

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

На правах рукописи

*Kep-*

Короткий Михаил Михайлович

**ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ  
СВАРКИ АВИАЦИОННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

Направление подготовки  
15.04.01 «Машиностроение»

АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

2025

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

Научный  
руководитель:

Бахматов Павел Вячеславович,  
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой  
«Технология сварочного и металлургического производства  
имени В.И. Муравьева» Комсомольского государственного  
университета» ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре  
государственного университета», г. Комсомольск-на-Амуре

Рецензент:

Жилин Сергей Геннадьевич,  
кандидат технических наук, доцент, ведущий научный  
сотрудник лаборатории проблем создания и обработки  
материалов и изделий обособленного подразделения  
Института машиноведения и металлургии Дальневосточного  
отделения Российской академии наук ФГБУН Хабаровского  
федерального исследовательского центра Дальневосточного  
отделения Российской академии наук, г. Комсомольск-на-  
Амуре

Защита диссертация состоится 19 июня 2025 г. в 14:00 часов на заседании  
государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01  
«Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по  
адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 221/2.

Автореферат разослан 16 июня 2025 г.

Секретарь ГЭК,  
к.т.н., доцент

Клешнина О.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования:** В отечественном авиастроении сборку топливопроводов из 12Х18Н10Т производят ручной сваркой неплавящимся электродом в среде аргона. Сварка каждого шва трубопровода производится высококвалифицированным персоналом в несколько этапов, путем прерывания процесса, разворота трубы и возобновление процесса. В виду различных конфигураций трубопроводов, изготовить оснастку для точной сборки и непрерывной сварки в один проход не представляется возможным. Автоматизация и роботизация процесса, так же требует много времени и средств для адаптации под конкретное производство, а различные конфигурации трубопроводов, которые при этом не повторяются, еще сильнее усложняет процесс. Возможность неполной, а частичной автоматизации и роботизации процесса может значительно повысить качество за счет небольшого изменения технологического процесса. Способы частичной автоматизации и роботизации уже давно применяются в других производствах на похожих конструкциях, такие способы позволяют снизить человеческий фактор и уменьшить количество брака, который и является основным недостатком применяемого способа на данный момент, но из-за особенностей производства не позволяют их использовать. Такой способ частичной автоматизации как орбитальная сварка закрытой дугой для тонкостенных труб не подходит, из-за сложности расчета процесса сварки в нескольких положениях, не позволяет наблюдать за процессом сварки и вносить правки в настоящем времени. Аппараты для орбитальной сварки открытой дугой слишком громоздки, большая база захвата не позволяет использовать ее для сварки ТПС ЛА, так как на таких трубопроводах протяженность прямых участков недостаточна. По этому создание новых устройств для роботизации процесса, а так же автоматическое управление все этим является актуальной задачей в настоящее время для современного сварочного производства.

**Цель работы:** исследование программного управления параметрами режима комплекса для автоматической сварки неплавящимся электродом в среде аргона пульсирующей дугой на робототехническом комплексе для сварки тонкостенных ТПС ЛА.

**Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:**

1. Провести анализ и установить возможность управления термическим циклом сварки посредством программного управления процессом;
2. Реализовать управление поддувом газа во внутреннюю полость трубы, изучить влияние давления газа на шов;
3. Изучить влияние термического цикла на структуру шва.

**Объекты исследования.** Модернизация робототехнического комплекса, программирование робототехнического комплекса.

**Предмет исследования.** Роботизированный комплекс для сварки ТПС ЛА, программное управление для роботизированного комплекса.

**Научная новизна.**

- 1) Предложен способ сварки, значительно снижающий количество брака;
- 2) предложена модификация вращателя для добавления функции самоцентровки;
- 3) предложен режим сварки, при котором можно управлять тепловложениями и тем самым управлять свойствами и геометрией шва.

4) предложена автоматическая регулировка давления газа, исключающий одну технологическую операцию после сварки в виде зачистки корня шва.

### **Практическая значимость работы.**

Установлена зависимость давления поддуваемого газа в полость трубы и вероятность образования «ёжиков», изменения выпуклости и впуклости сварного шва. Применение модернизированного робототехнического комплекса позволит снизить количество брака, повысить производительность.

Сформирована заявка на патент по разработанному способу сварки.

**Методология и методы исследований.** Работа выполнена с применением современных методов исследований: электронного и оптического микроструктурного анализа, испытаний на статическое растяжение и ударный изгиб

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Анализ программного управления робототехническим комплексом;
2. Анализ зависимости давления газа от прогресса сварки;
3. Результаты экономической оценки результатов в сравнении с базовой технологией и предложенной автоматизацией;
4. Влияние режимов и циклов на структуру и ЗТВ.

**Личный вклад автора.** Соискатель, совместно с руководителем активно участвовал в изготовлении робототехнического комплекса, постановке задач исследования, формулировке положений и вывод, выносимых на защиту и написание статей по результатам проведенных исследований.

**Апробация работы.** Результаты докторской работы были представлены: на 3-й Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению», Комсомольск-на-Амуре, 11-12 декабря 2024 г; 7 Всероссийской национальной научной конференции молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований», Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2024 г; Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению», Комсомольск-на-Амуре, 16-17 ноября 2023 г.

**Публикации.** Основное содержание докторской работы отражено в 4 публикациях в издании, входящем в список ВАК.

**Структура и объем докторской работы.** Докторская работа состоит из введения, трех глав, основных выводов и списка цитируемой литературы, включающего 27 наименований. Докторская работа содержит 118 страниц; в том числе 41 рисунок; 38 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель работы, задачи исследования, научная новизна, практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ современного состояния вопроса в области особенностей конструкции трубопроводных систем летательных аппаратов. Проведен анализ характеристик конструкционных материалов трубопроводных систем летательных аппаратов. Проанализированы способы создания сварных соединений, применяемых в совместном производстве трубопроводных систем летательных аппаратов. Проанализированы требования НТД к процедуре сварки и качеству сварных соединений ТПС ЛА. Оценены возможности автоматизации и роботизации

процедуры сварки ТПС ЛА. Описаны параметры процессов сварки и способы их программного управления.

Преимущественно конструктивными материалами стальных трубопроводных систем (ТПС) летательных аппаратов (ЛА) являются стали 09Х18Н10Т и 12Х18Н10Т, при этом стали первой марки применяются в трубопроводах газо-, воздухоподачи и их распределения, а второй – в топливной системе самолета.

В трубопроводных системах газо-, воздухораспределения материалом патрубков является сталь 09Х18Н10Т, а фланцы, муфты, ниппели, компенсаторы, проставки (рис. 1) изготавливаются из стали 12Х18Н10Т. В трубопроводных системах топливной системы все элементы выполнены из стали 12Х18Н10Т.

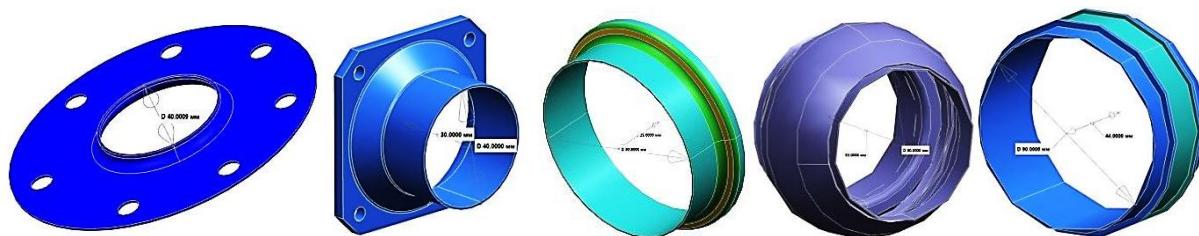


Рисунок 1 - Разновидности фланцевых оконцовок и вставок ТПС

Перед сборкой концы труб калибруются под сварку на длине от 5 до 20 мм после предварительной зачистки продольных швов в зоне калибровки с шероховатостью Ra 3,2. Согласно конструкторской документации категория сварных соединений II, при этом в одной конструкции закладывается и ручная (АрДЭС, шов 1), и автоматическая (ААрДЭС, шов 2) аргонодуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом. Тип сварного соединения ОСТ 1 02617–87 С00001, сварка осуществляется по требованиям ПИ 1.4.75–2000 и ТР 1.2.1901–2006. Рентгеноконтроль сварных соединений выполняется по ПИ 1.4.415–92.

В большинстве используемых трубных деталей и фланцев толщина стенки 0,8 мм. Используемые фланцы приварные.

Сварной элемент ТПС испытывают на прочность и герметичность воздухом давлением, например 5,7 кгс/см<sup>2</sup>, в течение 3 мин пневмогидравлическим методом по ОСТ 1 41319–2002. Группа герметичности указывается в соответствии с ОСТ 1 00128–74.

Тело трубопровода имеет в составе трубы, как прямые (рис. 2, а), так и изогнутые (рис. 2, б), отводы различного угла (рис. 2, в), переходы с одного диаметра на другой (рис. 2, г).

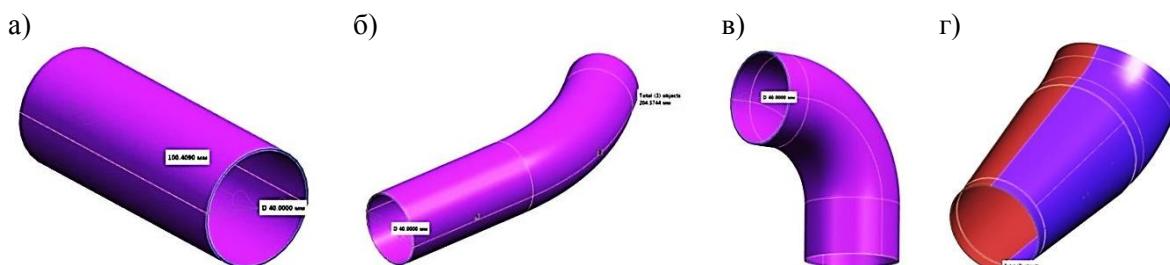


Рисунок 2 - Элементы, входящие в состав трубопровода

С позиции качества сборки (минимизации зазора между соединяемыми кромками) под автоматическую сварку наибольшую опасность вызывают трубные элементы с погибью (см. рис. 2, б, в). В случае невозможности обрезки припуска под прямым углом к стенке в поперечном сечении торца трубы образуется эллипс, при сборке которого с прямолинейным участком трубы появляется смещение кромок. Такой эффект в ходе TIG сварки нивелируется сварщиком путем применения манипулирования горелкой и добавлением присадочной проволоки, а в случае автоматической сварки приведет либо к прожогу или несплавлению кромок, либо к непровару.

Нержавеющие стали обладают высокой коррозионной стойкостью, прочностью и жаропрочностью. Используются в трубопроводных системах, работающих в агрессивных средах и при высоких температурах. Наиболее часто применяются стали марок 12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т.

Сталь коррозионно-стойкая жаропрочная 09Х18Н10Т (другое обозначение – 1Х18Н10Т), используемая в ТПС ЛА, поставляется по ГОСТ 10498–82 «Трубы бесшовные особотонкостенные из коррозионно-стойкой стали. Технические условия» (табл. 1, 2).

Таблица 1 - Химический состав материала 09Х18Н10Т (ГОСТ 10498–82)

В процентах								
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ti	Fe
0,07...0,1 0,8	До 0,8	1,0...2,0	9,0...11,0	До 0,02	До 0,035	17,0...19,0	5С...0,7	Остальное

Таблица 2 - Механические свойства при  $T = 20^{\circ}\text{C}$  материала 09Х18Н10Т

Сортамент	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_t$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	$KCU$ , кДж/м <sup>2</sup>	Термообработка
Трубы (ГОСТ 10498–82)	549	–	40	–	–	–

Чтобы определить свариваемость по диаграмме Шеффлера, необходимо рассчитать эквивалент Ni по формуле 1 и эквивалент Cr по формуле 2.

Эквиваленты Ni и Cr рассчитываются по формулам:

$$\text{Niэкв} = \text{Ni} + 30\text{C} + 0,5\text{Mn} + 30\text{N} \quad (1)$$

$$\text{Crэкв} = \text{Cr} + \text{Mo} + 1,5\text{Si} + 0,5\text{Nb} + \text{V} \quad (2)$$

$$\text{Niэкв} = 11 + 30 \cdot 0,12 + 0,5 \cdot 2 + 0 = 15,6$$

$$\text{Crэкв} = 19 + 0,5 + 1,5 \cdot 0,8 + 0 + 0,2 = 20,9$$

По Диаграмме Шеффлера, сталь 12Х18Н10Т имеет аустенитную структуру, следовательно, свариваемость у стали хорошая.

Трубы диаметром до 80 мм включительно должны быть термически обработанными.

Согласно ТУ 1-4-3935-80 «Заготовка трубная из низкоуглеродистой коррозионно-стойкой стали и сплавов для тонкостенных и особотонкостенных труб» в металле трубной заготовки содержание ферритной фазы не должно превышать 1,5 балла, по соглашению сторон – 2,0 балла.

Основной нормативной документацией, используемой специалистами сварочного производства при разработке технологических процессов создания ТПС

ЛА, является производственная инструкция ПИ 1.4.748-80 «Дуговая сварка трубопроводов из нержавеющих сталей в среде инертных газов», разработанная АО «Национальный институт авиационных технологий» в 1983 г. Общие требования к процедуре автоматической сварки (табл. 3) имеют весьма жесткие ограничения по параметрам процесса и режимам сварки (табл. 4).

Таблица 4 - Ориентировочные режимы автоматической аргонодуговой сварки стыков труб с толщинами стенки 1 и 1,5 мм

Толщи на стенки трубы, мм	Номе р прохода	Диаметр вольфра ма, мм	Диаметр присадочн ой проволок и, мм	Ток сварки, А	Время импульса , с	Время паузы, с	Скорос ть сварки, м/ч	Скорост ь подачи проволо ки, м/ч	Расхо д аргон а, л/мин	
<i>Импульсная с присадочной проволокой</i>										
1,0	1	2	0,8...1,0	50...90	0,14...0,1	0,24...0,	8...10	12...15	6...1	
	2	2			6	28				
1,5	1	3	1,0...1,2	90...120	0,18...0,2	0,22...0,	7...9	11...13	0	
	2	3			0	24				
<i>Импульсная без присадочной проволоки</i>										
Толщи на стенки трубы, мм	Номе р прохода	Диаметр вольфра ма, мм	Ток дежурн ой дуги, А	Ток сварки , А	Время импульс а, с	Время паузы, с	Длин а дуги, мм	Скоро сть сварк и, м/ч	Расход аргона в горел ку, л/мин	
<i>Стыковые соединения</i>										
1,0	1	2	7...9	80...10	0,1...0,1	0,20...0,	12...1	7...8	0,5...1,0	
	2	2		0	8	24				
1,5	1	3		90...11	0,1...0,2	0,20...0,	8...10	7...8		
	2	3		0	0	24				
	1	3		130...1	0,16...0,	0,20...0,	12...1	7...8		
	2	3		50	18	24				
<i>Непрерывная с присадочной проволокой</i>										
Толщи на стенки трубы, мм	Диаметр присадочн ой проволок и, мм	Диаметр вольфра ма, мм	Ток сварки, А	Скорость сварки, м/ч	Скорость подачи проволоки, м/ч	Длина дуги, мм	Расход аргона, л/мин			
1,0	1,2	2	35...50	10...16	18...24	2...2,2	8...12			
1,5	1,2	2	75...90	10...16		2...2,2	8...12			

Импульсная сварка стыковых соединений труб с толщиной стенки 1,0 и 1,5 мм как с присадочной проволокой, так и без нее подразумевает до двух проходов. В ПИ нет четких рекомендаций по технике выполнения сварного соединения, а главным требованием к ним является обеспечение плавного перехода от металла шва к основному металлу как с лицевой стороны, так и со стороны корня, а также

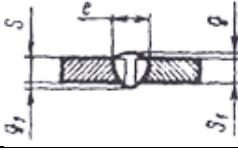
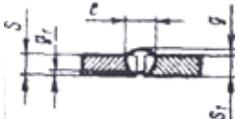
минимальных усилий шва и минимального проплава в пределах допустимых значений (табл. 5).

Таблица 3 - Общие требования к процедуре автоматической сварки

Параметр	Значение
Автоматическая сварка непрерывной или импульсной дугой как с подачей присадочной проволоки, так и без нее	
Смещение вольфрамового электрода относительно стыка	$\leq 0,3$ мм
Длина дуги	1...3 мм
Допустимое отклонение дуги от установленной	$\pm 0,2$ мм
Вольфрамовый электрод располагать к изделию под углом	80...90°
Угол между вольфрамовым электродом и присадочной проволокой в процессе сварки	90°
Угол заточки вольфрамового электрода	на прямой конус 30...90°
	на конус с притуплением $\approx 0,5$ мм 10...20°
Смещение горелки при сварке	поворотных стыков труб для предупреждения стекания жидкого металла (в сторону, противоположную вращению трубы)
	неповоротных стыков труб с началом на подъем (от потолочного положения в сторону вращения) 10...20°

Таблица 5 - Геометрические параметры сварных соединений трубопроводов из нержавеющей стали с толщиной стенки 1,0 и 1,5 мм, выполненных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом

В миллиметрах

Условное обозначение соединения	Поперечное сечение соединения	$S = S_1$	$e$	$q$	$q_1$
C00000		1,0...1,4	7	$0^{+0,8}$	$0^{+0,8}$
		1,5...1,9	7	$0^{+1,0}$	$0^{+1,0}$
		1,0...1,4	7	$0^{+0,8}$	Не более 0,2
		1,5...1,9	7	$0^{+1,0}$	

Из всех типов сварных стыковых соединений, обусловленных в ПИ 1.4.748–80, преимущественно используется С00000, так как не подразумевает специальных технологических операций по видоизменению (отбортовки) хотя бы одной кромки. Как видно из табл. 5, приведенный тип соединения может иметь две комбинации: с гарантированным усилием и с возможной вогнутостью корневого валика (например, для труб с толщиной стенки 1,0...1,5 мм она составляет до 0,2 мм). Пояснений по тексту ПИ не найдено, что затрудняет общее понимание требований документации при разработке техпроцесса и проведении контроля неразъемных соединений.

Согласно чертежам на ЭТПС ЛА сварные соединения имеют I и II категории, что обуславливает требования к допустимости дефектов сварных швов без исправления по результатам рентгенографического контроля (РГК), проводимого

после визуального контроля и исправления выявленных наружных дефектов, не входящих в табл. 7.

Таблица 7 - Дефекты сварки для швов всех категорий, допускающиеся к исправлению

Вид дефекта	Метод устранения	Общие требования
Непровар	Повторная сварка; допускается подварка без присадки и с присадкой	При устранении дефектов подваркой и механической обработкой необходимо обеспечить плавные переходы от обработанного места к основному металлу.
Внутренние и внешние раковины, поры, вольфрамовые включения	Выборка дефектов и последующая сварка с устранением наружных дефектов; допускаются механическая обработка, зачистка с обеспечением плавных переходов в месте зачистки	В местах подварки и механической обработки сварных соединений усиление шва и проплавление не должны превышать допустимые нормы, указанные в табл. 1.12.
Трещины в сварных швах и на линии сплавления, если их единичная или суммарная протяженность не превышает 10 % длины шва	Механическая выборка дефекта и последующая заварка	Местное утонение при механической зачистке допускается не более 10 % от толщины свариваемого материала и должно находиться в пределах допусков на толщину материала (детали). Ширина шва в местах подварки может быть увеличена не более чем на 50 % по отношению к нормативным данным, приведенным в табл. 1.13.
Подрезы, превышающие допустимые без исправления нормы, и резкие переходы от основного металла к шву	Повторная сварка	Перед сваркой видимых дефектов места дефектов следует зачистить. При толщине материала 1 мм и менее разделку дефектных мест не производить, а проваривать место дефекта на всю толщину при снятом усилии.
Чрезмерное усиление, проплавы, наплывы и другие наружные дефекты шва	Механическая обработка	Подварку производить автоматической или ручной сваркой в среде инертных газов. Независимо от исправляемого дефекта общая длина дефектных участков не должна превышать 20 % длины шва для I категории соединений, 30 % – для II.
Прожоги, диаметром не превышающие ширины шва, для материала толщиной 1...3 мм, но не более одного на 500 мм шва. Для деталей толщиной 0,8 мм и менее допускаются к исправлению два прожога на длине 500 мм шва	–	Подварка одного и того же дефектного участка допускается для соединений II категории не более трех раз, для соединений I категории – не более двух раз

Таблица 6 - Нормы допустимых внутренних и наружных дефектов, вскрытых после механической обработки

Толщина сварного соединения, мм	Категория соединения					
	II			I		
	Максимальный диаметр единичного дефекта, мм	Максимальная площадь дефектов, $\text{мм}^2$		Максимальный диаметр единичного дефекта, мм	Максимальная площадь дефектов, $\text{мм}^2$	
		внутренний x	наружный x		внутренний x	наружный x
0,5...0,9	0,25	0,5	—	0,2	0,25	—
1,0...1,4	0,50	1,0	0,7	0,4	0,50	0,3
1,5...1,9	1,0	3,0	2,0	0,6	2,0	1,3
2,0...3,0	1,0	6,0	4,0	0,7	4,0	2,6

Примечание. Для швов протяженностью менее 100 мм суммарная площадь допустимых дефектов уменьшается пропорционально длине шва

Таблица 8 - Нормы допустимых наружных дефектов

Вид дефекта	Категория соединения	
	II	I
Если глубина их не более 10 % от толщины соединения, то суммарная протяженность от длины шва:		
Подрез	Не более 20 %	Не более 10 %
Непровар	Не допускается	

Допускаются без исправления следующие дефекты сварки, выявленные рентгеновским просвечиванием на 100 мм длины шва I и II категорий, если они не нарушают герметичности:

а) отдельные поры, вольфрамовые включения и скопление пор, не превышающие по суммарной площади (сумма площадей отдельных дефектов) величины, зависящей от толщины свариваемого материала и указанной в табл. 5. Размер отдельной поры или раковины не должен превышать диаметра, указанного в той же табл. 5;

б) отдельные крупные поры, раковины и вольфрамовые включения (размером от максимально допустимого диаметра до  $\frac{2}{3}$  от максимального диаметра), если расстояние между ними превышает 10 мм. Плотность крупных пор на 100 мм длины шва должна быть не более двух штук для швов I категории и не более трех штук для II категории.

В швах допускаются цепочки мелких пор. Число пор в цепочке не должно превышать пяти штук для швов I категории и восьми штук для швов II категории.

**Во второй главе** описывается робототехнический комплекс, его основные составляющие, характеристики и предложенная конструкция для модификации, основные преимущества и недостатки модификации.

Сварочный вращатель, используя в своем составе шаговый двигатель, может обеспечивать дискретное вращение трубы с шагом  $0,00025^\circ$  ( $1''$ ) со скоростью до 1,8 об/мин.

Механизм поперечного перемещения горелки обеспечивает дискретное перемещение горелки со скоростью до 3000 мм/мин и с шагом 3 мкм.

Механизм вертикального перемещения горелки обеспечивает дискретное перемещение горелки со скоростью до 3000 мм/мин и с шагом 0,05 мм.

## Параметры установки:

- дискретность перемещения сварочного сопла поперек трубы  $0,01^\circ$ , что при диаметре трубы 60 мм соответствует расстоянию 0,005 мм;
- дискретность перемещения сварочного сопла вдоль трубы 0,003 мм;
- дискретность перемещения сварочного сопла по вертикали 0,05 мм;
- скорость перемещения по оси X 0...1,6 об/мин, что при диаметре трубы 60 мм соответствует 0...300 мм/мин;
- скорость перемещения по оси Y 0...3000 мм/мин;
- скорость перемещения по оси Z 0...3000 мм/мин;
- диапазон регулирования сварочного тока 30...200 А.

Вращатель (рис. 4, а) представляет собой конструкцию, состоящую из основания, внутреннего кольца, двух опор, трех шпилек и двух подшипников, которые впрессовываются во внутреннее кольцо и опоры с легкопрессовой посадкой. Материал изготовления Ст20.

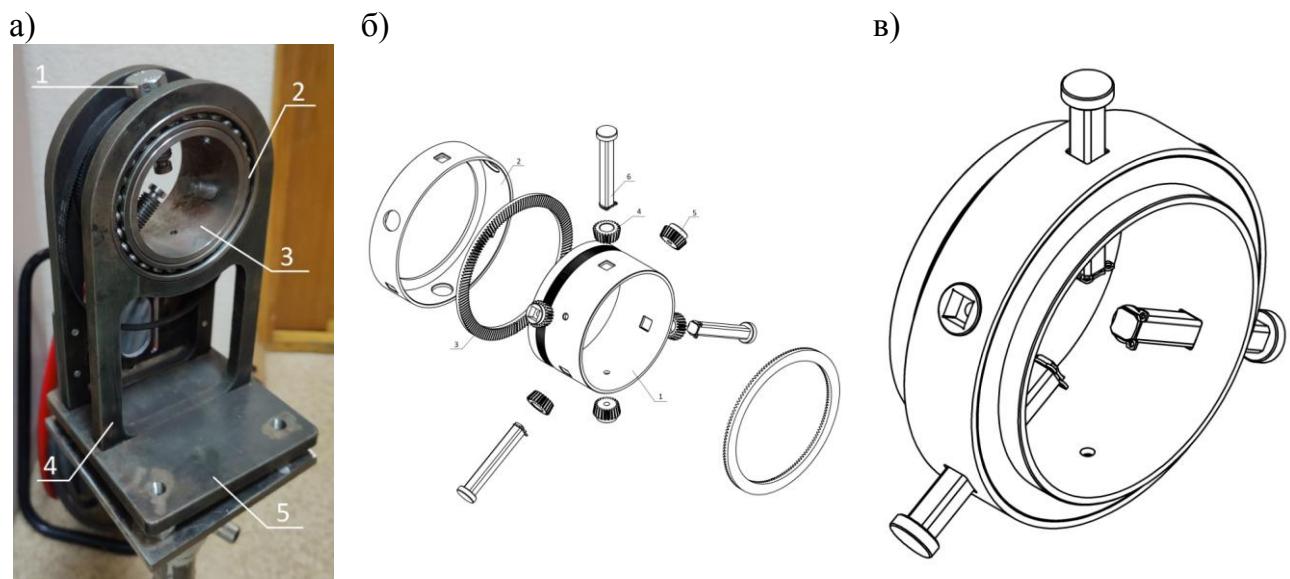


Рисунок 4 – Внешний вид и эскиз модифицированной головки вращателя

На рисунках 4, б и 4, в представлена модернизированная головка вращателя. Основное отличие от нынешнего исполнения это, что реализована функция самоцентровки, благодаря которой минимизируется отклонение от оси вращения, но усложняется механизм устройства, тем самым возрастает сложность изготовления и конечная стоимость.

**В третьей главе** описаны основные выводы исследований, практическая значимость для применения сварки ТПС ЛА, экономический расчет.

Отработка режимов автоматической импульсной TIG сварки выполнялась на трубных заготовках  $\varnothing 50 \times 1$  мм из материала 12Х18Н10Т. Сборка проводилась по требованиям ПИ 1.4.748-80 «Дуговая сварка трубопроводов из нержавеющих сталей в среде инертных газов: Производственная инструкция» применительно к сварному соединению С00000 (стыковое без разделки кромок).

Сварка осуществлялась в один проход, без подачи присадочного материала, с поддувом аргона во внутреннюю полость трубной детали с расходом 4 л/мин. Расход аргона в горелку 6 л/мин. Вольфрамовый электрод диаметром 2 мм располагался к изделию под углом  $90^\circ$ . Положение горелки нижнее.

Режимы импульсной сварки приведены в табл. 9. При этом общая скорость перемещения была постоянной 250 мм/мин, варьировались параметры: сварочный ток (ток высокого импульса), А; шаг между импульсами высокого тока, мм; время импульса высокого тока, с. Величина дежурного тока (величина тока, рассчитанная на перемещение горелки до места воздействия импульсом высокого тока с сохранением жидкого состояния ванны) составляла 15 А.

Таблица 9 - Режимы импульсной сварки

Сектор	Ток, А	Шаг, мм	Время импульса высокого тока, с	Скорость перемещения, мм/мин
1	54/15	4	1	250
2	45/15	2	1	
3	35/15	2	1	
4	35/15	2	2	

Был произведен визуально-измерительный контроль по ПИ 1.4.748–80, тип соединения С00000 четырех швов, для точности каждый шов был разделен на три точки: 1 – начальная точка сварного шва; 2 – середина сварного шва; 3 – конечная точка сварного шва (табл. 10).

Таблица 10 - Размеры высот лицевого и корневого валика

	Сварной шов 4			Сварной шов 3			Сварной шов 2			Сварной шов 1		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Лицевой, мм	0	0	0,54	0	0,28	0,1	0	-0,3	0	0	0,3	0,43
Корневой, мм	0,31	0	0,35	0,41	0	0	0,38	0,53	0,47	0,44	0	-0,46

Заключение по ВИК согласно ПИ 1.4.748–80, соединение С00000, приведено в табл. 11.

Таблица 11 - Заключение по ВИК

Сварной шов	Облицовочное и корневое усиление	Ширина шва	Заключение
4	Годен	Годен	Годен
3	Годен	Не годен	Не годен
2	Не годен	Не годен	Не годен
1	Не годен	Не годен	Не годен

По итогам заключения сварной шов 4 является годным, а швы 1, 2, 3 – не годны.

Для оценки структуры и свойств сварных соединений тонкостенного трубопровода получено сварное соединение на режимах сектора 4 (сварного шва, удовлетворяющего требованиям ПИ 1.4.748–80).

Внешний вид полученного неразъемного соединения представлен на рис. 5, из которого видно, что геометрические параметры (ширина шва, чешуйчатость, высота усиления) в каждом секторе шва идентичные. Ширина шва соответствует требованиям ПИ 1.4.748–80.

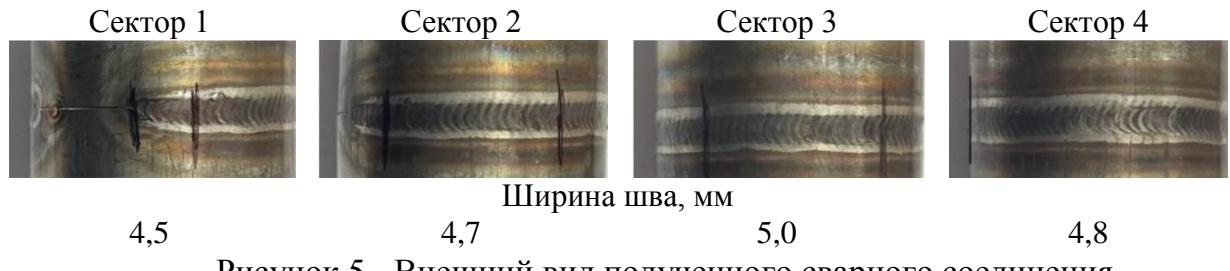


Рисунок 5 - Внешний вид полученного сварного соединения

По результатом механических испытаний на статическое растяжение Разрушение сварных образцов происходит по околосшовной зоне вблизи с линией сплавления. Таким образом, истинная прочность сварного соединения образца 1 при одноосном растяжении составляет 88 % от прочности основного металла. Прочность образца 2 равна 87 %, образца 3 – 105 %, образца 4 – 78 %.

Результаты измерения микротвердости в образцах представлены на рис. 6. Как видно из графиков, распределение микротвердости во всех образцах имеет идентичный характер с тенденцией некоторого снижения показателей в металле шва (до 20 единиц) относительно основного металла.



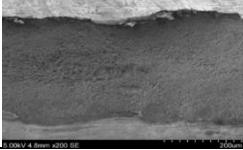
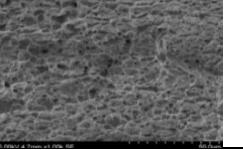
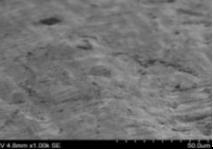
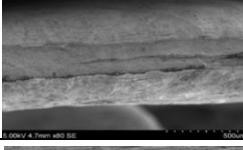
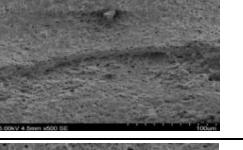
Рисунок 6 - Графики распределения микротвердости в образцах

Далее, с помощью микроскопа, исследовали образцы 1, 2, 3, 4 (табл. 12).

Таблица 12 - Поверхность излома образцов при испытании на растяжение

Образец	Характер излома		
	Общий вид	Середина излома	Поверхность шва
1			
2			
3			

Продолжение таблицы 12

			
4			

Как видно из табл. 12, излом каждого образца имеет ячеистый рельеф, свидетельствующий о вязком характере разрушения.

На рис. 7 представлена типичная микроструктура поперечного сечения сварных образцов, полученных при помощи пульсирующей дуги на примере образца 2.3.1. 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 0,7...0,9 мм. ЗТВ разделяется на две составляющие:

- 1) зону крупного зерна 60...150 мкм протяженностью 1,5...2 мм;
- 2) зону среднего зерна 40...80 мкм той же протяженности, плавно переходящую в мелкозернистую структуру основного металла.

Образование зоны крупного зерна объясняется длительным пребыванием металла, прилегающего к линии сплавления при высокой температуре, и связано с беспрерывным 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 отпускному действию дежурной дуги в период перемещения сварочной горелки, а ее недостаточная протяженность – сжиманию 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.

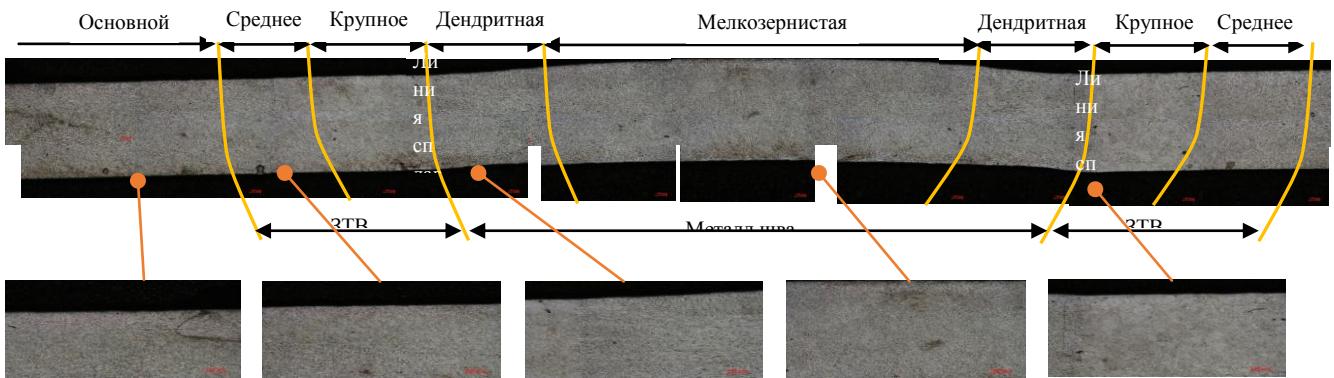


Рисунок 7 - Микроструктура поперечного сечения сварного образца 2.3.1

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1) Установлены режимы сварки пульсирующей дугой без присадочного материала, с достижением требований ПИ 1.4.748-80 по геометрическим параметрам соединения С0000, при сварке трубы из 12Х18Н10Т диаметром 50 мм и толщиной стенки 1 мм парой оптимальными параметрами сварки являются:  $I_{cb}=15$  А,  $I_{пульс}=35$  А, шаг 2 мм,  $t_{пульс}=2$  сек., скорость перемещения 250 мм/мин.

2) Подбор режимов сварки, обратная связь и автоматическая корректировка режимов позволяет регулировать тепловложения, тем самым достигать желаемой структуры шва и ЗТВ, минимизирует сварочные напряжения.

3) Способ регулирования давления поддуваемого газа позволяет избежать провала сварочной ванны, тем самым получить дефект «ёжики», поддерживать сварочную ванну, достигать желаемой формы (выпуклость или впадина) и исключить операцию в виде зачистки корня шва.

4) Механические испытания сварных соединений дали удовлетворительные результаты в отношении прочностных свойств (снижение  $\sigma_b$  до 20 % от основного металла), микроструктурным анализом установлено образование характерных областей дендритных кристаллов, расположенных от линии сплавления к центру шва, вызывающих разрушение образцов по ним.

5) Во время подбора параметров установлено, что оптимальным расходом газа во внутреннюю полость трубы диаметром 50 мм при расстоянии между заглушками 100 мм в момент начала сварки является 5 л/мин, в момент конца сварки 1...1,2 л/мин, при полной герметизации вплоть до 0 л/мин.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ

1. Короткий, М. М. Определение структурно-механического состояния сварного соединения коллектора реакторной печи риформинга установки производства водорода из сплава MANAURITE 900 / М. М. Короткий, П. В. Бахматов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2024. – № 1(73). – С. 119-125. – EDN IYFXQU.

### Статьи в сборниках материалов научных конференций

2. Короткий, М. М. Применение методики проектирования конечных автоматов для разработки управляющей программы установки автоматической сварки / М. М. Короткий, А. В. Фролов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых,

Комсомольск-на-Амуре, 11–12 декабря 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 48-51. – EDN NBMSKB.

3. Короткий, М. М. Эволюция систем зондирования пространственного положения заготовок при автоматизированной сварке / М. М. Короткий, А. В. Фролов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 11–12 декабря 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 52-56. – EDN PWOYNN.

4. Короткий, М. М. Управление шаговым электроприводом сварочного вращателя с помощью программируемого логического контроллера / М. М. Короткий, А. В. Фролов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 08–12 апреля 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2024. – С. 347-349. – EDN AEYJAP.

5. Войтович, Р. А. Обзор технологий управления сварочными роботами / Р. А. Войтович, М. М. Короткий, А. В. Фролов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 16–17 ноября 2023 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – С. 15-18. – EDN QRFJDN.

6. Короткий, М. М. Влияние аргонодуговой сварки сплава tantalite 900 на образование холодных трещин / М. М. Короткий, П. В. Бахматов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 4-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 12–16 апреля 2021 года. Том Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. – С. 73-75. – EDN KTBBBE.

### **Патенты и свидетельства**

7. Заявка на патент № 2024134046/05(075577) Российской Федерации. «Способ сварки тонкостенных криволинейных труб» : № 2024134046/05(075577) : заявл. 12.11.2024 / М. М. Короткий, А. С. Кравченко, А. В. Фролов, П. В. Бахматов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».