*на правах рукописи*

**Шварц Михаил Валерьевич**

# РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АДАПТАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ КОРНЕВОГО СЛОЯ ШВА КОЛЬЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2017

Работа выполнена на кафедре технологий сварки и диагностики МГТУ имени. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

**ГЛАДКОВ Эдуард Александрович**

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор

**САС Анатолий Васильевич**

РГУ нефти и газа имени И.М.Губкина,
кафедра сварки и мониторинга нефтегазовых сооружений, профессор

Кандидат технических наук

**ТЕРЕНТЬЕВ Егор Валериевич**

НИУ «МЭИ»,
кафедра технологии металлов, доцент

Ведущая организация: **Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону)**

Защита состоится «23» марта 2017 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 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) 267-09-63.

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 «____» _____ 2017 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета
д.т.н., доцент Коновалов А.В.

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время вопросы строительства и эксплуатации конструкций трубопроводного транспорта нефти и газа являются одними из ключевых в отечественной экономике. Основным, наиболее сложным и в тоже время, определяющим технологическим процессом при строительстве трубопроводных систем является сварка элементов трубопровода, и, в частности, сварка кольцевых стыков линейной части. Научные и инженерные решения в области технологий и соответствующего сварочного оборудования являются основополагающими в широком комплексе работ при строительстве трубопроводов, а возрастающие темпы производства работ, стремление к обеспечению стабильности качества приводят к неизбежному увеличению доли автоматических сварочных процессов по отношению к ручной сварке. Наиболее ответственным и трудоёмким этапом проведения комплекса сварочно-монтажных работ при строительстве магистральных трубопроводов является выполнение сварки корневого слоя шва кольцевых сварных соединений. Именно на этом этапе, качество сварного соединения является наиболее подверженным влиянию возмущений различной природы, что существенно осложняет автоматизацию процесса сварки, которая традиционно требует установленных алгоритмов управления, отображающих внутренние взаимосвязи процесса. Многомерность и многосвязность процесса сварки корневого слоя шва существенно усложняет поиск и формализацию данных зависимостей, поэтому на настоящий момент, сварка корневого слоя шва если и проводится с помощью автоматического оборудования, то оператор оборудования постоянно корректирует процесс сварки в соответствии со своими навыками, опытом и интуицией, - которые позволяют ему управлять процессом в условиях неполной, нечеткой информации, в условиях неопределённости. Эта отличительная способность оператора оборудования привела к возникновению нового направления в области автоматических сварочных процессов – интеллектуальных методов управления, которые позволяют расширить возможности автоматизации процессов за пределы традиционной теории.

Анализ и исследование подходов к интеллектуальному управлению процессами формирования сварного соединения является комплексной научной и инженерной задачей, объединяющей последние достижения в области технологий и оборудования сварочного производства, следящих систем и теории автоматического управления. Для успешного решения данной задачи, и в частности, применительно к наиболее сложному процессу сварки корневого слоя шва, требуется исследование и разработка научно-обоснованных подходов к построению интеллектуальных сварочных систем с адаптивным управлением, объединяющих анализ базовых автоматических сварочных процессов, поиск априорных знаний, их формализацию, обработку и реализацию в системах управления сварочным оборудованием.

**Цель работы** - повышение качества формирования коневого слоя шва стыковых кольцевых соединений магистральных трубопроводов в автоматическом

режиме на основе исследований и реализации алгоритмов адаптивного управления процессом сварки.

**Задачи исследований:**

1. Исследование значений разброса геометрических параметров сборки стыка магистральных трубопроводов и их влияния на формирование сварного соединения в процессе сварки корневого слоя шва.

2. Определение перечня управляющих воздействий, и разработка способа формализации законов управления процессом сварки корневого слоя шва в случае возмущений геометрии стыка.

3. Разработка способа обеспечения непрерывности синтеза управляющих воздействий на основе установленных законов управления процессом сварки корневого слоя шва.

4. Рассмотрение прикладных аспектов интеграции системы слежения за стыком и автоматического сварочного оборудования в задаче адаптивного управления формированием корневого слоя шва.

5. Разработка научно-обоснованной методики адаптации технологии автоматической сварки корневого слоя шва к геометрическим возмущениям сборки стыка.

**Методы исследования:** в работе применялись методы статистической обработки и средств инженерного анализа программного комплекса Matlab. При проведении экспериментов использовался адаптивный сварочный комплекс ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана» дооснащенный оптической системой слежения.

**Ценность выполненных исследований:** доказана практическая возможность реализации полностью автоматического сварочного оборудования с непрерывным адаптивным управлением формированием корневого слоя шва в зависимости от геометрии сборки стыка. Разработана методика адаптации процесса сварки корневого слоя шва кольцевых соединений магистральных трубопроводов.

**Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:**

1. Установлены положительная корреляция между значением притупления кромок в стыке и критическим возмущением зазора и отрицательная корреляция между притуплением и критическим возмущением перекоса кромок.

2. Установлено, что законы управления процессом сварки корневого слоя шва могут быть формализованы в виде правил вида «если – то» посредством записи и последующего анализа действий оператора сварочного оборудования с учетом минимальных критических возмущений геометрии сборки для рассматриваемой технологии.

3. Разработан подход к непрерывному синтезу управляющих воздействий многомерной многосвязной системы «геометрия сборки – параметры режима сварки».

**Практическая значимость:** разработана методика адаптации технологии автоматической сварки корневого слоя шва, позволяющая непрерывно синтезировать управляющие воздействия процессом сварки и обеспечить

качественное формирование шва в условиях возмущений геометрии сборки стыка. Разработанные подходы позволят исключить влияние оператора сварочного оборудования на стабильность качества сварного соединения. По результатам диссертационной работы разработан и действует нормативный документ Р Газпром 2-2.2-655-2012 «Инструкция по применению адаптивной цифровой технологии автоматической сварки кольцевых стыков труб большого диаметра». Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре технологии сварки и диагностики МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты работы рекомендованы к внедрению в организациях, выполняющих сварочные работы на объектах трубопроводного транспорта ПАО «Газпром», ПАО «Транснефть».

**Достоверность** и точность результатов работы подтверждается использованием научно-обоснованных и апробированных методик инженерного анализа и обработки данных, результатами опытной верификации полученных теоретических результатов.

**На защиту выносятся:**

1. Критические значения возмущений зазора и перекоса кромок в стыке приводящие к дефектам формирования корневого слоя шва в процессе автоматической сварки.
2. Практический подход к формализации законов управления процессом сварки корневого слоя шва и обеспечению непрерывного синтеза управляющих воздействий многосвязной системы «геометрия сборки – параметры режима».
3. Комплексная методика адаптации технологии автоматической сварки корневого слоя шва, обеспечивающая качественное формирование шва в условиях возмущений геометрии сборки стыка.

**Апробация работы:** основные положения работы докладывались на научных семинарах кафедры технологии сварки и диагностики МГТУ им. Н.Э. Баумана (2012, 2016 г.), кафедры исследований материалов Университета Прикладных Наук Оффенбурга (Германия, 2012), кафедры технологий сварки Технического Университета Хемница (Германия, 2014) и на конференции «Наукоёмкие технологии и интеллектуальные системы» (Москва, 2011).

**Личный вклад соискателя** заключается в непосредственном участии в исследовательской работе по теме диссертации на всех её этапах. Им лично выполнен литературный обзор по теме диссертации, выполнены теоретические и экспериментальные исследования, проведены численные эксперименты, выполнена обработка результатов и их обобщение, подготовлены и сделаны доклады на конференциях и семинарах.

**Публикации по теме диссертации:** по теме диссертации опубликованы 3 научные работы, в том числе 2 в изданиях по перечню ВАК РФ, общим объёмом 1,95 п.л.

**Структура и объём диссертации:** диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы, содержащего 82 наименования и приложения. Диссертация представлена на 125 страницах и содержит 65 рисунков.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цели и задачи работы, научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** приведён обзор оборудования и технологий автоматической сварки корневого слоя шва кольцевых стыков магистральных трубопроводов. Выполнен анализ требований отраслевых нормативных документов к точности сборки стыка перед сваркой и к выбору конкретных значений параметров режима сварки стыка применительно к технологиям автоматической сварки корневого слоя шва. Отмечено, что качественная автоматическая сварка корневого слоя с помощью существующего оборудования возможна лишь при идеальной геометрии сборки стыка, что проблематично обеспечить в трассовых условиях, характерных для трубопроводного транспорта. Поэтому качество сварных соединений при автоматической сварке, как и при ручных способах, обеспечивается оператором сварочного оборудования, наблюдающего за процессом и корректирующего параметры режима в соответствии со своими навыками в диапазонах регламентированных нормативно-технической документацией. Далее в главе приведён литературный обзор существующих подходов к построению сварочных систем с адаптивным управлением, не требующих участия человека. Основной вклад в развитие адаптивных сварочных систем внесли: Гладков Э.А., Акулов А.И., Киселевский, Ф.Н., Березовский Б.М, Чернышов Г.Г., Перковский Р.А., Горбач В.Д., Суздалев И.В., Киселёв О.Н., Ерофеев В.А., Судник В.А, Трегубов Г.П. и другие.

В работах показано, что построение сварочного оборудования с адаптивным управлением неразрывно связано с решением задач разработки и интеграции следящих систем и получения законов управления процессом, обеспечивающих получение сварного соединения в соответствии с требованиями к изделию. В обзоре приведены особенности современных следящих систем на основе дуговых сенсоров и систем, работающих по принципу оптической триангуляции.

Однако, ключевым аспектом задачи адаптивного управления автоматическим сварочным оборудованием является установление взаимосвязи между возмущениями процесса сварки и управляющими воздействиями - получение законов управления. Сложность данной задачи заключается в том, что сварка - это многомерный многосвязный процесс с множеством входных и выходных параметров. Одним из способов получения законов управления и последующего синтеза управляющих воздействий является разработка численной математической модели процесса, позволяющей исследовать взаимосвязи параметров и получать необходимые зависимости. Однако, эффективность данных подходов резко снижается при рассмотрении конкретных производственных условий процесса сварки, когда количество взаимосвязанных параметров слишком велико. Поэтому, при использовании аналитических моделей многие исследователи и разработчики выбирают путь значительных упрощений моделей,

вплоть до кратких эмпирических зависимостей, которые подходят для конкретного случая и условий, но не всегда пригодны в практическом применении.

На практике более эффективным инструментом для получения зависимости между входными и выходными параметрами сложного процесса являются интеллектуальные методы. Вклад в развитие подходов к управлению сварочными процессами с использованием методов на основе искусственного интеллекта внесли Гладков Э.А., Перковский Р.А., Малолетков А.В., (Россия) Shan-Ben Chen, Jing Wu (Китай), YuKang Liu, G.E. Cook (США) и другие. Интеллектуальные методы часто используются на практике для разработки закрытых моделей, или моделей типа «черный ящик», при этом характеризуются высокой точностью и робастностью, так как параметры и структура моделей определяется на основе экспериментальных данных. Однако, это также является и основным недостатком систем этого типа, так как создание подобной системы всегда носит индивидуальный характер, при том что специфика моделируемого процесса не учитывается в архитектуре математической модели, отсутствуют универсальные подходы к использованию интеллектуальных методов в задаче управления формированием сварного соединения, и в частности корневого слоя шва, для которого это проблема стоит наиболее остро.

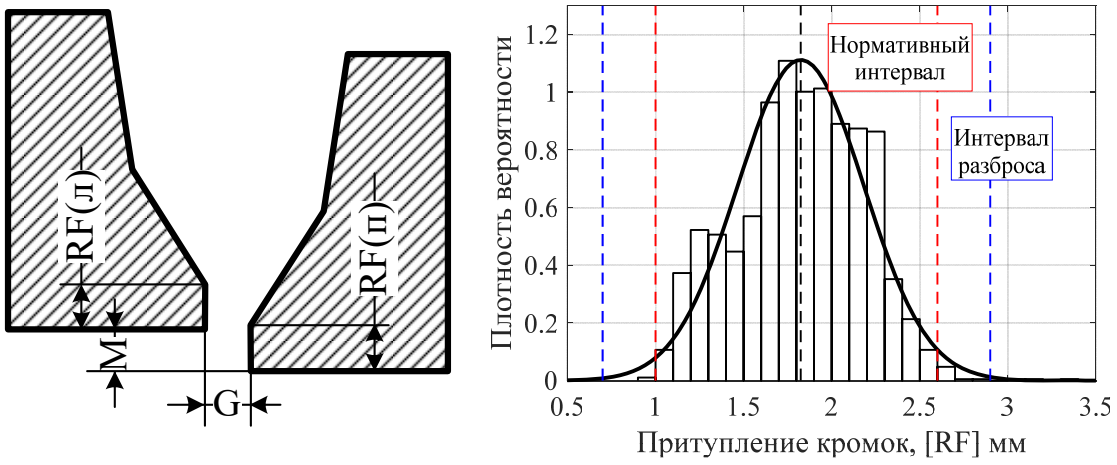
Для повышения качества сварных соединений трубопроводов в условиях возмущений геометрии сборки стыка при автоматической сварке корневого слоя необходима разработка научно-обоснованной методики адаптации технологии сварки корневого слоя шва к геометрическим возмущениям сборки стыка. В главе обоснована актуальность, поставлены цели и задачи исследований.

**Во второй главе** представлены результаты исследований точности обработки и сборки кромок труб перед автоматической сваркой в полевых условиях для предъявления обоснованных требований к законам адаптивного управления оборудованием и электронным средствам адаптивной системы.

В качестве исследуемых параметров геометрии разделки были выбраны зазор в корне шва ($G$), перекос кромок ($M$) и притупление правой ($RF_{\text{п}}$) и левой кромок ($RF_{\text{л}}$), так как именно они оказывают ключевое влияние на формирование корневого слоя (Рисунок 1, а). Исследование геометрии разделки выполнялось в полевых условиях в процессе испытаний адаптивного сварочного комплекса ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана» на территории ПАО «Газпром». Адаптивный комплекс оснащён модулем измерения геометрии стыка на базе лазерного профилометра, работающего по принципу оптической триангуляции. В процессе перемещения комплекса по направляющему поясу вдоль стыка модулем измерения выполнялось сохранение геометрических параметров геометрии разделки в выходной файл параметров геометрии с привязкой измерений к угловому положению сенсора на трубе с шагом в $1^{\text{o}}$.

Исследования проводились на кольцевых стыках магистральных трубопроводов диаметром 1220 мм и толщиной стенки 18 мм, собранных с применением внутреннего центратора. В результате сканирования были получены результаты 1080 измерений (по 360 измерений на стык), что позволило выполнить

статистический анализ результатов по каждому из параметров и определить характеристики их разброса (Рисунок 1, б).




а) б)

Рисунок 1. Анализ параметров геометрических возмущений сборки стыка (на примере притупления кромок) при сварке корневого слоя шва: а – состав анализируемых параметров; б – разброс притупления кромок

Искомыми параметрами разброса являлись среднее значение разброса и доверительный интервал $\pm 3\sigma$. Далее выполнялось сравнение установленных параметров с требованиями нормативной документации к точности указанных параметров: больший из сравниваемых диапазонов принимался в качестве установленного и служил в качестве требований к элементам следящих систем, рассмотренных в 4 главе, и учитывался при планировании дальнейших исследований.

Таблица 1.

Принятые интервалы разброса геометрических параметров

| | Характеристики интервала разброса параметра | | |
|---|---|---|---|
| Параметр | Нижняя граница, мм | Среднее значение, мм | Верхняя граница, мм |
| Зазор в корне | $G_{min} = 2{,}7$ | $G_c = 3{,}7$ | $G_{max} = 4{,}7$ |
| Притупление разделки | $RF_{min} = 0{,}7$ | $RF_c = 1{,}8$ | $RF_{max} = 2{,}9$ |
| Перекос кромок | $M_{min} = 0$ | $M_c = 0$ | $M_{max} = 2$ |

Далее в главе выполнялось исследование влияния геометрических возмущений сборки стыка на формирование корневого слоя шва, с учетом установленных параметров возмущений. Основной задачей исследования являлось установление количественных показателей - критических возмущений сборки стыка, приводящих к дефектам формирования корневого слоя шва, таким как прожог, непровар, несплавление или нарушение геометрических характеристик обратного валика.

Для проведения эксперимента использовались пластины толщиной 15 мм с V-образной разделкой кромок. Угол скоса разделки составлял $30^0$ с целью имитации формирования корня шва при сварке в заводскую ломаную разделку. Для определения критического возмущения зазора и перекоса, сборка стыка выполнялась таким образом, чтобы в начале стыка значение параметра равнялось середине установленного интервала ($G_c$, $M_c$) и изменялось по длине в большую сторону при исследовании перекоса кромок и в большую и меньшую сторону (в разных экспериментах) при исследовании зазора в корне шва. Сварка выполнялась сериями экспериментов для притупления на кромках фиксированного на $RF_{min}, RF_{max}$ и $RF_c$.

Сварка каждого стыка выполнялась на неизменных режимах сварки, предварительно подобранных для комбинаций геометрии кромок в начале свариваемых образцов и обеспечивающий качественное формирование корневого слоя шва. Исследование проводилось для сварки на постоянном токе и сварке с управляемым каплепереносом (процесс УКП).

В результате эксперимента были получены критические значения возмущений зазора и перекоса кромок для фиксированного притупления кромок (Рисунок 2). Первоочередным выводом по результатам экспериментов являлось совпадение установленных критических значений возмущения зазора при раскрытии и сужении. Также, в результате проведения экспериментов были получены экспериментальные зависимости критических возмущений зазора и перекоса от значения притупления разделки. Отличительной особенностью зависимости, является увеличение критического возмущения зазора при увеличении притупления, и, противоположным образом, уменьшение критического значения возмущения перекоса кромок.

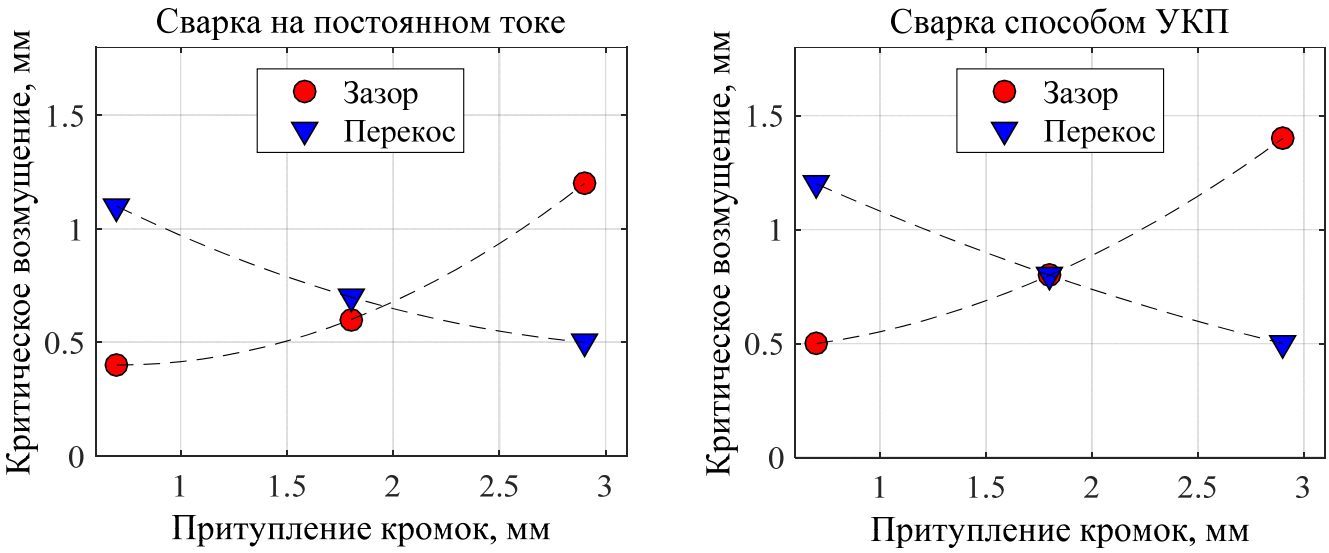



Рисунок 2. Экспериментальные зависимости критических возмущений зазора и перекоса кромок от притупления разделки

**Третья глава** работы посвящена разработке способа формализации законов управления формированием корневого слоя шва при рассмотрении многомерной многосвязной системы «геометрия сборки – параметры режима сварки».

Входным вектором рассматриваемой системы является вектор $\overrightarrow{P_{in}}$, компонентами которого являются притупление правой и левой кромки $RF_{\text{п}}$ и $RF_{\text{л}}$, зазор в корне шва $G$, перекос кромок $M$, диапазоны их изменений известны. Первоочередной задачей исследований являлось установление необходимого перечня компонент выходного вектора $\overrightarrow{P_{out}}$, которыми являются управляющие воздействия системы (параметры режима сварки), набор которых достаточен для обеспечения качественное формирования корневого слоя шва при наличии вектора возмущений $\overrightarrow{P_{in}}$. Следующей задачей был поиск взаимосвязи между векторами $\overrightarrow{P_{in}}$ и $\overrightarrow{P_{out}}$, или их компонентами, которая и будет являться формализованными законами управления системы, на основе которых станет возможным непрерывный синтез вектора $\overrightarrow{P_{out}}$ из вектора $\overrightarrow{P_{in}}$.

Для выполнения данных задач на адаптивном сварочном комплексе ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана» был проведён эксперимент по сварке корневого слоя шва стыков труб. Эксперимент проходил в несколько этапов. На первом этапе выполнялась сборка стыков труб диаметром 1220 мм и толщиной стенки 21 мм на специализированном стенде согласно требованиям нормативно-технической документации.

Далее выполнялось сканирование геометрии сборки лазерным профилометром, входящим в состав адаптивного сварочного комплекса (Рисунок 3) с привязкой измерений к угловому положению сенсора на трубе с шагом в $1^0$. В случае получения значений основных параметров стыка в установленных ранее интервалах разброса, выполнялась фиксация геометрии сборки на равномерно расположенных по стыку прихватках.

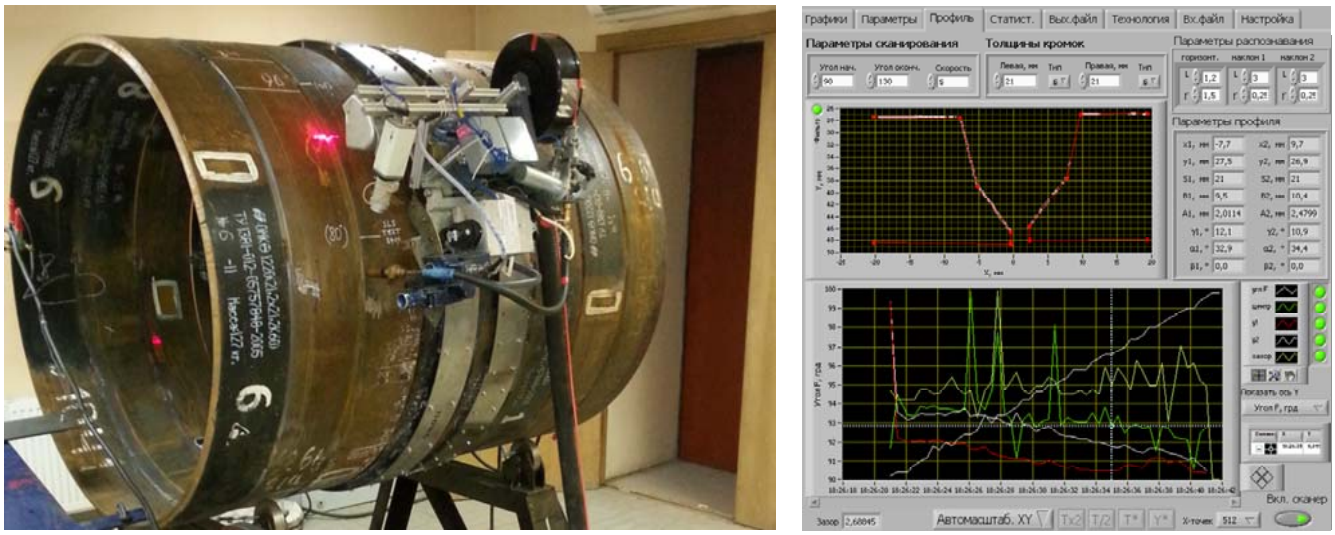



Рисунок 3. Стенд для проведения экспериментов и интерфейс комплекса

Таким образом, для каждого углового положения будущего места сварки на трех стыках были определены компоненты вектора геометрических возмущений сборки стыка $\overrightarrow{P_{in}}(RF_{\text{п}}, RF_{\text{п}}, G, M)$ (Рисунок 4).

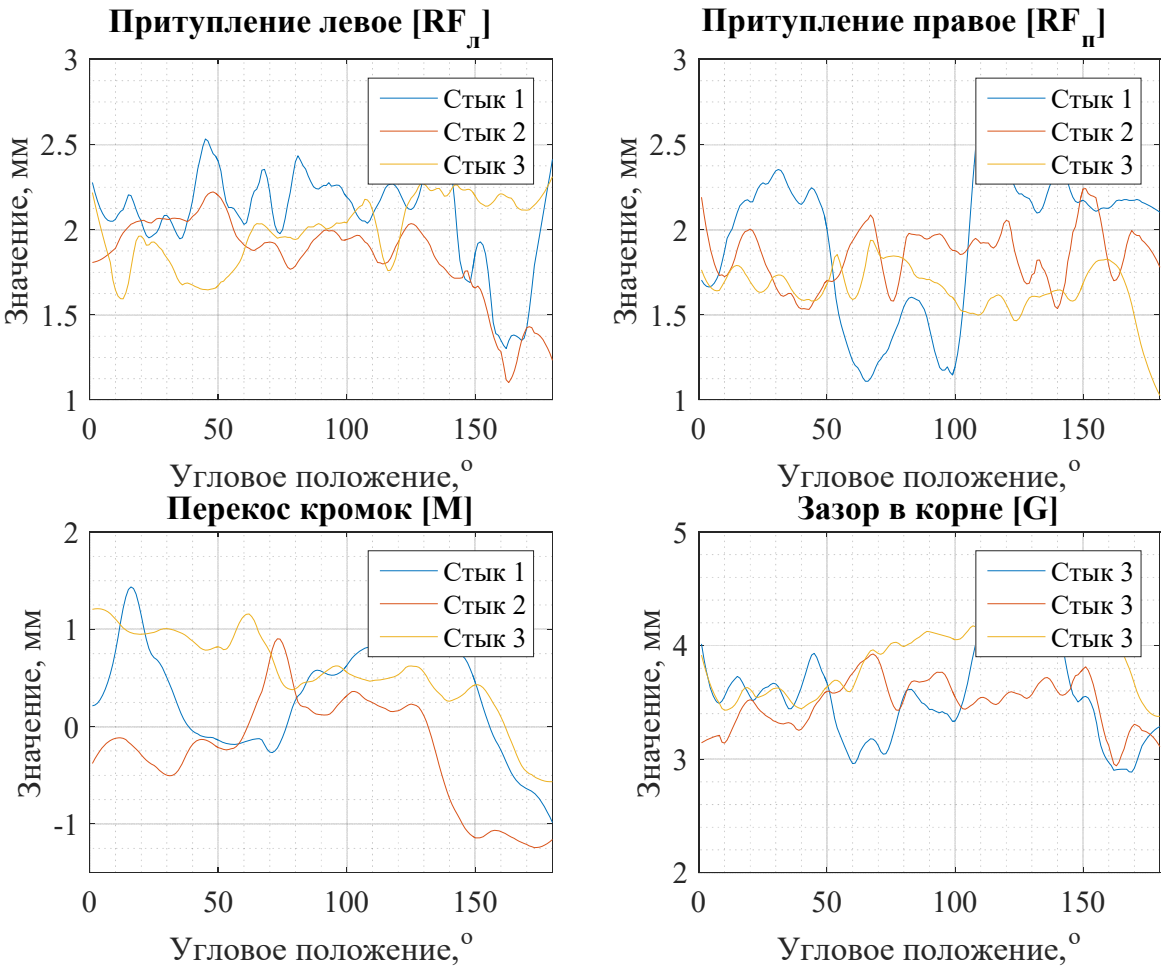



Рисунок 4. Измеренные значения компонент вектора геометрических возмущений на исследуемых стыках

На следующем этапе проводилось программирование сварочного комплекса с использованием существующих алгоритмов адаптации, в частности, выполнялась подстройка параметров режима сварки под изменение зазора в стыке и положения места сварки, а также решение задачи наведения центра колебаний горелки на центр стыка, то есть ввод априорной информации, представляющей собой алгоритм адаптивной коррекции, установленный в предшествующих работах Гладкова Э.А, Перковского Р.А.

Далее выполнялась сварка стыка, при этом, задачей опытного оператора сварочного оборудования являлось подстройка параметров режима сварки в соответствии со своими навыками и наблюдением за процессом и обеспечение формирования корневого слоя согласно требованиям НТД (Рисунок 5).

Использование априорных знаний и зависимостей при проведении эксперимента позволило обеспечить концентрацию оператора сварщика на отработке геометрических возмущений сборки стыка и повысить вероятность получения качественного сварного соединения при сварке.

Рисунок 5. Обобщённая схема эксперимента

В ходе проведения экспериментов аппаратные средства фиксировали параметры режима сварки, состоящие из суммы корректировок, полученных с помощью алгоритма адаптивной коррекции и корректировок оператора сварщика, с аналогичной привязкой к угловому положению места сварки на трубе. По результатам проведения сварки контрольных сварных соединений с использованием средств регистрации данных каждому вектору $\overrightarrow{P_{in}}$ был поставлен в соответствие вектор $\overrightarrow{P_{out}}$, представляющий собой параметры режима сварки соединения для каждого углового положения. В качестве исследуемых компонент вектора $\overrightarrow{P_{out}}$ были выбраны именно те параметры режима, которые использовал опытный сварщик для обеспечения требуемого качества корневого слоя шва. Следовательно, в результате эксперимента, были установлены компоненты вектора управляющих воздействий, обеспечивающие формирование корневого слоя шва в заданных условиях: базовый ток ($BC$), скорость сварки ($WS$), скорость подачи проволоки ($FR$), амплитуда колебаний горелки ($WA$).

Поскольку адаптивная коррекция параметров режима была заранее задана встроенными программными средствами адаптивного сварочного комплекса, для дальнейшего анализа из вектора $\overrightarrow{P_{out}}$ был выделен вектор управляющих

воздействий (приращений параметров режима сварки) $\overrightarrow{\Delta P}(\Delta BC, \Delta WS, \Delta FR, \Delta WA)$, введённых в систему оператором оборудования в качестве «ответа» на изменения геометрии стыка с аналогичной привязкой к угловом положению.

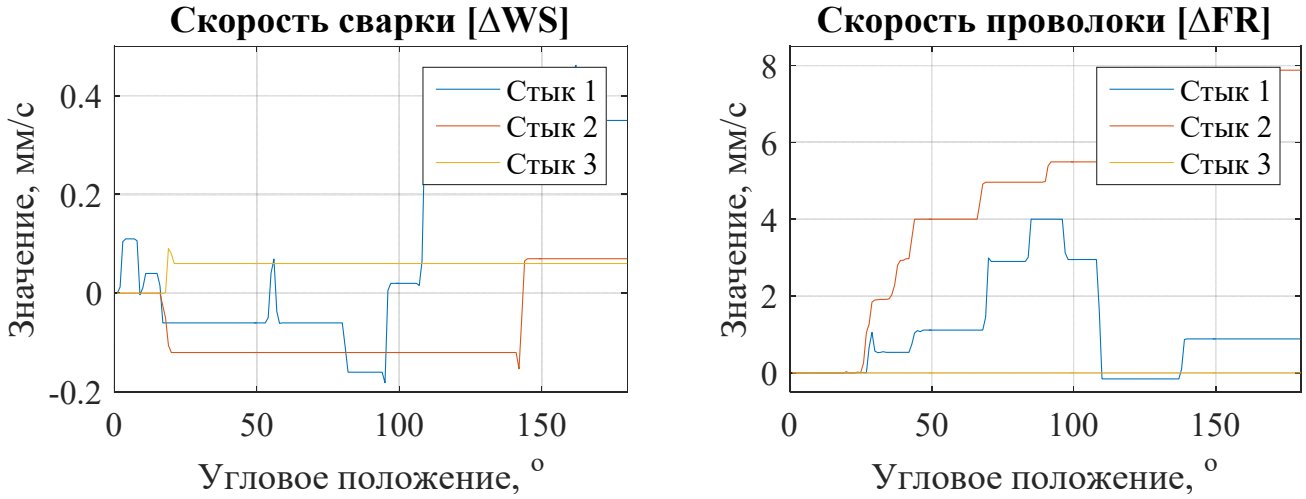



Рисунок 6. Пример приращений компонент вектор управляющих воздействий на исследуемых стыках при управлении оператором

Таким образом, для обеспечения автономного (без участия человека) управления оборудованием необходимо формализовать законы управления процессом сварки корневого слоя шва в системе «геометрия стыка – параметры режима сварки». Более строго, законы управления должны отображать зависимость между входным вектором геометрии стыка $\overrightarrow{P_{in}}(RF_{\text{л}}, RF_{\text{п}}, G, M)$ и приращениями параметров режима сварки $\overrightarrow{\Delta P}(\Delta BC, \Delta WS, \Delta FR, \Delta WA)$. Прямое решение задачи формализации законов управления вектором $\overrightarrow{\Delta P}$ на основании вектора $\overrightarrow{P_{in}}$ с использованием имеющегося набора данных не представляется возможным ввиду следующих причин.

1. Многомерность и многосвязность исследуемого процесса сварки.
2. Существенные отличия в структуре данных для входов (Рисунок 4) и выходов системы (Рисунок 6): непрерывное изменение параметров геометрии системы и ступенчатое управление процессом со стороны оператора.
3. Неспособность оператора сварочного оборудования обеспечить непрерывность процесса управления в зависимости от возмущений геометрии стыка.

В связи с вышесказанным, в работе предлагается следующий метод формализации законов управления в системе «геометрия сборки – параметры режима сварки». На первоначальном этапе выполняется условное квантование управляющих воздействий, при этом, шаг квантования ($\Delta_1$ … $\Delta_n$) варьируется в зависимости от имеющихся уровней воздействия оператора сварочного оборудования, имеющихся в экспериментальном наборе данных (Рисунок 7, а).

Схожая процедура выполняется для параметров геометрии разделки кромок, однако, в качестве шага квантования ($\Delta$) для каждого рассматриваемого параметра

выбирается минимальное критическое возмущение этого параметра, установленное ранее (критическое возмущение параметра – приращение параметра геометрии, приводящее к возникновению дефектов формирования сварного соединения при сварке на неизменном режиме) (Рисунок 7, б).

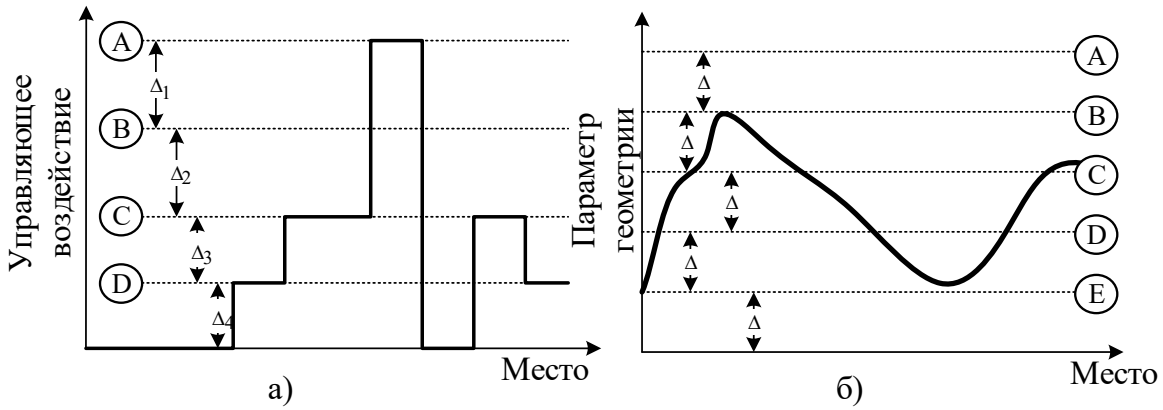



Рисунок 7. Схема квантования компонент вектора управляющих воздействий (а) и возмущений геометрии кромок (б). A, B, C, D, E - уровни квантования

Следующим шагом метода является сопоставление мест переходов оператора оборудования с одного уровня управляющего воздействия на другой с соответствующими (по местоположению) уровнями возмущений геометрии кромок. При этом, каждому месту перехода любого из управляющих воздействий ставится в соответствие уровни управляющих воздействий остальных компонент вектора $\overrightarrow{\Delta P}$ и уровни возмущения геометрии (по каждому из параметров), вызвавшие его необходимость (Рисунок 8).

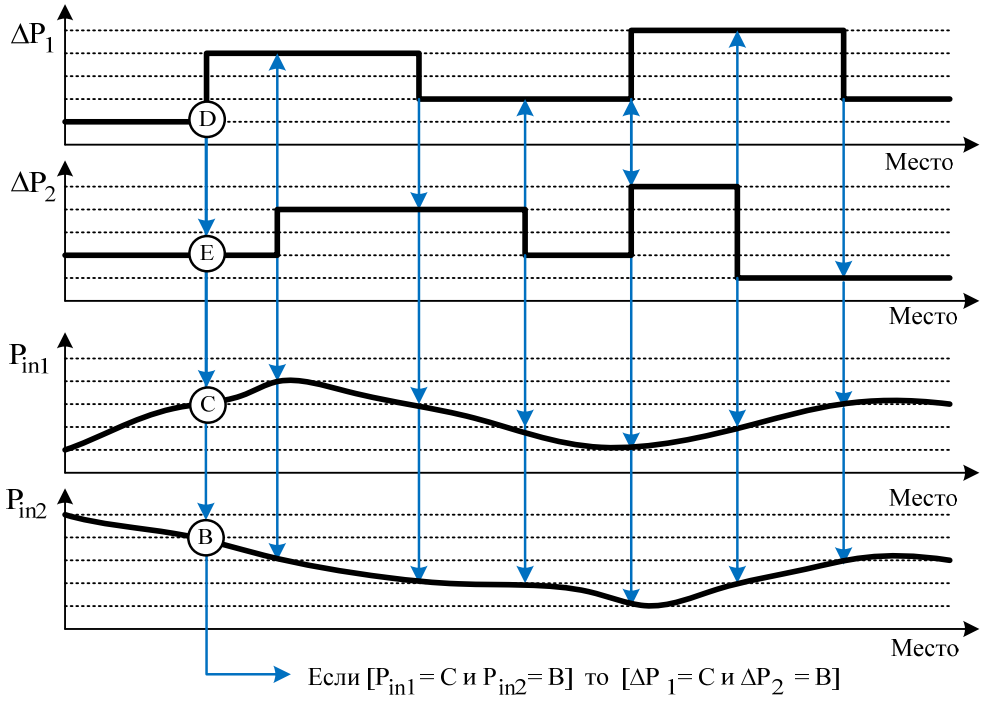



Рисунок 8. Формализация законов управления в формате «если – то»

На основании сопоставления формализуются правила управления в формате «если – то», при чём, операция выполняется в случае изменения уровня управляющего воздействия для любого из компонент вектора управляющих воздействий $\overrightarrow{\Delta P}$.

Предложенный подход к формализации управляющих воздействий позволяет учитывать только ту часть экспериментальных данных, в которых оператором было принято решение о необходимости корректировки процесса сварки в соответствии со своими наблюдениями, которые, за счет применения измерительных устройств представлены в виде параметров геометрии стыка. Подход позволяет исключить из законов управления вероятные ошибочные зависимости, вызванные возможным бездействием оператора оборудования и его неспособностью корректировать процесс непрерывно. При этом, использование в качестве шагов квантования критических возмущений обосновывает разумную детализацию численных параметров геометрии кромок и параметров режима сварки в законе управления для упрощения дальнейшего синтеза управляющих воздействий в реальной системе.

Для имеющейся экспериментальной выборки (Рисунок 4, Рисунок 6) были формализованы 29 законов управления. Поскольку, законы управления были получены в формате «если - то», для их обработки был использован математический аппарат нечёткой логики, который ориентирован на базу знаний именно такого вида. Рассматриваемая система «геометрия сборки – параметры режима сварки» была представлена в виде нечёткой системы с четырьмя входными переменными (зазор ($G$), перекос ($M$), притупление правой ($RF_{\text{п}}$) и левой ($RF_{\text{л}}$) кромки) и четырьмя выходными переменными (приращение амплитуды колебаний ($\Delta WA$), скорости сварки ($\Delta WS$), базового тока ($\Delta BC$) и скорости подачи проволоки($\Delta FR$)).

Настройка входных и выходных параметров и их функций принадлежности выполнялась с учётом установленных ранее характеристик, а именно определённых уровней возмущений параметров геометрии кромок и управляющих воздействий. Таким образом, устанавливалась функция принадлежности треугольного типа для каждого уровня возмущений геометрии стыка и для каждого уровня управляющего воздействия. При этом, абсцисса средней вершины треугольника функции принадлежности совпадала со значением уровня, а абсциссы нижних вершин задавались равными значениям соседних уровней. Тестирование полученного регулятора выполнялось в два этапа. На первом этапе выполнялось исследование работы автономного регулятора на данных из имеющейся экспериментальной выборки, где для рассматриваемых возмущений геометрии оператором сварочного оборудования были определены и введены корректирующие управляющие воздействия, обеспечивающие формирование корневого слоя шва в соответствии с имеющимися требованиями.

В ходе тестирования было установлено совпадение действий оператора сварочного оборудования и нечёткого регулятора в местах перехода оператора сварочного оборудования с одного уровня управляющего воздействия на другой.

Принципиальным отличие является дискретность действий оператора, его неспособность непрерывного контроля процесса, и, наоборот, непрерывность работы нечёткой системы, отрабатывающей постоянные изменения входных параметров, то есть геометрии разделки.

Далее выполнялось экспериментальное тестирование с целью определения качественных показателей процесса сварки корневого слоя шва при проведении сварки в автономном режиме (без контроля со стороны оператора) с адаптивным управлением, реализованным на базе разработанного нечеткого регулятора. Выполнялось сканирование геометрии разделки средствами адаптивного сварочного комплекса, и формирование входного вектора параметров геометрии разделки $\overrightarrow{P_{in}}$. На основании этого файла, в два этапа выполнялся подбор параметров режима сварки, то есть результирующего вектора $\overrightarrow{P_{out}}$. Начальные абсолютные значения параметров режима $\overrightarrow{P_{abs}}$ вычислялись с помощью существующего алгоритма адаптивной коррекции (Э.А. Гладков, Р.А. Перковский), реализующей учёт изменения положения места сварки на неповоротном стыке и зазора в корне шва. Далее, с использованием разработанного нечеткого регулятора, вычислялись приращения параметров режима сварки $\overrightarrow{\Delta P}$ и суммировались с определёнными ранее абсолютными значениями соответствующих компонент вектора параметров $\overrightarrow{P_{abs}}$, а результирующая сумма использовалась для последующей сварки стыков.

В результате сварки контрольного сварного соединения трубы диаметром 1220 мм с толщиной стенки 21 мм на участке от 0 до $180^0$ без участия оператора было получено качественное формирование корневого слоя шва на 90% длины стыка.

**В четвертой главе** работы рассмотрены прикладные аспекты разработки сварочного оборудования с адаптивным управлением на примере интеграции оптической системы слежения за стыком SLS050 (Meta Vision Systems Ltd., Великобритания). Передача данных реализована посредством Ethernet интерфейса в формате «запрос-ответ», что позволяет проводить измерения с задаваемой пользователем частотой.

В ходе исследований проводилось многократное сканирование участка стыка трубы диаметром 21 мм общей длиной 1600 мм. Целью экспериментов было определение влияния параметров устройства сбора данных на стабильность проведения измерений. Исследование проводилось при различных скоростях сканирования, имитирующих перемещение датчика при сварке (со средней скоростью 3 мм/с) и при выполнении предварительного сканирования до сварки (например, с целью контроля геометрии сборки) на максимальной для рассматриваемого сварочного автомата скорости 12 мм/с.

По результатам экспериментов был сделан вывод о необходимости привязки частоты опроса датчика $f$(Гц) к скорости его перемещения $V$(мм/с) с целью улучшения соотношения «сигнал-шум». С целью дальнейшего улучшения процесса измерений и обеспечения точности измерений меньше критического значения возмущения геометрии, приводящего к дефекту формирования было

выполнено определение оптимальных значений скорости камеры $S$ и интенсивности подсвечивающего лазера $I$, минимизирующих количество случайных возмущений при проведении измерений.

Неверный выбор указанных параметров может привести к резкому увеличению сбоев в работе алгоритма распознавания изображения и возникновению случайных помех. При этом, наиболее подверженным данному эффекту являются точки в нижней части разделки. Для решения данной задачи был проведён полнофакторный эксперимент, варьируемыми параметрами которого являлись параметры системы слежения $I$ и $S$.

В результате исследований было установлено, что для случая заводской ломаной разделки кромок, оптимальными параметрами датчика являются $S$=30 кадр/с и $I$ = 30 ед., обеспечивающих снижение количества случайных возмущений параметров до 3 на участке стыка 1500 мм. Данное количество возмущений является допустимым при условии достаточно высокой дискретизации опроса датчика и при дополнительном использовании сглаживающих фильтров при обработке данных в реального времени.

Рассмотренные прикладные аспекты интеграции системы слежения SLS050 были реализованы в виде прикладного программного обеспечения, которое было использовано в процессе интеграции системы слежения SLS050 и традиционной сварочной головки. В качестве оптимального интерфейса человек-оборудование предлагается использование современных промышленных компьютеров. В этой связи, целесообразным является рассмотрение двух независимых контуров, слежения и управления, связанных через управляющее устройство – персональный компьютер (по аналогии с трёхконтурной системой управления Гладкова Э. А.).

В главе рассмотрены соответствующие прикладные подходы к построению адаптивной системы управления процессом сварки корневого слоя шва. Отмечается, что адаптация технологии автоматической сварки к изменениям сборки стыка не вносит принципиальных изменений в аппаратную часть контроллера базового автоматического оборудования, основные элементы которых являются серийными изделиями предприятий по производству промышленной электроники.

**В пятой главе** работы представлена обобщённая методика адаптации технологии автоматической сварки корневого слоя шва к геометрическим возмущениям сборки стыка, получение которой, являлось основной задачей работы. Методика представляет собой последовательный взаимосвязанный алгоритм действий, включающий разработанные в работе подходы к формализации законов управления процессом сварки и синтеза непрерывных управляющих воздействий в обобщённом виде, а также прикладные вопросы реализации сварочного оборудования с адаптивным управлением.

## Основные выводы по результатам работы

1. Повышение качества формирования корневого слоя шва стыковых соединений магистральных трубопроводов при сварке в автоматическом режиме может быть обеспечено за счёт использования адаптивных алгоритмов управления процессом сварки в системе «геометрия сборки – параметры режима сварки».

2. Установлены внутренние взаимосвязи возмущений сборки стыка, а именно корреляция критических возмущений зазора и перекоса с притуплением кромок стыка, что позволяет оптимизировать процессы разработки алгоритмов управления оборудованием, а также обосновать выбор номинальных геометрических параметров разделки.

3. Предложен подход к формализации законов управления процессом сварки корневого слоя шва для рассматриваемой системы «геометрия сборки - параметры режима сварки» с учетом критических возмущений параметров геометрии разделки.

4. Обеспечена непрерывность синтеза управляющих воздействий процессом автоматической сварки корневого слоя шва для рассматриваемой системы «геометрия сборки – параметры режима сварки», обеспечивающего качественное формирование сварного соединения без вмешательства оператора.

5. Предложен подход к реализации сварочного оборудованием с адаптивным управлением формированием шва, позволяющий обобщить существующую трехконтурную схему управления сварочным оборудованием за счёт применения контура интеллектуального формирования.

6. Предложена методика адаптации технологии автоматической сварки корневого слоя шва кольцевых соединений магистральных трубопроводов.

## Основные публикации по теме диссертации

1. Шварц М.В., Малолетков А.В., Перковский Р.А. Применение лазерной системы слежения для управления процессом автоматической MIG/MAG сварки // Наука и Образование. Рег. № ФС 77-48211. 2013. № 9. С. 1–12. (0,75/0,4 п.л.) DOI: 10.7463/1213.0628186.

2. Шварц М.В., Малолетков А.В. Исследование чувствительности технологии MIG/MAG сварки корневого слоя шва к геометрическим возмущениям сборки стыка // Наука и Образование. Рег. № ФС 77-48211. 2013. № 10. С. 9–22. (0,8/0,6 п.л.) DOI: 10.7463/1013.0631684

3. Шварц М.В., Малолетков А.В. Разработка алгоритма адаптации технологических параметров сварки к изменению геометрии стыка при сварке корневого слоя шва // Наукоёмкие технологии и интеллектуальные системы: Сб.тр. Международной молодежной научно-технической конференции (27 апреля 2011 г.) М., 2011. С. 78–81. (0,4/0,3)