

*На правах рукописи*

Крючков Павел Александрович

**Разработка технологических рекомендаций к процессу сварки корневого  
слоя шва магистральных газопроводов методом управляемого  
каплепереноса при несовершенствах сборки**

2.5.8. – Сварка, родственные процессы и технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**КОБЕРНИК Николай Владимирович**  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий кафедрой

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
**ШОЛОХОВ Михаил Александрович**  
ООО «Шторм», директор

кандидат технических наук, доцент  
**УТКИН Иван Юрьевич**  
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,  
доцент

Ведущая организация: ФГАОУ ВО СПбПУ, г. Санкт-Петербург

Защита состоится «02» июля 2025 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.20 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7 (499) 267-66-33, доб. 4057

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» 2025 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета, к.т.н.,

Панкратов А.С.

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность работы.** Магистральные трубопроводы являются наиболее распространенным и удобным способом транспортировки углеводородов на большие расстояния. Для РФ объекты, обеспечивающие транспортировку углеводородов, являются стратегическими. Трубопроводы прокладываются как по сухе, так и по дну различных водоемов (моря, реки, озера и т.д.). Аварии на таких объектах влекут за собой не только финансовые, но и экологические потери, а также могут быть связаны с человеческими жертвами. Поэтому к качеству изготовления таких объектов предъявляются жесткие требования.

В настоящее время развитие сварочного производства на столь важных объектах ведется в направлении повышения производительности, но не в ущерб качеству продукции. При этом следует отметить, что строительство магистральных трубопроводов ведется преимущественно в монтажных условиях, что накладывает ряд дополнительных ограничений. С этой точки зрения вполне оправдан переход на автоматические способы сварки. Наиболее распространёнными автоматическими способами сварки магистральных трубопроводов являются способы дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитных. Большой вклад в развитие автоматической дуговой сварки трубопроводов был внесен такими известными учеными как: Акулов А.И., Чернышов Г.Г., Гладков Э.А., Шварц М.В. и др.

Одним из наиболее сложных и ответственных этапов является сварка корневого слоя шва на весу. От качества выполнения корневого слоя шва во многом зависит работоспособность сварного соединения на всем этапе жизненного цикла. При этом, наибольшая вероятность образования недопустимых дефектов возникает именно при сварке данного слоя. На качество формирования корневого слоя шва оказывают влияние точность подготовки (размер притупления и его неравномерность) и сборки кромок (смещение и величина зазора свариваемых кромок). Из-за этого характерными дефектами корневого слоя шва являются: провисы валика шва (в нижнем пространственном положении), несплавления (в зоне замков), шлаковые включения и прожоги. Все описанные выше возмущения довольно успешно нивелируются применением импульсных способов сварки с переносом электродного металла короткими замыканиями (методы STT, УКП и т.д.) и профессионализмом сварщика-оператора, что позволяет получить качественное сварное соединение, но в случае автоматической сварки являются сложной научно-технологической задачей.

Ряд исследователей (Гладков Э.А., Перковский Р.А и Шварц М.В.) проводили работу в данном направлении, где в качестве управляющих воздействий предложены параметры режима сварки. Однако такой подход ограничен с точки зрения устойчивости процесса сварки, а также требует доступа к протоколам управления источниками для сварки. Управление траекторией движения сварочной горелки в качестве управляющих воздействий является более целесообразным подходом. В связи с этим разработка алгоритма работы автоматических систем, способных качественно выполнять сварку корневого слоя шва с минимальным субъективным фактором, является актуальной задачей.

**Цель работы:** снижение уровня дефектности корневого слоя шва за счёт разработки алгоритма управления автоматической системы для дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитных газов при наличии возмущений по смещению и зазору свариваемых кромок.

**Задачи работы:**

1. Исследовать влияние параметров режима и пространственного положения на формирование корневого слоя шва методом УКП (управляемый каплеперенос), а также механизм возникновения дефектов при наличии возмущений по смещению и зазору свариваемых кромок.
2. Определить перечень управляющих воздействий, позволяющий предотвратить нарушение формирование корневого слоя шва методом УКП в условиях возмущений при сварке в различных пространственных положениях.
3. Разработать алгоритм управления траекторией движения сварочной горелки при появлении возмущений по сборке.
4. Интегрировать разработанный алгоритм в комплекс для автоматической сварки неповоротных стыков труб и апробация полученных технологий и оборудования.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Механизм влияния параметров сборки кромок под сварку на процесс дуговой сварки корневого слоя шва с управляемым каплепереносом;
2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований условий равновесия сварочной ванны при наличии возмущений по смещению и зазору свариваемых кромок;
3. Алгоритм управления траекторией движения горелкой в процессе сварки методом УКП при изменении смещения и зазора свариваемых кромок, основанный на изменении амплитуды, скорости поперечных колебаний, скорости сварки и времени задержек на кромках;
4. Результаты опробования разработанного алгоритма в составе разработанного роботизированного комплекса для сварки кольцевых неповоротных стыков трубопроводов при наличии изменения смещения и зазора свариваемых кромок.

**Научная новизна работы.**

1. Установлено что для способа сварки методом УКП, при изменении зазора между свариваемыми кромками причиной образования дефектов является нарушение условия равновесия сварочной ванны, вызванное изменением сил поверхностного натяжения.
2. Установлено, что для компенсации изменения зазора необходимо производить корректировку веса сварочной ванны за счет изменения траектории движения сварочной горелки, что осуществляется за счет изменения скорости сварки, амплитуды и скорости колебаний сварочной горелки.
3. Установлены взаимосвязи между амплитудой колебаний, скоростью колебаний и скоростью сварки при изменении зазора, которое состоит в том, при сварке на переменном зазоре отношение скорости сварки и скорости колебаний сварочной горелки должны соотноситься  $v_{\text{св}}=3-0,2*b+K_{\text{пп}}$  и  $v_{\text{кол}}=(3-v_{\text{св}}+K_{\text{пп}})*50$ , где  $b$ -зазор между кромками,  $K_{\text{пп}}$ -коэффициент пространственного положения,

позволяющие нивелировать влияние изменения зазора на формирование сварного шва.

4. Установлено, что для способа сварки методом УКП при смещении кромок причиной образования дефектов является разное тепловложение, сообщаемое каждой из кромок. Для компенсации этого необходимо производить корректировку тепловложения, сообщаемое в каждую кромку.

5. Установлены взаимосвязи между величиной смещения свариваемых кромок и разницей времени задержки на кромках в соответствие с формулой  $\Delta t=0,1^*c$ , где  $c$  – смещение кромок, что приводит к увеличению тепловложений в удаленную кромку и предотвращает образование дефектов.

**Практическая значимость работы:** Разработан и апробирован алгоритм управления траекторией движения сварочной горелки при появлении возмущений по смещению и зазору свариваемых кромок при сварке корневого слоя шва методом УКП. Результаты работы использованы при создании Р Газпром 15-2.1-007-2024 «Сварка и неразрушающий контроль сварных соединений. Технология автоматической сварки неповоротных кольцевых стыковых соединений магистральных трубопроводов с применением роботизированного саморегулируемого комплекса».

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием научно-обоснованных и апробированных методик экспериментальных исследований. Использованием современного сертифицированного и аттестованного оборудования, программных пакетов обработки данных, а также большим объемом выполненных экспериментов.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались на международной научно-технической конференции «Инновационные технологии, оборудование и материалы заготовительных производств в машиностроении» (МГТУ имени Н.Э. Баумана) в 2022 г., на XV Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении» (МГТУ имени Н.Э. Баумана) в 2023 г., на XI-м отраслевом совещании «Состояние и основные направления развития сварочного производства ПАО «Газпром» (Сварка-2022) (ООО «Газпром ВНИИГАЗ») в 2022 г., на международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилёв, Беларусь) в 2023 г. и на научном семинаре кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2024 г.

**Личный вклад автора.** Автор выполнил цикл теоретических и экспериментальных исследований, обработал и проанализировал результаты и сделал выводы, подтверждающие достижение цели исследований. Разработал методику корректировки траектории движения сварочной горелки при наличии в свариваемом стыке возмущений по сборке. Участвовал в разработке и испытаниях опытного образца для автоматической сварки неповоротных кольцевых стыков труб с интегрированной методикой.

Автором по результатам работы подготовлены и сделаны доклады на научных конференциях. Основные результаты диссертации опубликованы

в 3 научных работах общим объемом 1 п.л., из них 2 работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, получен 1 патент РФ.

**Объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе и списка литературы из 122 наименований. Диссертация изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 114 рисунков и 2 таблиц.

### **Содержание работы**

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена технологиям сварки корневого слоя шва неповоротных кольцевых сварных швов, применяемых при монтажной сварке магистральных трубопроводов. Рассмотрены проблемы формирования корневого слоя шва при сварке неповоротных кольцевых сварных соединений.

Одной из основных проблем при сварке магистральных трубопроводов является обеспечение требований по сборке. Трубы, поставляемые на объекты строительства, имеют допуски на геометрические параметры, которые усложняют качественную сборку свариваемых кромок перед сваркой. Кроме того, в процессе сварки за счет усадки происходят изменения параметров сборки, установленных перед сваркой. Частично эти проблемы решаются применением мощных центрирующих устройств и квалификацией сварщика-оператора.

Сварка корневого слоя шва производится с применением различных методов дуговой сварки в среде защитных газов короткой дугой. Для обеспечения качественного формирования корневого слоя шва в различных пространственных положениях сварку выполняют на импульсных режимах (STT, WiseRoot, УКП и др.). Такие технологии позволяют не только снизить разбрзгивание электродного металла, но и уменьшить тепловложение в сварочную ванну, что создаёт благоприятные условия формирования корневого слоя шва в различных пространственных положениях. Все указанные методы основаны на одном принципе: обеспечение переноса капель электродного металла за счёт сил поверхностного натяжения. Такой тип переноса электродного металла обеспечивается за счёт применения импульсной сварки с управляемой формой импульса.

На формирование корневого слоя шва оказывает влияние появление смещения свариваемых кромок или изменение зазора. При этом данные параметры могут изменяться одновременно, что усиливает влияние на формирование и может привести к образованию дефектов корневого слоя. Компенсировать данные факторы без изменения параметров режима сварки или использования технологических приемов невозможно.

Рассмотрены технологические приемы обеспечения формирования корневого слоя шва при сварке в различных пространственных положениях и при наличии возмущений по геометрии сборки свариваемых стыков. Проанализированные технологические приемы преимущественно относятся к способам сварки, отличным от методов сварки короткой дугой с применением

импульсных источников питания. При сварке плавящимся электродом в среде защитных газов отмечено положительное влияние применения поперечных колебаний электрода и сварочной дуги на формировании швов в вертикальном и потолочном пространственных положениях. Наличие колебаний препятствует образованию прожога и стеканию металла сварочной ванны, а при сварке в различных пространственных положениях за счет изменения параметров колебаний возможно получение одинаковой формы шва без изменения основных параметров режима.

Определены основные принципы управления формированием корневого слоя шва за счет изменения траектории перемещения сварочной горелки: амплитуда поперечных колебаний, скорость сварки вдоль свариваемых кромок, скорость поперечных колебаний сварочной горелки и время задержки на кромках. Результаты выполненного анализа послужили основанием для постановки цели работы и задач исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке методики проведения экспериментальных исследований по определению влияния пространственного положения, смещения и зазора свариваемых кромок на формирование корневого слоя шва при сварке методом УКП. Экспериментальные исследования проводили в 3 этапа:

На первом этапе исследовали влияние пространственного положения и параметров сборки (смещение и зазор свариваемых кромок) сварного соединения перед сваркой на формирование корневого слоя шва при сварке методом УКП. Целью первого этапа было определить условия при которых нет необходимости вводить корректирующее управление.

На втором этапе определяли корректирующие параметры, позволяющие сформировать корневой слой шва во всех пространственных положениях при изменяемых параметрах смещения и зазора свариваемых кромок. Полученные на первом этапе данные позволяют получить представление о формировании корневого слоя шва при сохранении постоянных параметров по сборке и пространственном положении. Однако в процессе сварки неповоротного стыка труб параметры сборки не остаются постоянными. По полученным данным необходимо разработать технологические приемы, которые будут компенсировать изменение зазора и смещения кромок в процессе сварки корневого слоя.

На третьем этапе производили отработку предложенных алгоритмов управления при сварке методом УКП неповоротных соединений труб и при изменения зазора и смещения свариваемых кромок. Сварка плоских образцов не позволяет получить полную картину формирования корневого слоя шва на всем периметре свариваемого стыка. Поэтому необходимо отработать разработанные технологические приемы компенсации изменения зазора, смещения и пространственного положения при сварке неповоротных кольцевых стыковых соединений труб при переменных значениях зазора и смещения свариваемых кромок.

Исследования проводили при сварке корневого слоя шва методом УКП с использованием комплекса УАСТ-1 «Альфа» производства НПП «Технотрон».

Для проведения исследований на первом и втором этапе был разработан специальный стенд, который позволяет выполнять сварку плоских сварных соединений в различных пространственных положениях с использованием комплекса УАСТ-1 «Альфа». Сварку образцов проводили в 5 основных пространственных положениях: нижнее, вертикальное «на спуск» с углом наклона плоскости сварки относительно горизонтальной поверхности  $45^\circ$  и  $90^\circ$  и потолочное с углом наклона  $135^\circ$  и  $180^\circ$ .

В результате экспериментов было установлено, что изменение пространственного положения при сварке методом УКП оказывает влияние на формирование корневого слоя шва. Наибольшие ширина и высота усиления обратного валика наблюдаются при сварке в нижнем пространственном положении. Наименьшая высота выпуклости обратной стороны наблюдается в потолочном положении с углом наклона  $180^\circ$ , а наименьшая ширина выпуклости – в вертикальном с углом наклона  $90^\circ$ .

Было установлено, что формирование корневого слоя шва методом УКП зависит от зазора между свариваемыми кромками. При сварке на постоянном зазоре существуют диапазоны значений величины зазора, в которых не удается получить качественное формирование корневого слоя шва без образования непровара или прожога кромок. При этом, в процессе сварки необходимо применять поперечные колебания сварочной горелки и производить корректировку амплитуды колебаний при изменении зазора между кромками.

При сварке сварных соединений с зазором менее 2,7 мм формируется непровар свариваемых кромок на всей длине сварного шва. При таком значении зазора сварочная дуга не проникает в разделку, что не позволяет расплавить притупление разделки кромок. Изменение скорости сварки не позволяет решить эту проблему, что говорит о невозможности формирования корневого слоя шва при зазоре свариваемых кромок менее 2,7 мм.

Сварка сварных соединений с зазором от 2,7 мм позволяет получить полное проплавление свариваемых кромок. При этом в диапазоне значений зазора от 2,7 до 3,0 мм проплавление возможно получить на всем свариваемом участке, однако выпуклость корня шва составляет менее 0,5 мм. При зазоре свариваемых кромок в диапазоне от 3,0 до 3,5 мм удается получить стабильное формирование корневого слоя шва на всем протяжении сварного шва. Выпуклость корня шва находится в диапазоне от 1,0 до 1,5 мм. При сварке сварных соединений с зазором более 3,5 мм нарушается формирование корневого слоя шва, поэтому требуется применение поперечных колебаний.

Исследования показали, что при сварке во всех пространственных положениях значение амплитуды колебаний должно составлять  $\frac{1}{2}$  от величины зазора между кромками. Это обусловлено тем, что при превышении амплитуды колебаний сварочная дуга отходит от притупления на большее расстояние в сторону скоса кромок и происходит частичное расплавление верхней части притупления кромок. Количество теплоты, сообщаемого сварочной дугой методом УКП, недостаточно для полного расплавления свариваемых кромок в данном месте: часть теплоты поглощается скосом свариваемых кромок, образуется сварочная ванна, расплавленный металл, которой затекает в зазор

между свариваемыми кромками. Дальнейшее увеличение амплитуды колебаний ухудшает проплавление свариваемых кромок, что приводит к несплавлению основного и наплавленного металлов в зоне сварки.

Уменьшение амплитуды колебаний приводит к формированию прожога, что связано с появлением сварочной дуги только в зоне притупления, не заходя на скос кромки. При дальнейшем уменьшении амплитуды колебаний электродная проволока не доходит до края притупления и пробивает сварочную ванну насеквось рядом с кромкой в процессе сварки.

Исследование влияние смещения свариваемых кромок на формирование корневого слоя шва методом УКП показало, смещение свариваемых кромок до значения 0,5 мм не оказывает влияние на формирование корневого слоя шва. Увеличение смещения свариваемых кромок более 0,5 мм приводит к образованию непровара на удаленной от сварочной горелки по высоте кромке, при этом величина непровара прямо пропорциональна величине смещения кромок. Так, при сварке образцов с притуплением 1,8 мм непровар удаленной кромки составляет 35% от величины смещения кромок.

**Третья глава** посвящена анализу условия равновесия сварочной ванны в зависимости от пространственного положения, при изменяющимся зазоре.

Условием равновесия сварочной ванны является равновесие сил, действующих на нее. К таким силам относятся сила тяжести сварочной ванны  $G_B$ , сила давления дуги  $P_{dd}$  и силы поверхностного натяжения с лицевой и обратной стороны сварочной ванны  $P_{ph}^B$  и  $P_{ph}^H$ . Уравнение равновесия сварочной ванны в общем виде можно записать в следующем виде:

$$\bar{G}_B + \bar{P}_{dd} + \bar{P}_{ph}^B + \bar{P}_{ph}^H = 0 \quad (1)$$

В зависимости от пространственного положения направления действия сил изменяются, следовательно, происходит изменение условия равновесия. При этом, в процессе решения задачи обеспечения равновесия сварочной ванны в различных пространственных положениях существует ряд неопределенностей:

1. Размер и форма сварочной ванны зависят от пространственного положения при сварке, следовательно, при смене положения происходит изменение сил поверхностного натяжения.

2. Размер и форма сварочной ванны также зависят от зазора между свариваемыми кромками. При изменении зазора происходит изменение сил поверхностного натяжения.

3. Отсутствует информация о силе давления сварочной дуги при сварке методом УКП.

4. При сварке в различных пространственных положениях происходит изменение не только направления сил, действующих на сварочную ванну, но и их величины.

Из проведенного анализа следует необходимость установления сил, действующих на сварочную ванну, и определение их зависимостей от зазора между свариваемыми кромками и пространственного положения при сварке. Силы поверхностного натяжения в различных пространственных положениях, а

также силу давления дуги определяли расчетно- экспериментальным методом. Для этого были проведены две дополнительные серии экспериментов.

В первой серии экспериментов производилась сварка корневого слоя шва пластин в нижнем пространственном положении с постоянным зазором 3 мм, 3,2 мм, 3,5 мм, 3,6 мм и 3,7 мм. Сварка осуществлялась с постоянными параметрами режима. В процессе сварки образца при движении сварочной головки с установленной скоростью производилось резкое гашение сварочной дуги без заварки кратера. Далее изготавливались шлифы поперечного сечения полученных кратеров, откуда определяли параметры сварочной ванны. По полученным геометрическим параметрам производился расчет сил поверхностного натяжения с лицевой и обратной стороны.

$$P_{\text{пп}}^{\text{B}} = \frac{4\pi\sigma_{\text{B}}R_{\text{B}}C_{\text{B}}}{\sqrt{R_{\text{B}}^2+4C_{\text{B}}^2}} \quad (2)$$

Где:

$P_{\text{пп}}^{\text{B}}$ - сила поверхностного натяжения с лицевой стороны сварочной ванны [Н];

$\sigma_{\text{B}}$ -поверхностное натяжение с лицевой стороны [Н/м];

$R_{\text{B}}$ -радиус сварочной ванны [м];

$C_{\text{B}}$ -радиус кривизны поверхности сварочной ванны с лицевой стороны [м].

$$P_{\text{пп}}^{\text{H}} = \frac{4\pi\sigma_{\text{H}}R_{\text{B}}C_{\text{H}}}{\sqrt{R_{\text{B}}^2+4C_{\text{H}}^2}} \quad (3)$$

Где:

$P_{\text{пп}}^{\text{H}}$ - сила поверхностного натяжения с лицевой стороны сварочной ванны [Н];

$\sigma_{\text{H}}$ -поверхностное натяжение с обратной стороны [Н/м];

$R_{\text{B}}$ -радиус сварочной ванны[м];

$C_{\text{H}}$ -радиус кривизны поверхности сварочной ванны с обратной стороны [м].

По полученным данным была построена зависимость изменения суммы сил поверхностного натяжения с увеличением зазора  $P_{\text{пп}}^{\Sigma} = f(b)$  (Рисунок 1).

Где:

$$P_{\text{пп}}^{\Sigma} = P_{\text{пп}}^{\text{H}} + P_{\text{пп}}^{\text{B}} \quad (4)$$

Было установлено, что увеличение зазора приводит к увеличению сил поверхностного натяжения. Для полученной зависимости была построена регрессионная модель, позволяющая осуществить прогнозирование изменения суммы сил поверхностного натяжения с лицевой и обратной стороны с увеличением зазора:

$$P_{\text{пп}}^{\Sigma} = 4 * 10^{-3} * b + 8,8 * 10^{-3} \quad (5)$$

Во второй серии экспериментов производилась сварка корневого слоя шва пластин с зазором 3 мм в различных пространственных положениях (с углом наклона относительно горизонтальной плоскости ( $\alpha$ ) сварочного стенда 0, 45°, 90 °, 135 ° и 180 °). Сварку проводили с резким гашением дуги без заварки кратера, а затем по макроструктуре анализировали геометрические параметры сварочной ванны. По полученным значениям осуществлялся расчет сил поверхностного

натяжения сварочной ванны. По рассчитанным значениям сил поверхностного натяжения установили зависимость суммы сил поверхностного натяжения сварочной ванны от пространственного положения  $P_{\text{ПВ}}^{\Sigma} = f(\alpha)$  (Рисунок 2). По полученным данным была построена регрессионная модель зависимости сил поверхностного натяжения от пространственного положения:

$$P_{\text{ПВ}}^{\Sigma} = 3.29 * 10^{-9} * \alpha^3 - 6.42 * 10^{-7} * \alpha^2 - 3.78 * 10^{-7} * \alpha + 2.08 * 10^{-2} \quad (6)$$

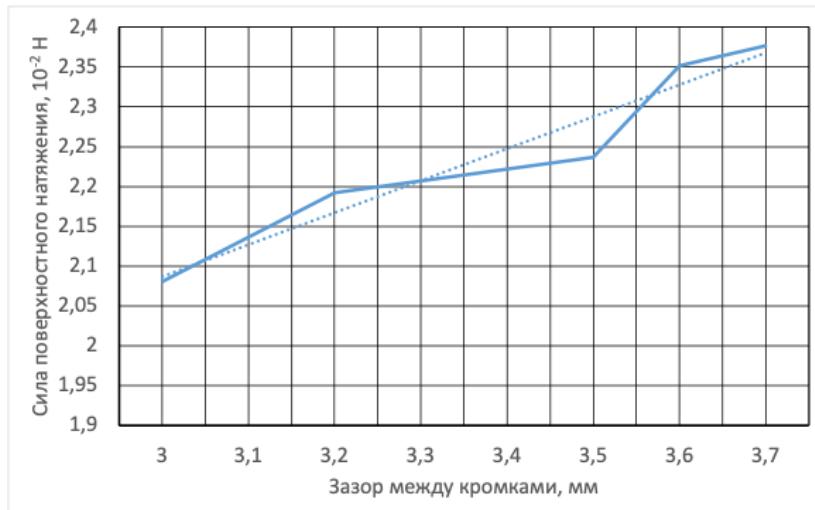


Рисунок 1. Влияние величины зазора между свариваемыми кромками на силы поверхностного натяжения

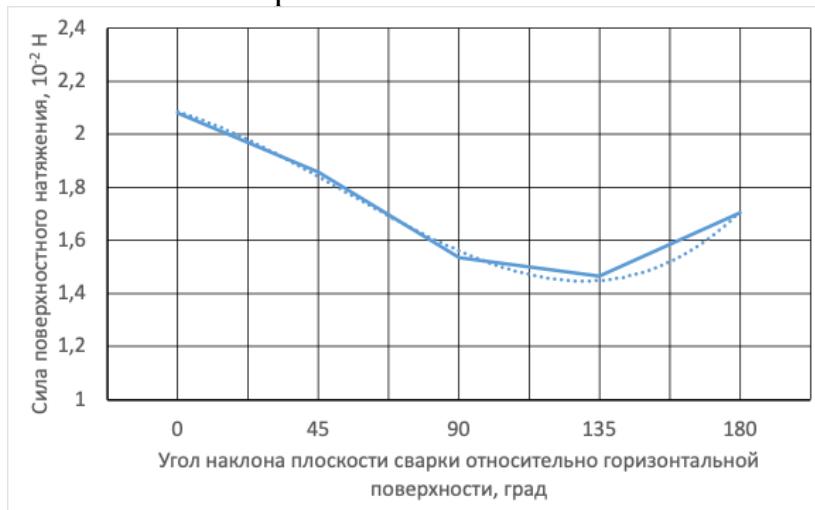


Рисунок 2. Влияние пространственного положения на силы поверхностного натяжения

На основании полученных результатов была определена модель зависимости сил поверхностного натяжения от зазора и пространственного положения  $P_{\text{ПВ}}^{\Sigma} = f(b, \alpha)$  (Рисунок 3):

$$P_{\text{ПВ}}^{\Sigma} = 3.29 * 10^{-9} * \alpha^3 - 6.42 * 10^{-7} * \alpha^2 - 3.78 * 10^{-7} * \alpha + 2.08 * 10^{-2} + (b - 3) * (5.49 * 10^{-11} * \alpha^3 - 1.9 * 10^{-7} * \alpha^2 - 1.08 * 10^{-5} * \alpha + 3.91 * 10^{-3}) \quad (7)$$

При анализе образцов также определяли площадь поперечного сечения сварочной ванны как сумму площади поперечного сечения наплавленного металла и площади зоны сплавления с учетом ширины и высоты прогиба наплавленного валика с лицевой и обратной стороны. Длину сварочной ванны

также определяли при анализе образцов. Далее находили вес сварочной ванны по формуле:

$$G_{\text{в}} = F_{\text{пр}} L_{\text{в}} \rho g \quad (8)$$

Где:

$F_{\text{пр}}$  – площадь поперечного сечения сварочной ванны [ $\text{м}^2$ ];

$L_{\text{в}}$  – длина сварочной ванны [м];

$\rho$  – плотность металла [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ]

$g$  – ускорение свободного падения [ $\text{м}/\text{с}^2$ ].

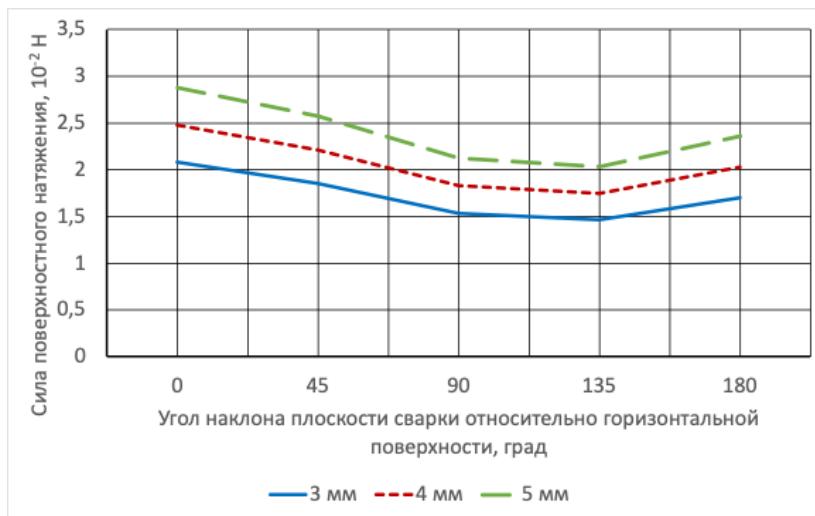


Рисунок 3. Влияние зазора между свариваемыми кромками и пространственного положения на силы поверхностного натяжения.

Силу давления дуги определили из условия равновесия сварочной ванны для полученных образцов в нижнем пространственном положении по формуле:

$$P_{\text{дд}} = P_{\text{пв}}^{\Sigma} - G_{\text{в}} \quad (9)$$

Далее по полученной зависимости суммы сил поверхностного натяжения от зазора и пространственного положения определяли необходимый вес сварочной ванны для соблюдения условия равновесия при зазоре 3 мм, 4 мм и 5 мм. Длину сварочной ванны рассматривали как функцию от тепловой мощности источника, которую определили из осциллограмм тока и напряжения при сварке корневого слоя шва, и скорости сварки:

$$L_{\text{в}} = \frac{q^2}{4\pi\lambda c\rho v_{\text{св}}\delta^2\Delta T^2 K_{\text{пд}}} \quad (10)$$

Где:

$q$  – эффективная мощность источника теплоты [Вт];

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала [Вт/м\*К];

$c$  – удельная теплоемкость материала [Дж/г\*К];

$\delta$  – толщина свариваемого металла [м];

$\Delta T$  – изменение температуры [К];

$v_{\text{св}}$  – скорость сварки [м/с];

$K_{\text{пд}}$  – поправочный коэффициент длины ванны.

Площадь проплавления также рассматривали как функцию от скорости сварки:

$$F_{\text{пр}} = F_3 \frac{v_{\text{пп}}}{v_{\text{св}}} (1 - \psi) K_{\text{пр}} \quad (11)$$

Где:

$F_3$  – площадь сечения электродной проволоки [ $\text{м}^2$ ]

$v_{\text{пп}}$  – скорость подачи проволоки [ $\text{м}/\text{с}$ ];

$\psi$  – коэффициент потерь металла на разбрызгивание и угар;

$K_{\text{пр}}$  – коэффициент проплавления.

Подставляя (10) и (11) в (8), выражаем и определяем необходимую скорость сварки:

$$v_{\text{св}} = \sqrt{\frac{F_3 v_{\text{пп}} (1 - \psi) K_{\text{пр}} q^2 g}{4 \pi \lambda G_{\text{в}} \delta^2 \Delta T^2 K_{\text{пп}}}} \quad (12)$$

На основании проведенных расчетов были проведены эксперименты, в которых производилась сварка корневого слоя шва с рассчитанными значениями скорости сварки. Помимо этого, для заданных скоростей сварки производилась корректировка скорости поперечных колебаний сварочной горелки от 10 до 50 мм/с. На основании проведенных экспериментов и полученных данных были установлены зависимости между зазором, скоростью сварки, скоростью поперечных колебаний сварочной горелки и пространственного положения (Рисунок 4):

$$v_{\text{св}} = 3 - 0,2 * b + K_{\text{пп}} \quad (13)$$

$$v_{\text{кол}} = (3 - v_{\text{св}} + K_{\text{пп}}) * 50 \quad (14)$$

Где:

$b$  – зазор между свариваемыми кромками [ $\text{м}$ ];

$K_{\text{пп}}$  – коэффициент пространственного положения.

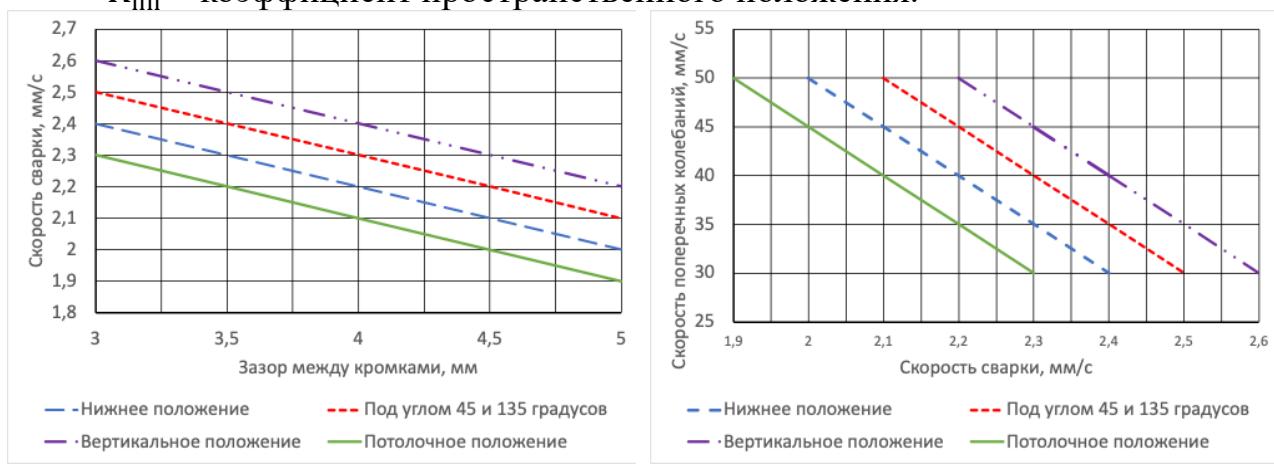


Рисунок 4. Предложенные зависимости по зазору: а) зависимость скорости сварки от зазора и пространственного положения; б) зависимость скорости колебаний от скорости сварки и пространственного положения

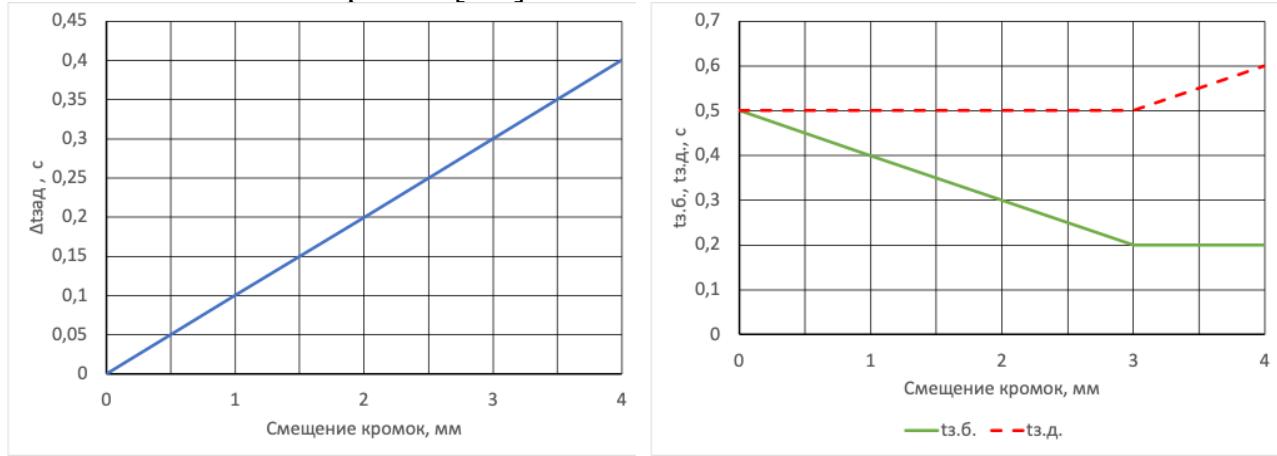
При сварке образцов со смещением кромок производилась корректировка времени задержки на кромках в зависимости от величины смещения кромок. Было установлено, что уменьшение времени задержки на ближней кромке положительно влияет на проплавление удаленной кромки. Полное проплавление удаленной кромки наблюдается при разнице времени задержки на кромках, составляющей 0,1 с на 1 мм смещения. Таким образом, предложено уменьшать

время задержки на ближней кромке, при сохранении постоянного времени на удаленной при смещении до 3 мм, при смещении более 3 мм дополнительно увеличить время задержки на удаленной кромке без последующего уменьшения времени на ближней (Рисунок 5):

$$\Delta t = 0,1 * c \quad (15)$$

Где:

$\Delta t$  – разница времени задержки на кромках [с];  
с – смещение кромок [мм].



а)

б)

Рисунок 5. Предложенные зависимости по смещению: а) зависимость разницы времени задержки на кромках от величины смещения; б) зависимость времени задержки на удаленной и приближенной кромках от величины смещения

Таким образом, был найден алгоритм изменения траектории движения сварочной горелки в зависимости от смещения и зазора свариваемы кромок. Предложенный алгоритм был апробирован при сварке сварных соединений неповоротных сварных соединений труб. Проводили сварку труб диаметром 1220 мм с толщиной стенки 19 мм. В результате проведенных экспериментов удалось получить сварные соединения с зазором свариваемых кромок до 5,2 мм (Рисунок 6, а) и смещением кромок до 3 мм (Рисунок 6, б).



Рисунок 6. Макрошлифы полученных сварных соединений: а) с зазором 5,2 мм, б) со смещением кромок 3 мм

**Четвертая глава** посвящена разработке комплекса для автоматической сварки неповоротных стыков труб магистральных газопроводов с разработанным

алгоритмом корректировки траектории движения сварочной горелки и интеграции данного алгоритма в комплекс.

Для слежения за стыком сварочная головка была дополнительна оснащена лазерным триангуляционным датчиком. Лазерный датчик в процессе сканирования получает данные о геометрических параметрах собранного стыка и анализирует действительные значения зазора и смещения кромок в каждой точке. Сканирование разделки производится в процессе сварки на расстоянии 150-200 мм от сварочной горелки, что позволяет учитывать деформации от усадки сварного шва.

Для работы системы были разработаны программа управления сварочным комплексом и программа распознавания и слежения за свариваемым стыком (Рисунок 7). По полученным данным о зазоре между кромками система производит корректировку амплитуды и центра колебаний сварочной горелки, скорости сварки и скорости колебаний сварочной горелки с учетом пространственного положения. Полученные данные о смещение кромок позволяют системе осуществить корректировку времени задержки на кромках. Помимо этого, разработанная система наведения позволяет осуществлять наведение и слежение за стыком не только в процессе сварки корневого слоя шва, но и при сварке заполняющих и облицовочных слоев.

а)



б)

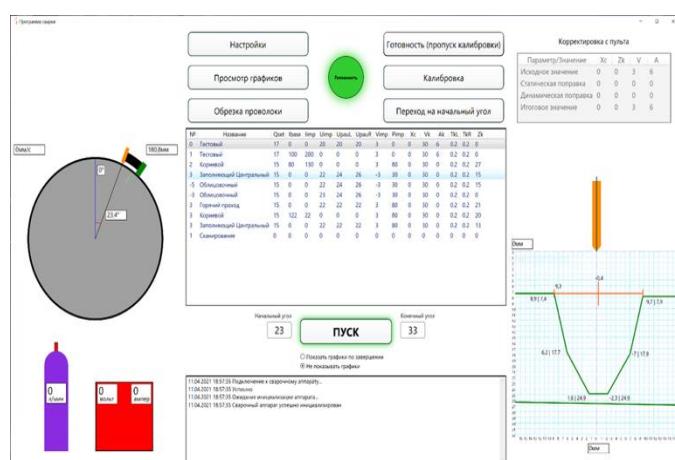


Рисунок 7. Разработанные программы: а) слежения за профилем стыка; б) управления сварочным комплексом

Были проведены испытания сварочного комплекса (Рисунок 8), в ходе которых осуществлялась сварка неповоротных кольцевых стыков труб диаметром 1220 мм с толщиной стенки 19 мм. Стыки собирались с зазором от 3 мм до 5 мм со смещением кромок от 0 до 3 мм. Полученные сварные соединения после сварки испытывались с применением неразрушающих (визуальный и измерительный, ультразвуковой и рентгенографический) и разрушающих (статической растяжение, статический изгиб, ударный изгиб, твердость) методов контроля. По результатам проведенных испытанийстыки были признаны удовлетворяющими требованиям нормативной документации ПАО «Газпром».



Рисунок 8. Разработанный комплекс для сварки неповоротных стыковых соединений труб

#### **Основные выводы и результаты:**

1. Установлено, что пространственное положение также влияет на формирование корневого слоя шва при сварке методом УКП, как и при сварке плавящимся электродом в среде защитных газов длинной дугой. Однако степень этого влияния ниже при использовании метода УКП, что связанно с меньшим объемом сварочной ванны.

2. Установлено, что при сварке методом УКП невозможно добиться отсутствия непровара при зазоре свариваемых кромок менее 2,7 мм.

3. Качественное формирование корневого слоя при сварке с постоянными параметрами режима без корректировки траектории движения сварочной горелки возможно при значении зазора свариваемых кромок в диапазоне выше 2,7 мм до 3,7 мм. При этом сварку методом УКП неповоротного кольцевого сварного шва с зазором свариваемых кромок от 3,0 до 3,5 мм рекомендуется осуществлять с поперечными колебаниями амплитудой, равной  $\frac{1}{2}$  от величины зазора.

4. При сварке методом УКП неповоротного кольцевого сварного шва с зазором свариваемых кромок выше 3,5 мм необходимо осуществлять с поперечными колебаниями амплитудой равной  $\frac{1}{2}$  от величины зазора.

5. Установлено, что изменение амплитуды колебаний является необходимым, но недостаточным условием качественного формирования корневого слоя шва при увеличении величины зазора.

6. Для определения управляющих воздействий были построены регрессионные модели связывающие силы поверхностного натяжения сварочной ванны с величиной зазора между кромками ( $P_{\text{пв}}^{\Sigma} = 4 * 10^{-3} * b + 8,8 * 10^{-3}$ ), силы поверхностного натяжения с пространственным положением при сварке ( $P_{\text{пв}}^{\Sigma} = 3.29 * 10^{-9} * \alpha^3 - 6.42 * 10^{-7} * \alpha^2 - 3.78 * 10^{-7} * \alpha + 2.08 * 10^{-2}$ ) и силы поверхностного натяжения с зазором и пространственным положением при сварке ( $P_{\text{пв}}^{\Sigma} = 3.29 * 10^{-9} * \alpha^3 - 6.42 * 10^{-7} * \alpha^2 - 3.78 * 10^{-7} * \alpha + 2.08 * 10^{-2} + (b - 3) * (5.49 * 10^{-11} * \alpha^3 - 1.9 * 10^{-7} * \alpha^2 - 1.08 * 10^{-5} * \alpha + 3.91 * 10^{-3})$ ).

7. Исходя из обеспечения равновесия сварочной ванны определены требуемые скорости сварки в зависимости от пространственного положения и зазора между свариваемыми кромками.

8. Было установлено, что помимо изменения амплитуды колебаний и скорости сварки при изменении зазора между свариваемыми кромками необходимо производить корректировку скорости колебаний сварочной горелки.

9. При увеличении зазора необходимо уменьшать скорость сварки на 0,1 мм/с на каждые 0,5 мм зазора, а скорость колебаний увеличивать на 1 мм/с на каждые 0,1 мм зазора.

10. Смещение свариваемых кромок влияет на формирование корневого слоя шва при сварке методом УКП в различных пространственных положениях при его значении более 0,5 мм, что приводит к неравномерному наплавлению металла и непровару удаленной кромки. При этом величина непровара составляет 35% от величины смещения кромок.

11. При смещении кромок до 3 мм необходимо производить уменьшение времени задержки на ближней кромке на 0,1 с на каждый 1 мм смещения, при смещении от 3 до 4 мм необходимо дополнительно увеличить время задержки на удаленной кромке на 0,1 с.

12. Установлены предельные значения зазора свариваемых кромок в сварных соединениях, при которых возможно сформировать корневой слой шва при использовании разработанного алгоритма управления – от 2,7 до 5,2 мм

13. Установлены предельные значения смещения свариваемых кромок в сварных соединениях, при которых возможно сформировать корневой слой шва при использовании разработанного алгоритма управления – от 0 до 3,7 мм

14. Разработана программа для сканирования разделки свариваемых кромок с применением лазерного триангуляционного датчика, предоставляющая информацию об изменении зазора между свариваемыми кромками и смещения кромок.

15. Разработана программа наведения сварочной горелки на свариваемый стык при изменении параметров сборки кромок свариваемого стыка.

16. Разработанные программы осуществляют сканирование и наведение сварочной горелки в режиме реального времени в процессе сварки, что позволяет учитывать изменение параметров сборки, возникающих из-за действия сварочных напряжений и деформаций.

17. Разработанные программы внедрены в автоматический комплекс для сварки неповоротных кольцевых стыков труб большого диаметра. Сварочный комплекс и технология сварки неповоротных кольцевых стыков труб магистральных газопроводов с применением данного комплекса прошли апробацию и внедрены в ПАО «Газпром».

**Список опубликованных работ по теме диссертации:**

1. Роботизированный саморегулируемый комплекс для сварки неповоротных кольцевых стыковых соединений трубопроводов большого диаметра /Крючков П.А. [и др.]. Состояние и основные направления развития сварочного производства ПАО «Газпром»: Материалы IX отраслевого совещания (п. Развилка, Московская область, 22-26 августа 2022 г.). СПб.: ООО «Газпром экспо», 2022. 67-73 с. (0,45 п.л./0,2 п.л.).

2. Крючков П.А. Коберник Н. В., Гуркин С. В. Влияние зазора на формирование корневого слоя шва при сварке плавящимся электродом в среде защитных газов с управляемым каплепереносом // Сварка и диагностика. 2024. № 2. С. 56-60. (0,3 п.л./0,2 п.л.).

3. Крючков П.А. Коберник Н. В., Гуркин С. В. Влияние смещения свариваемых кромок на формирование корневого слоя шва способом УКП при сварке неповоротных стыков труб // Сварка и диагностика. 2024. № 4. С. 51-54. (0,25 п.л./0,15 п.л.).

4. Патент № 2817272 С1 Российская Федерация, МПК B23K 31/02, B23K 9/10, B23K 9/095. Роботизированный саморегулируемый сварочный комплекс и способ дуговой сварки неповоротных стыковых соединений трубопроводов большого диаметра: № 2023109066 : заявл. 10.04.2023 : опубл. 12.04.2024 / Крючков П.А. [и др.].