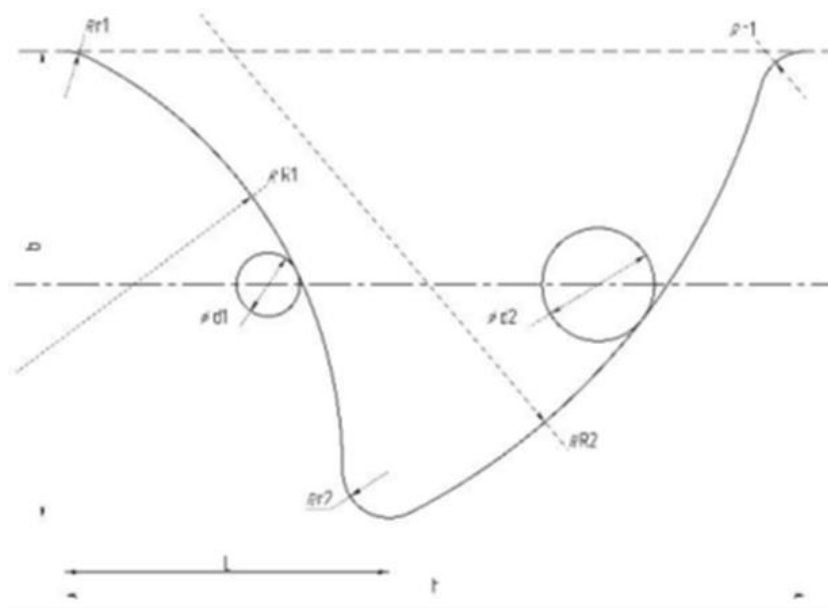


Рисунок 3 – Двухступенчатое перемещение сварочной горелки алгоритм.

Алгоритмически процедура построения требуемой траектории заключается в определении точек переходов (касаний) аппроксимирующих окружностей и их радиусов. Расположение точек осей X Y Z может исходить из любых координат. Упрощая тем самым работу сварщика для установки выставления заготовки на нулевые координаты осей (рис. 4).

```
X100 Y0 Z0 H10 B10 R4 F500 I120 T15 U15
X100 Y0 Z0 H10 B10 R4 F500 I120 T12 U15
X100 Y0 Z0 H5 B10 R4 F500 I120 T12 U15
```

Рисунок 4 – Параметры и координаты траектории сварочной горелки

где X, Y, Z – текущие координаты точки;

X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>, Z<sub>0</sub> – исходные координаты точки;

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  - углы поворота оси шва относительно системы координат.

Для траектории шва также используются косинус и синус угла поворота, чтобы на выходе получить окружность (рис. 5).

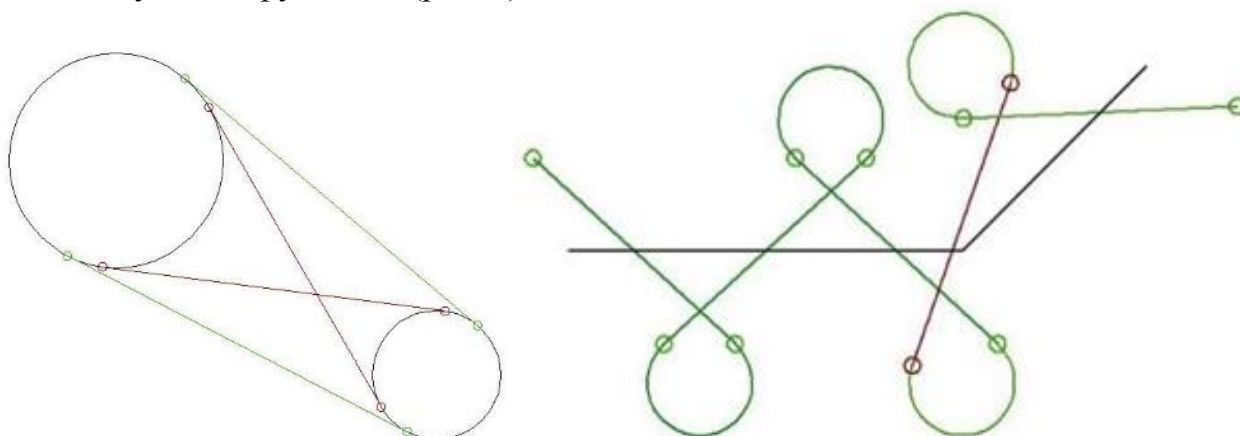


Рисунок 5 – Варианты построений окружностей

Для того чтобы программа могла генерировать с различными системами используется необходимый набор команд управления (рис.6).

```

M00 - ПРОГРАММА СТОП
S60 - ЗНАЧЕНИЕ СВАР ТОКА 60А
M03 - ВКЛЮЧИТЬ ТОК
G04 - P3 - ПАУЗА 3СЕК
M08 - ВКЛЮЧЕНИЕ ПОДАЧИ ПРОВОЛОКИ
F100 - ЗНАЧЕНИЕ СКОРОСТИ ГОРЕЛКИ, КОЛЕБАНИЙ ММ/МИН
G91 - ПЕРЕХОД К ОТНОСИТЕЛЬНЫМ КООРДИНАТАМ
M98 - P100 L60 - ВЫЗОВ ПОДПРОГРАММЫ №100 60 РАЗ
M05 - ОТКЛЮЧЕНИЕ СВАРОЧНОГО ТОКА
M09 - ОТКЛЮЧЕНИЕ ПОДАЧИ ПРОВОЛОКИ
M30 - КОНЕЦ ПРОГРАММЫ
O100 - ПОДПРОГРАММА №100
G01 - X-0.5 Y0.5 - ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ПО ПРЯМОЙ ПО КООРДИНАТАМ
S100 - ТОК 100А
G01 X-0.5 Y-0.5
M99 - КОНЕЦ ПОДПРОГРАММЫ
M02 - КОНЕЦ ПРОГРАММЫ

```

Рисунок 6 – Команды управления программой

Выпускаемый сварочный аппарат и сварочное программное обеспечение позволяют выполнять сварку поворотным способом различной сложности соединения в автоматическом режиме. Разработанный сварочный аппарат может быть эффективно использован для отработки режимы сварки. Также сварочный аппарат можно использовать в научных целях для изучения влияния различных сварочных факторов на качество сварного соединения. Это обеспечивает высокую степень повторяемость условий сварки.

Благодаря применению стандартизированной системы управления ISO 6983-1:2009 сварочный аппарат может управляться большим количеством систем управления ЧПУ. Результаты работы режимов сварки out может быть перенесен на другие сварочные аппараты и роботы-манипуляторы. Разработанная сварка программное обеспечение для управления траекторией движения резака может быть интегрировано в существующие CAD-системы.

#### Преимущества и недостатки

Технология имеет ряд преимуществ перед другими видами сварки, что объясняет ее популярность:

- Минимизация человеческого фактора за счет полной автоматизации процесса.

- Высокое качество и надежность шва.

- Сварку можно использовать при любом диаметре труб.

- Соединение деталей происходит на 360° в любом положении.

Как и в любом процессе, помимо положительных аспектов, существует ряд отрицательных сторон:

- Дорогостоящая узкоспециализированная технология.

- Настройка оборудования занимает много времени и требует специального обучения операторов.

- Не подходит для мелкого ремонта.

**В третьей главе** представлены результаты методики испытания и исследования образцов.

Сварка образцов проводилась на разработанном оборудовании. В качестве образцов использовались три патрубка из хромоникелевой нержавеющей стали 12X18H10T диаметром 50мм, толщиной 1мм и длиной 100 мм. В качестве источника питания использовался сварочный аппарат Kemppi MinarcTig Evo 200 и горелка КЕМРПИТС2204М. В качестве защитного газа использовался аргон высшего сорта по ГОСТ 10157-2016, азот по ГОСТ 10157-2016, без активного газа, диаметр вольфрамового электрода WC20 - 2мм; тип соединения С2 по ГОСТ 16037-80



(рисунок 3.1). Положение оси вольфрамового электрода в горелке перпендикулярно оси сварки. Сварка ведется с одной стороны и одним проходом в нижнем положении. Зазор между дугами 2,5–3,0 мм. Облицовочные валики с перекрывающимся боковым перемещением горелки без подачи проволоки.

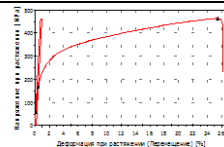
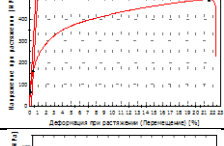
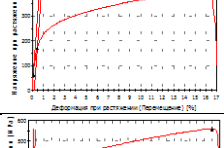
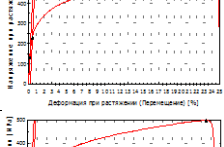
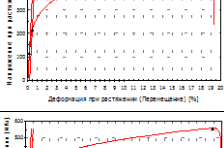
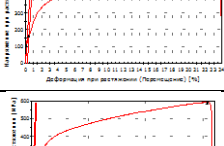
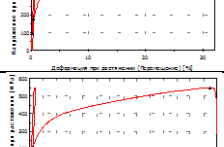
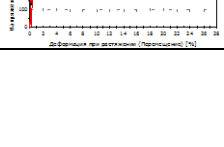
Полученные образцы подвергли следующим видам исследований и испытаний:

- визуально-измерительный контроль;
- исследование микроструктуры поперечного сечения шва;
- исследование образцов на микротвердость;
- исследование на спектральный анализ.

В соответствии с РД03-606-03 был проведен визуальный контроль с помощью универсального шаблона сварщика УШС-3 на соответствие размеров шва требованиям ГОСТ 16037-80 сварное соединение по типу С2 на наличие внешних дефектов, регламентированных СТ ЦКБА 025-2006 и ГОСТ 32569-2013.

Результаты механических испытаний представлены в табл. 1 из которой видно, что разрушение всех образцов произошло по линии сплавления. Причиной такого явления может служить ослабление шва переходом структурной составляющей.

Таблица 1 – Результаты механических испытаний сварных образцов

Образец	Модуль, МПа	Условный предел текучести, МПа	Предел пропорциональности, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Диаграмма растяжения
1	2	3	4	5	6	7
1.2.2	58297	169,5	59,0	465,5	25,4	
1.3.2	66048	164,4	67,1	491,3	21,6	
1.4.2	60222	171,1	62,4	397,8	16,0	
2.2.2	81145	230,6	129,2	560,2	24,0	
2.3.2	79599	217,2	115,1	498,0	18,5	
3.2.2	77566	161,5	101,7	556,7	22,9	
3.3.2	78574	182,3	99,2	592,5	30,7	
3.4.2	82400	208,3	131,5	550,0	27,0	



Распределение микротвердости в поперечном сечении сварных образцов показано на рис.7. Характерным является общее снижение микротвердости в металле шва до 140 от 180 HV основного металла, сохранение этого значения в области линии сплавления и зоны крупного зерна и резкое возрастание в зоне среднего зерна. Наиболее стабильное распределение микротвердости в металле шва наблюдается в сварном соединении, выполненном с поддувом аргоном.

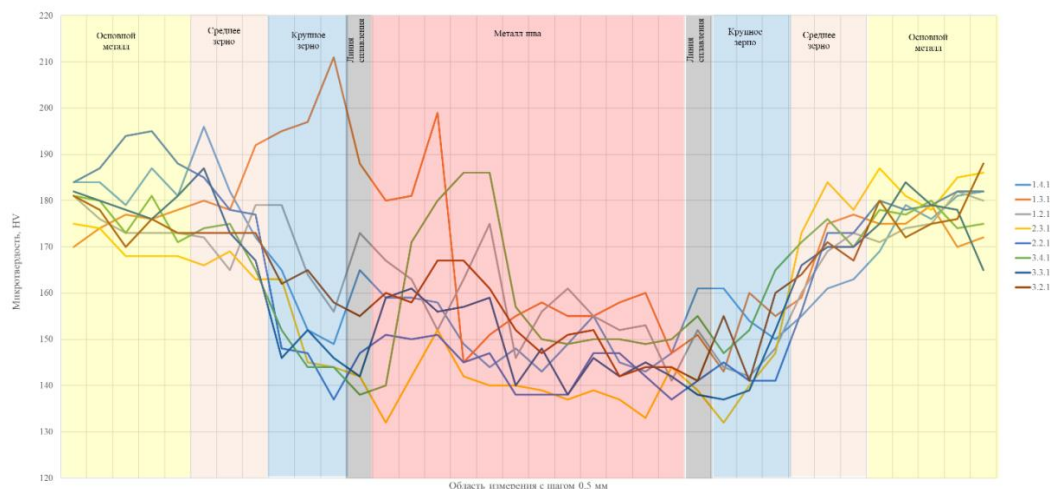


Рисунок 7 – Распределение микротвердости в поперечных сечениях сварных образцов

Микроструктура поперечного сечения шва требовала подготовки образцов, которую проводили на шлифовально-полировальном станке марки EcoMet 250, оснащенный полуавтоматической насадкой AutoMet 250. Химическое травление образцов проводилось в растворе из 4 частей глицерина, 4 частей соляной кислоты и 3 частей азотной кислоты, а время травления выбиралось в диапазоне от 1 до 5 минут.

Исследования микроструктуры металла полученных сварных соединений образцов 1,2,3 характерны для одностороннего шва, выполненного при совмещении поперечного колебания сварочной горелкой и линейного перемещения сварочной ванны.

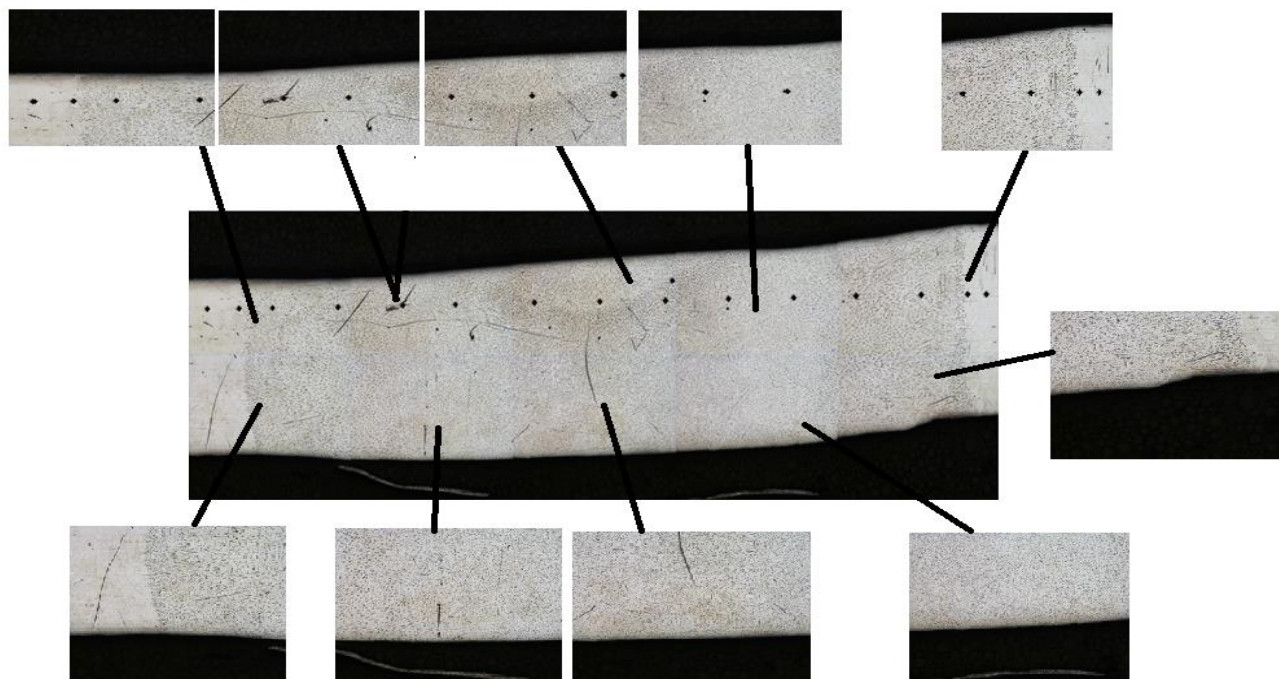


Рисунок 8 – Микроструктура поперечного сечения сварного образца 1

На рис. 8 представлена типичная микроструктура поперечного сечения сварного шва образца, полученного при помощи пульсирующей дуги с поддувом азота. Характерным данного образца является мелкозернистая структура центральной части металла шва с размером зерна 20-30 мкм, соответствующим основному металлу. В металле шва слева и справа от линий сплавления и в центр наблюдается дендритная структура, протяженностью 0,4-0,6 мм. Зона термического влияния разделяется на две составляющие – зона крупного зерна 60-150 мкм протяженностью 1,4-2 мм и зона среднего зерна 40-80 мкм той же протяженности, плавно переходящая в крупнозернистую структуру основного металла.



Рисунок 9 – Микроструктура поперечного сечения сварного образца 2

На рис. 9 представлена типичная микроструктура поперечного сечения сварного шва образца, полученного при помощи пульсирующей дуги с поддувом аргона. Характерным для данного образца является мелкозернистая структура центральной части металла шва с размером зерна 20-30 мкм, соответствующим основному металлу. В металле шва слева и справа от линий сплавления и в центр наблюдается дендритная структура, протяженностью 0,2-0,4 мм. Зона термического влияния разделяется на две составляющие – зона крупного зерна 60-150 мкм протяженностью 1,7-2,8 мм и зона среднего зерна 40-80 мкм той же протяженности, плавно переходящая в крупнозернистую структуру основного металла.

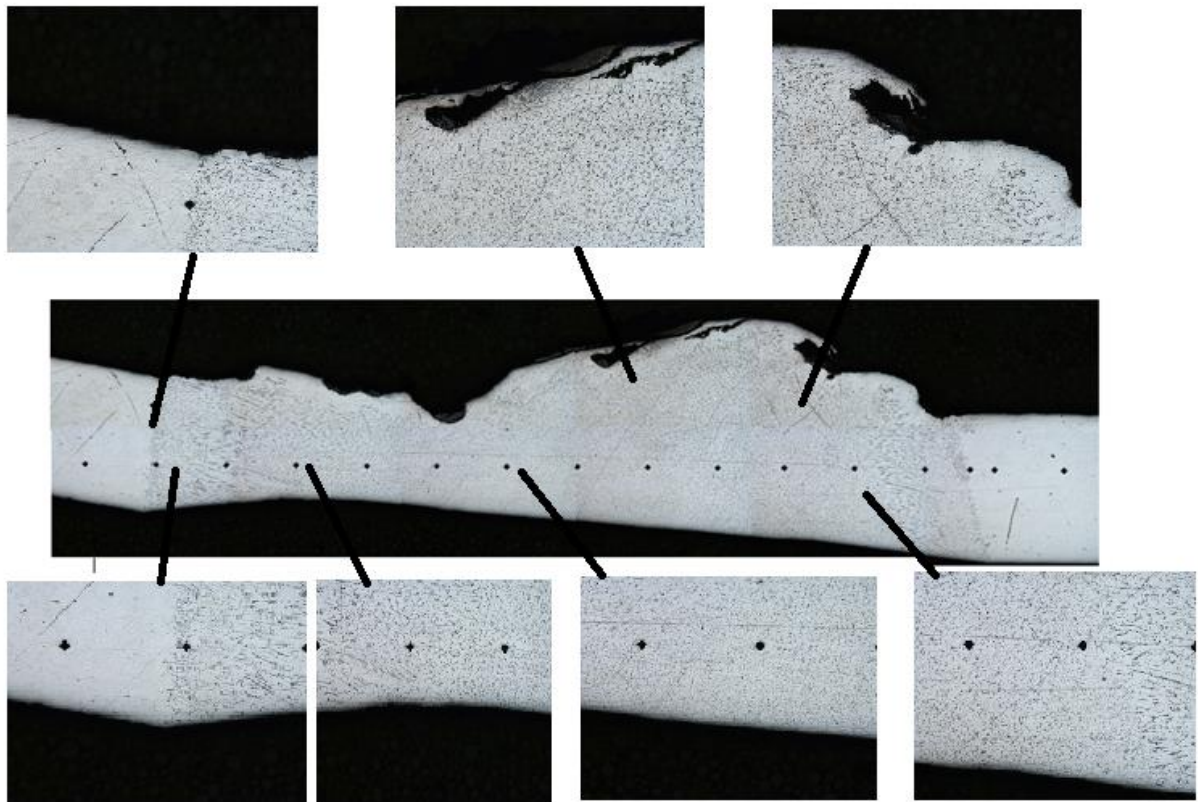


Рисунок 10 – Микроструктура поперечного сечения сварного образца 3

На рис. 10 представлена типичная микроструктура поперечного сечения сварного шва образца, полученного при помощи пульсирующей дуги без поддува. Ввиду того, что образец имеет тонкую стенку и отсутствие защиты основного шва, тем самым образовался прожог. В зоне центральной части шва, зерна расположены не однородно. Из-за отсутствия наплавленного металла поэтому не возможно замерить протяженность и структуру зерна.

Характерным для всех образцов является мелкозернистая структура центральной части металла шва с размером зерна 20-30 мкм, соответствующим основному металлу. В металле шва слева и справа от линий сплавления и в центр наблюдается дендритная структура, протяженностью 0,4-0,6 мм. Зона термического влияния разделяется на две составляющие – зона крупного зерна 60-150 мкм протяженностью 1,4-2 мм и зона среднего зерна 40-80 мкм той же протяженности, плавно переходящая в крупнозернистую структуру основного металла.

Образования зоны крупного зерна объясняется длительным пребыванием металла, прилегающего к линии сплавления при высокой температуре и связано с непрерывным действием сварочной дуги. Дендритная структура от линии сплавления и в центр шва свойственна быстрой скорости охлаждения расплавленного металла и может быть объяснена недостаточной теплопроводностью свариваемых заготовок. Мелкозернистая структура центральной области металла шва характерна отпуску действию дежурной дуги в период перемещения сварочной горелки, а ее недостаточная протяженность - сжиманием дуги в этот период.

Таким образом, совместный анализ микроструктуры, распределения микротвердости и характера излома сварных образцов объясняет разрушение образцов вблизи от линии сплавления направленностью дендритной структуры перпендикулярно центральной оси шва и наличием крупнозернистой структуры с минимальным значением микротвердости с последующим резким возрастанием микротвердости в зоне среднего зерна.

В таблицах 2, 3, 4 приведен химический состав исходной структуры материала и химический состав сварного шва и зоны термического влияния исследуемых образцов.

Таблица 2 – Химический состав зоны сварного шва

Условное обозначение шва	C	O	Si	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo	W
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1-1 (N)	2,27	0,4	0,48	0,51	0,09	16,95	1,73	67,68	8,67	0,36	0,23	0,19
1-2 (N)	1,86	0,84	0,4	0,48	-	17,53	1,85	66,36	10,5	0,04	0,13	-
1-3 (N)	2,02	1,06	0,35	0,14	0,07	17,66	1,82	65,76	10,68	0,24	0,11	0,09

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2-1 (Ar)	2,57	0,96	-	0,49	0,08	16,95	1,71	65,83	10,06	0,73	-	0,61
2-2 (Ar)	2,26	0,3	0,35	0,19	0,04	16,79	1,52	69,18	8,74	0,26	0,25	0,11
3-1	2,2	0,69	0,45	0,17	-	16,79	1,84	67,61	9,86	0,08	0,32	-
3-2	2,01	0,63	0,4	0,4	-	17,32	1,76	67,08	9,29	0,29	0,34	0,48
3-3	2,3	0,94	0,45	0,38	0,06	16,95	1,44	67,23	9,91	0,12	0,21	-

Таблица 3 – Химический состав зоны термического влияния

Условное обозначение шва	C	O	Si	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo	W
1-1 (N)	2,14	0,49	0,53	0,23	0,18	16,74	2,25	66,98	10,19	0,51	0,12	0,12
1-2 (N)	1,74	0,57	0,44	0,36	0	17,3	1,69	68,01	9,31	0,38	0,23	0,25
1-3 (N)	1,62	0,51	0,54	0,2	0,1	18,17	1,54	67,17	9,18	0,47	0,33	0,03
2-1 (Ar)	1,92	0,81	0,39	0,35	-	17,35	1,56	66,69	10,10	0,74	0,09	-
2-2 (Ar)	2,22	0,25	0,48	0,32	0,09	17,65	0,89	67,51	10,28	-	0,27	0,04
3-1	2,11	0,36	0,36	0,21	0,24	17,00	1,79	66,43	10,33	0,17	0,52	0,47
3-2	1,75	0,56	0,32	0,61	0,06	17,46	2,18	67,42	9,11	0,18	0,14	0,22
3-3	2,33	0,38	0,32	0,21	0,05	17,48	2,41	67,27	9,58	0,02	0,27	-

Таблица 4 – Химический состав исходного материала образца

C	O	Si	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo	W
2,09	-	0,36	0,37	0,03	17,53	2,15	66,75	10,25	0,3	0,16	-

При исследовании химического состава представленных образцов, было установлено появление в сварном шве и зоне термического влияния в сравнении с исходной структурой материала следующих химических элементов: O и W.

Причиной появления данных химических элементов является для появления W в структуре сварного шва химический элемент электрода, а O проникает в структуру сварного шва при расплавлении материала.

Этот результат можно объяснить следующим образом. При импульсно-дуговой сварке импульсы тока с частотой в несколько десятков герц периодически накладываются на основной сварочный ток. В результате электродинамические силы



становятся доминирующими и образуются капли. Прерывистые импульсы сварочного тока, которые в три-четыре раза выше, чем обычный постоянный ток, в основном увеличивают глубину проплавления металла. Это приводит к увеличению скорости сварки, скорости кристаллизации и образованию глубоких, но коротких ванн, обеспечивающих наиболее благоприятную картину объемной кристаллизации.

Обработка металлов с применением технического газа – азота не оказывает воздействия на материал, тем самым, не проникая в структуру его поверхности. За счет этого сварочный шов получается максимально ровным и прочным. Азотная дуговая сварка позволяет сохранить антикоррозийные свойства металла, продлив его срок эксплуатации.

Технический процесс сварки с применением азота похож на аргонно-дуговую обработку металлов.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

1. Разработана программа-приложение, генерирующая управляющие G-коды в зависимости от выбранной траектории движения сварочной горелки и дающая возможность дозированного введения тепловой энергии практически в каждой точке траектории.

2. Проведенный анализ литературы показывает, что все рассмотренные методы импульсной дуговой сварки имеют довольно узкую область применения. Целью исследований является улучшение характеристик ИДС, выявление преимуществ и недостатков существенными методами.

3. В процессе работы исследованы образцы на микроструктуру и спектральный анализ в среде защитных газов N, Ar и без защитного газа. Рассмотрены различные виды траекторий подачи сварочной горелки.

4. Исследование показывает, что высокоплотные высокочастотные импульсы тока изменяют структуру кристаллизации осаждаемого металла и одновременно измельчают кристаллы аустенита. В случае однопроходных аустенитно-ферритных сварных швов импульсно-дуговой процесс подавляет образование аустенитно-ферритных сверх кристаллических структур и повышает ударную вязкость сварного шва в три-четыре раза по сравнению со сваркой постоянным током с использованием механизированной аргонодуговой сварки. Поэтому сварные соединения, полученные с использованием импульсно-дугового процесса, имеют более длительный срок службы.

5. Применение в качестве поддува аргона и азота гарантирует отсутствие окисленного слоя обратной стороны шва, позволяет достигнуть значений предела прочности, близких к основному металлу со снижением на 7 и 0,6% соответственно, а сварка с атмосферой воздуха на 20%. При поддуве аргоном относительное удлинение возрастает незначительно, а при использовании азота на 5%.

6. В зоне сварного шва по сравнению с зоной термического влияния содержание кислорода и углерода выше, т.к. зона сварного шва дольше находится в расплавленном состоянии, а значит в большей степени способна поглощать газы.

7. Проведенная апробация работы полномасштабных исследований по осцилляции как перемещением сварочной горелкой, так и энергетическими параметрами сварки. Полученные сварные соединения в полной мере удовлетворяют ГОСТ 16037-80 по размерам, СТ ЦКБА 025-2006 и ГОСТ 32569-2013 по механическим свойствам и микроструктуре.

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

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612029 Российская Федерация. Программа управления системой подачи сварочной

проволоки : № 2023610279 : заявл. 10.01.2023 : опубл. 27.01.2023 / А. В. Фролов, П. В. Бахматов, А. С. Кравченко [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

2. Инструкция управляющего программного обеспечения weld CNC для трубосварочного аппарата многопроходной автоматической сварки / **Е. П. Старничук**, К. К. Комарова, А. С. Кравченко, П. В. Бахматов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 83-85

3. Влияние режимов сварки на геометрические параметры сварного шва, выполненного роботизированным комплексом / К. К. Комарова, **Е. П. Старничук**, А. С. Кравченко, П. В. Бахматов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 33-35.

4. **Старничук, Е. П.** КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ В WeldCNC / Е. П. Старничук, А. С. Кравченко, П. В. Бахматов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 14–18 ноября 2022 года / Редколлегия: А.В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 159-163.

5. **Старничук, Е. П.** Отработка алгоритма программного управления многопроходной автоматической сварки / Е. П. Старничук, П. В. Бахматов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 февраля 2022 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 401-404. – DOI 10.17084/978-5-7765-1502-6-2022-401.