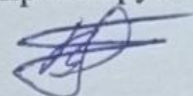


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи



Войтович Роман Алексеевич

**Разработка технологии роботизированной дуговой сварки
тонкостенного трубопровода**

Направление подготовки
15.04.01 – «Машиностроение»

**АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

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

Научный
руководитель:

Бахматов Павел Вячеславович,
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой
«ТСМП имени В.И. Муравьева» ФГБОУ ВО
«Комсомольского-на-Амуре государственного
университета», г. Комсомольск-на-Амуре

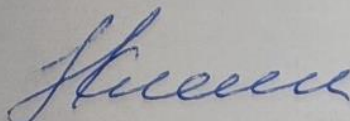
Рецензент:

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 состоится «10» июня 2026 г. в 14:00 часов на заседании государственной аттестационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: Россия, 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, учебный корпус 2, аудитория 221.

Автореферат разослан 01 июня 2026 г.

Секретарь ГЭК
К.Т.Н., доцент



О.Н. Клешнина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Россия должна в короткий срок войти в топ-25 стран по плотности роботизации, заявил президент Владимир Путин в ходе Петербургского международного экономического форума (ПМЭФ-2024). Задача внедрения роботизации в промышленный сектор, особенно выпускающий изделия ответственного назначения (ракетно-космический, авиастроительный, автомобилестроительный и тп.) – кратное повышение производительности и качества продукции. Сварочное производство, даже серийное, также нуждается в роботизации. Одним из наиболее подходящих для этого способов является аргонодуговая сварка неплавящимся электродом, которая, отвечая цели роботизации, имеет нераскрытый потенциал технологического применения.

Производство современных летательных аппаратов (ЛА) предъявляет повышенные требования к надёжности, массе и стоимости изготовления их систем. Трубопроводные системы (ТПС), выполненные из тонкостенных высоколегированных сталей, являются критически важными элементами, качество сварных соединений которых напрямую определяет безопасность эксплуатации.

В условиях планируемого наращивания темпов производства ключевой проблемой становится несоответствие традиционной технологии ручной аргонодуговой сварки (РАД) требованиям по производительности и стабильности качества. Данный метод, несмотря на свою универсальность, обладает фундаментальными ограничениями:

- высокая зависимость от человеческого фактора, что приводит к разбросу геометрии швов и риску возникновения дефектов;
- низкая производительность из-за необходимости прерывания процесса для поворота трубы и выполнения трудоёмких вспомогательных операций (зачистка корня шва, удаление избыточного усиления);
- сложность обеспечения стабильного качества корня шва из-за отсутствия управляемой защиты внутренней полости трубы.

Исходя из вышеперечисленного, разработка технологии роботизированной сварки тонкостенных трубопроводов является актуальной задачей в настоящее время для сварочного производства.

Устранить указанные недостатки позволяет совокупность технических приёмов, реализованных в разрабатываемой роботизированной системе.

1. Сварка пульсирующей дугой. В отличие от дуги постоянного тока, пульсирующий режим позволяет отдельно регулировать тепловложение в сварочную ванну: в остановках происходит импульс (на пиковом токе), тем самым формируется конусовидная сварочная ванна (против эллипсовидной при постоянном токе); при перемещении дуга поддерживается (на дежурном токе), тем самым уменьшается общий нагрев ЗТВ и снижается риск прожога, что делает возможной сварку без присадочной проволоки при минимальном зазоре.

2. Активный управляемый поддув защитного газа во внутреннюю полость трубы с программной регуляцией давления. Это обеспечивает не только надёжную защиту корня шва от окисления, но и позволяет влиять на геометрию обратного валика, стабилизируя его форму и размеры.

3. Безостановочная сварка с непрерывным вращением трубы относительно горелки. Исключение остановок для поворота (и связанных с ними переплавов)

устраняет основные концентраторы дефектов – зоны повторного нагрева и возможного окисления, а также сокращает общее время цикла.

4. Вращение криволинейных заготовок со сваркой в нижнем положении. Сварка поворотного стыка в нижнем пространственном положении сварочной ванны обеспечивает стабильность геометрических параметров шва и упрощает управление процессом.

Перечисленные решения реализованы в робототехническом комплексе (РТК), разработанном на кафедре ТСМП имени В. И. Муравьева, интегрирующем управляемый привод вращения, систему позиционирования горелки, программируемый блок регулирования давления аргона и источник питания с возможностью генерации пульсирующей дуги.

Таким образом, актуальной научно-технической задачей является разработка гибкой, модульной технологии автоматической аргодуговой сварки тонкостенных труб, которая, обеспечивая качество на уровне промышленных автоматов, позволила бы сократить издержки, получить воспроизводимость и заложить основу для создания роботизированного комплекса.

Цель диссертационной работы. Обеспечение качества сварных швов тонкостенных труб из нержавеющей стали, удовлетворяющих требования авиационного производства, путем разработки и экспериментальной апробации технологии роботизированной аргодуговой сварки пульсирующей дугой без применения присадочной проволоки.

Объект исследования – процесс автоматической аргодуговой сварки стыковых соединений тонкостенных труб из стали 12Х18Н10Т (наружный диаметр 40–60 мм, толщина стенки 1,0 мм) с использованием лабораторного технологического комплекса.

Предмет исследования – взаимосвязь между синхронизированными параметрами технологического цикла (режим сварки, скорость вращения, давление поддува защитного газа) и геометрическими, структурными и механическими характеристиками сварного соединения.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи.

1) Разработать методику экспериментального исследования, включающую:
а) план постановки экспериментов для определения влияния каждого ключевого параметра (сила тока, частота пульсации, давление аргона, скорость вращения) на формирование шва;

б) методы контроля качества (анализ микроструктуры, измерение твёрдости, механические испытания) для сравнения с заданными требованиями.

2) Провести экспериментальное исследование и выявить устойчивые технологические режимы, обеспечивающие получение сварных соединений, удовлетворяющих требованиям, при сварке без присадочной проволоки.

3) Проанализировать влияние выбранных режимов сварки пульсирующей дугой с управляемым поддувом на структуру и механические свойства (твёрдость, прочность) металла шва и зоны термического влияния.

4) На основе полученных данных составить технологические рекомендации (требования сборки, режимы сварки, настройки давления защитного газа) для ключевых типоразмеров труб и предложить архитектуру системы управления для перспективного роботизированного комплекса.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на следующих научно-практических конференциях: Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению», (г. Комсомольск-на-Амуре, 2023 - 2025 г.); 8-й Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Молодежь и наука: Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований», (г. Комсомольск-на-Амуре, 2025 г); 76-й Ежегодной Всероссийской студенческой научной конференции «СНК-2026» (г. Москва, 2026 г).

В лабораторных условиях кафедры «ТСМП имени В.И. Муравьева» ФГБОУ ВО «КнАГУ», квалифицированным специалистом-сварщиком ПАО «ОАК» - «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина», проведена апробация ручной аргонодуговой сварки элементов тонкостенных трубопроводов с механизированным позиционированием соединения робототехническим комплексом (РТК).

Положения, выносимые на защиту:

- аналитическое обоснование необходимости разработки модульной технологии автоматической аргонодуговой сварки тонкостенных труб с управляемым поддувом аргона и пульсирующей дугой.
- разработанная конструкция робототехнического комплекса и её экспериментальная апробация на трубах 50×1 мм из стали 12X18H10T.
- выявленные закономерности влияния режимов пульсирующей дуги на структуру, микротвердость и предел прочности сварных соединений.
- экономическое обоснование эффективности автоматической аргонодуговой сварки по сравнению с ручной: рост производительности в 3,4 раза, снижение себестоимости в 4,7 раза.

Научная новизна работы:

Предложена методика исследования влияния параметров режима TIG-сварки (включая сварку пульсирующей дугой) в сочетании с управляемым внутрикамерным поддувом аргона на структуру и свойства сварных соединений тонкостенных труб из нержавеющей сталей.

Разработан алгоритм формирования управляющих программ (G-кодов) для сварочного технологического комплекса, интегрирующий параметры движения, сварки и газовой защиты в единый цикл.

Обоснован подход к расчёту и программному управлению давлением защитного газа в полости трубы как фактора, определяющего стабильность формирования валика при сварке без присадочной проволоки.

Практическая значимость работы:

Разработаны технологические рекомендации по сборке и сварке тонкостенных трубных соединений из сталей типа 12X18H10T без присадочной проволоки, направленные на выполнение требований, предъявляемых к авиационным трубопроводам.

Создан действующий технологический комплекс, интегрирующий управляемый привод вращения, систему позиционирования горелки, программируемый блок управления, система газовой защиты и источник сварочного тока. Комплекс позволяет обрабатывать и фиксировать все параметры будущего роботизированного процесса.

Предложена архитектура системы управления для роботизированного комплекса, предусматривающая синхронизацию тепловых, механических и газодинамических параметров процесса.

Разработана и апробирована система активного управления давлением защитного газа во внутренней полости свариваемой трубы для обеспечения качества геометрии шва.

Созданы условия для формирования базы технологических данных (режимов сварки), связывающая геометрию трубы, параметры сварки, давления поддува и конечные геометрические характеристики шва. Данная база является основой для создания программного обеспечения адаптивного управления процессом.

Личный вклад автора: Заключается в совместной с научным руководителем постановке задач исследований, изготовлении робототехнического комплекса, формулировке положений и выводов, выносимых на защиту, а также написании статей по теме исследования. Автор лично производил оценку существующей технологии сварки тонкостенных нержавеющей трубопроводов, выполняемых на КНААЗ, анализировал литературные источники и проводил экспериментальные исследования с последующим анализом и обработкой полученных данных, проводил металлографические, физико-механические и другие виды исследований.

Публикации: По материалам диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ в сборниках Всероссийских конференций.

Объем и структура диссертации: Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка литературы. Диссертация содержит 130 страниц, 54 рисунка, 26 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 проведён анализ современного состояния вопроса в области сварки тонкостенных трубопроводных систем летательных аппаратов из нержавеющей сталей.

Рассмотрены конструктивные особенности трубопроводных систем и характеристики основного материала (сталь 12Х18Н10Т). Проанализированы существующие способы ручной и автоматической аргонодуговой сварки (головки открытого и закрытого типа, сварочные станки, роботизированные ячейки), выявлены их достоинства и недостатки, в том числе применительно к сварке криволинейных участков труб.

Проведён обзор нормативно-технической документации, регламентирующей требования к качеству сварных соединений авиационных трубопроводов, а также типичных дефектов (окисление корня шва, дефекты геометрии, превышение усиления корневого валика) и причин их возникновения.

Особое внимание уделено анализу физических основ сварки пульсирующей дугой, позволяющей снизить тепловложение, сформировать конусовидную сварочную ванну и осуществлять сварку без присадочной проволоки. Оценены возможности автоматизации и роботизации процесса сварки тонкостенных труб, обоснована необходимость разработки модульной технологии с управляемым поддувом защитного газа и позиционированием заготовки вращением.

Во второй главе приведено описание разработанного робототехнического комплекса (РТК) для автоматической аргонодуговой сварки тонкостенных труб.

Представлены общие характеристики комплекса: дискретность перемещений по осям, диапазоны скоростей и сварочного тока. Описаны основные элементы: сварочный вращатель с шаговым двигателем, обеспечивающий фиксацию и вращение как прямолинейных, так и криволинейных труб диаметром от 8 до 130 мм; двухкоординатный механизм перемещения сварочной горелки (поперечная и вертикальная оси) с дискретностью до 3 мкм; сварочный источник питания Kemppi MinarcTig Evo 200 MPL с функцией программного переключения тока («Minilog») и воздушное охлаждение горелки.

Рассмотрена структура шкафа управления, включающего плату управления, драйверы шаговых двигателей, блоки управления источником тока и подачей проволоки. Отдельно описана система активного управляемого поддува защитного газа: представлены альтернативные способы регулирования (металлизированный скотч, потолочное положение горелки, тарированный клапан, сильфонное приспособление) и обоснован выбор программируемой схемы с электронным регулятором давления РДЭ-22. Приведены методики расчёта времени продувки внутрикамерного пространства и необходимого давления поддува для стабилизации геометрии обратного валика.

В третьей главе представлены результаты экспериментальной отработки технологии сварки на робототехническом комплексе.

Отработка режимов ручной механизированной TIG сварки выполнялась на трубных заготовках $\varnothing 45 \times 1$ мм из материала 12X18H10T (рисунок 1). Сборка проводилась по требованиям ПИ 1.4.75-2000 «Дуговая сварка трубопроводов из нержавеющей сталей в среде инертных газов: Производственная инструкция» применительно к сварному соединению С00000 (стыковое без разделки кромок).

Сварка осуществлялась в один проход, с подачей присадочного материала диаметром 2 мм, с поддувом аргона во внутреннюю полость трубной детали. Расход аргона в горелку 5 л/мин (таблица 1). Вольфрамовый электрод диаметром 2,4 мм располагался к изделию под углом 90° , положение горелки нижнее.

Таблица 1 - Режимы ручной механизированной TIG сварки

№ образца	Ток, А	Скорость вращения, об/мин	Расход аргона в горелку, л/мин	Расход аргона в полость трубы, л/мин	
				В начале сварки	В конце сварки
1	43	4,5	5	5	1
2				1	3
3				1	~0



Рисунок 1 – Внешний вид неразъемных соединений

Валик третьего образца имеет стабильные характеристики по ширине с лицевой и обратной сторон шва, глубине проплавления, в связи с чем был выбран для

дальнейших испытаний на статическое растяжение, измерения твердости и исследования микроструктуры в поперечном сечении шва.

Механические испытания сварных соединений показывают удовлетворительные результаты в отношении прочностных свойств – соответствие предела прочности не менее 80% от прочности основного металла (549 МПа, ГОСТ 9941-81) микроструктурным анализом установлено образование характерных областей дендритных кристаллов, расположенных от линии сплавления к центру шва, вызывающих разрушение образцов по ним. Результаты измерения микротвердости в образцах представлены на рисунке 2.

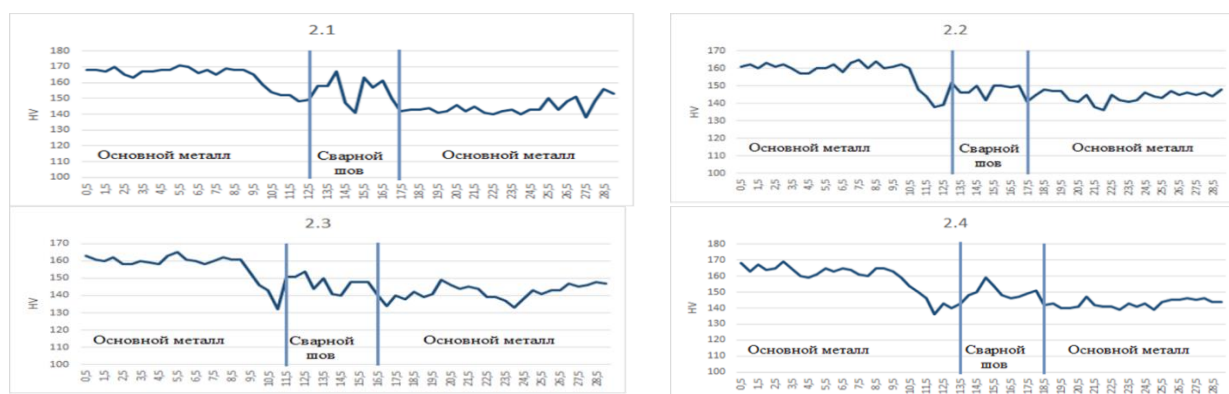


Рисунок 2 - Графики распределения микротвердости в образцах

На рисунке 3 представлена макроструктура поперечного сечения сварных образцов, полученных при помощи постоянно действующей дуги механизированной РАД сварки. Характерным для всех образцов является мелкозернистая структура центральной части металла шва с размером зерна 20...30 мкм, соответствующим основному металлу. Слева и справа от линий сплавления наблюдается дендритная структура, направленная в центр шва, протяженностью 0,4...0,7 мм. линия сплавления имеет резкий переход с крупного зерна на мелкое. 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.

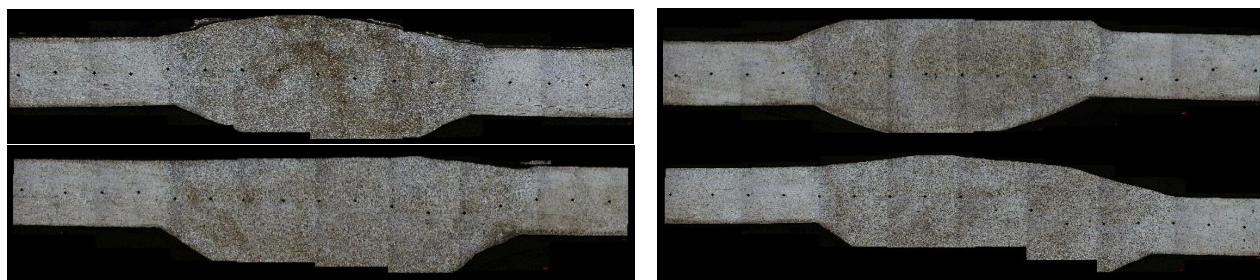


Рисунок 3 – Макроструктура полученных образцов

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 с более резким переходом мелко- и крупнозернистой структуры с минимальным значением микротвердости с последующим резким возрастанием микротвердости в зоне среднего зерна.

Обработка режимов автоматической импульсной TIG сварки выполнялась на трубных заготовках Ø50×1 мм из материала 12X18H10T. Сборка проводилась по требованиям ПИ 1.4.75-2000 «Дуговая сварка трубопроводов из нержавеющей 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 (таблица 2). Вольфрамовый электрод диаметром 2 мм располагался к изделию под углом 90°. Положение горелки нижнее.

Таблица 2 - Режимы сварки

Сектор	Ток, А	Протяженность, мм	Время импульса высокого тока, с	Скорость перемещения, мм/мин
1	35/15	7,9	1,3	250
2		31,7	1,2	
3		31,7	1,1	
4		58,6	1,0	

Внешний вид полученного неразъемного соединения представлен на рисунке 4, из которого видно, что геометрические параметры (ширина шва, чешуйчатость, высота усиления) в каждом секторе шва идентичные. Ширина шва соответствует требованиям ПИ 1.4.75-2000.

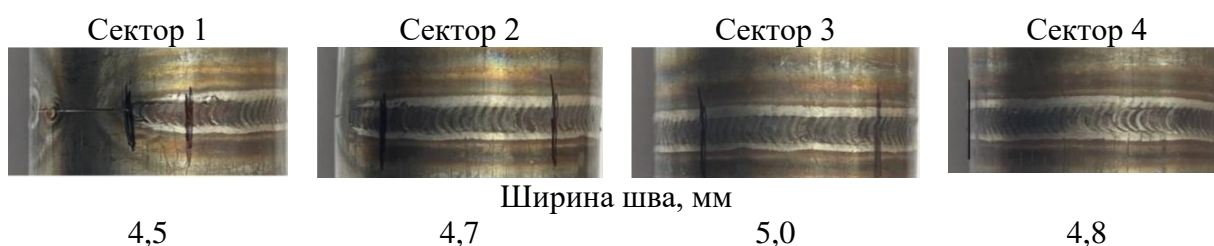


Рисунок 4 - Внешний вид полученного сварного соединения

В результате механических испытаний на статическое растяжение разрушение сварных образцов происходит по околошовной 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 рисунке 5. 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 5 - Графики распределения микротвердости в образцах

Характерным для всех образцов является мелкозернистая структура центральной части металла шва (рисунок 6) 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

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.

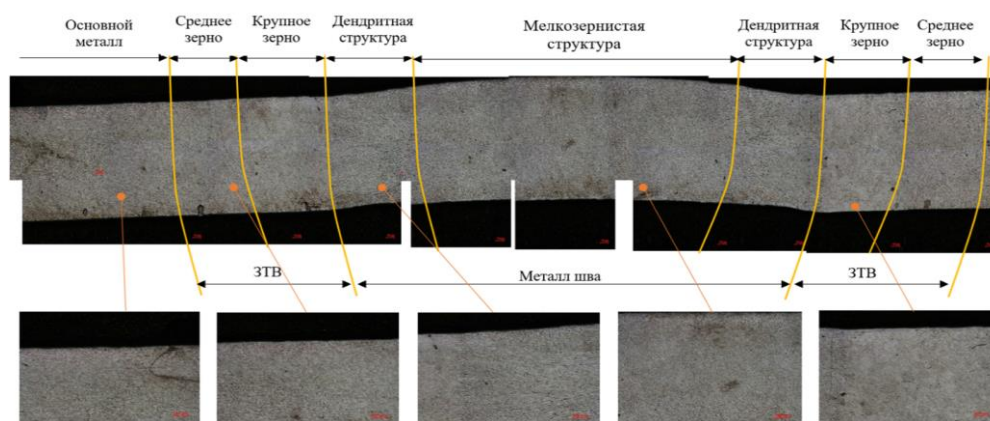


Рисунок 6 - Микроструктура поперечного сечения сварного образца 1.1

В четвёртой главе выполнен сравнительный технико-экономический анализ трёх способов сварки тонкостенных труб: ручной (РАД), механизированной ручной (М-РАД) и автоматической аргонодуговой (ААД) на разработанном робототехническом комплексе. Приведены расчёты прямых материальных затрат на один стык, а также месячной выработки одного сварщика с учётом процента брака и заработной платы. Установлено, что автоматическая сварка обеспечивает снижение прямых затрат на 81% по сравнению с ручной, рост месячной выработки в 3,4 раза и снижение себестоимости годного стыка в 4,7 раза. Механизированная ручная сварка занимает промежуточное положение: выработка выше на 30%, себестоимость ниже на 39%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача – разработка и экспериментальная апробация технологии автоматической аргонодуговой сварки тонкостенных труб из нержавеющей стали (на примере 12Х18Н10Т) с применением пульсирующей дуги, активного управляемого поддува аргона и позиционирования заготовки вращением.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ состояния вопроса показал, что традиционная ручная аргонодуговая сварка обладает фундаментальными ограничениями: зависимость от квалификации сварщика, обязательные остановки для поворота трубы, нестабильность защиты корня шва. Существующие автоматические устройства (головки открытого/закрытого типа, орбитальные станки, роботизированные ячейки) либо дороги, либо негибки при сварке

криволинейных участков, либо не обеспечивают управляемого поддува аргона с регулировкой давления. Обоснована необходимость разработки модульной технологии, сочетающей сварку пульсирующей дугой, непрерывное вращение трубы (в том числе криволинейных заготовок) и программируемый поддув аргона.

2. Разработан и создан робототехнический комплекс, включающий: прецизионный вращатель с шаговым двигателем (фиксация прямых и криволинейных труб диаметром 8–130 мм), двухкоординатный механизм позиционирования горелки (дискретность до 3 мкм), источник питания Kemppi Minarc Tig Evo 200 MPL с функцией переключения тока «Minilog», систему активного управления давлением защитного газа на базе регулятора РДЭ-22 и программируемого контроллера. Все узлы интегрированы через единую систему управления (G-коды), что позволяет реализовать как механизированную ручную сварку (сварщик ведёт горелку, комплекс обеспечивает вращение и поддув), так и полностью автоматический цикл.

3. Экспериментально отработаны режимы сварки для двух технологий:

- Механизированная ручная аргодуговая сварка (М-РАД): постоянный ток 43 А, скорость вращения 4,5 об/мин, присадка Ø1,0 мм (расход 10 м/ч). Предел прочности сварных соединений на трубах 45×1 мм составил 606–623 МПа (удлинение 27–31 %), что соответствует требованиям ГОСТ. Микроструктура характеризуется резким переходом от мелкого зерна шва к крупнозернистой ЗТВ (60–150 мкм) с малой площадью контакта, что создаёт концентраторы напряжений и вызывает разрушение по линии сплавления. Микротвердость имеет скачкообразное распределение.

- Автоматическая аргодуговая сварка (ААД): пульсирующая дуга (дежурный ток 15 А, импульсный 35 А), скорость сварки 250 мм/мин, без подачи присадка, управляемый поддув аргона (давление 0,04 атм). На трубах 50×1 мм получены сварные соединения, удовлетворяющие нормативной документации после оптимизации режимов (разбиение периметра на четыре сектора с уменьшением времени импульса от 1,3 до 1,0 с). Предел прочности варьируется от 450 до 600 МПа в зависимости от сектора; наибольшее значение 600,4 МПа (105 % от основного металла). Микроструктура отличается более плавным переходом между зонами, отсутствием резких скачков микротвердости, что объясняется отпускным действием дежурной дуги в паузах.

4. Техничко-экономический анализ показал значительное преимущество автоматической сварки по сравнению с ручной:

Прямые затраты на один стык: РАД – 13,76 руб., М-РАД – 8,03 руб., ААД – 2,61 руб. (экономия 81 % относительно РАД);

За месяц работы одного сварщика (161,3 ч, оклад 100 тыс. руб.) с учётом брака количество годных стыков составляет: РАД – 4002 шт., М-РАД – 5195 шт., ААД – 13 742 шт. Себестоимость одного годного стыка с учётом зарплаты: РАД – 47,2 руб., М-РАД – 28,7 руб., ААД – 10,1 руб.;

Механизированная ручная сварка является эффективным промежуточным этапом (рост выработки на 30 %, снижение себестоимости на 39 %), а полная автоматизация позволяет увеличить производительность в 3,4 раза и снизить себестоимость в 4,7 раз.

5. Научная новизна и практическая значимость подтверждены разработанными методиками расчёта времени продувки и необходимого давления поддува, алгоритмами формирования G-кодов, а также созданным лабораторным комплексом, который может быть использован для дальнейших исследований и как основа для промышленного роботизированного оборудования.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. 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.

2. Войтович, Р. А. Исследование процесса подачи сварочной проволоки в зону действия дуги и его влияния на качество сварных соединений / Р. А. Войтович, П. В. Бахматов // 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. 12-14. – EDN TDPRRW.

3. Войтович, Р. А. Применение алгоритма цифрового деления частоты для управления электроприводом сварочного вращателя / Р. А. Войтович, 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. 23-26. – EDN OTWJVY.

4. Войтович, Р. А. Модернизация системы поиска стыка установки автоматической сварки портального типа / Р. А. Войтович, 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. 20-23. – EDN MWAAEQ.

5. Войтович, Р. А. Особенности корневого дефекта при дуговой сварке аустенитных сталей без поддува / Р. А. Войтович, П. В. Бахматов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VIII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 апреля 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 17-19. – EDN AIYPIB.

6. Войтович Р.А. Технологические ресурсы аргонодуговой сварки / Р.А. Войтович, П.В. Бахматов // 76-я Ежегодная Всероссийская студенческая научная конференция «СНК-2026» : материалы конференции, Москва, 20–24 апреля 2026 года. – Москва : Московский политехнический университет, 2026.