

На правах рукописи

Иванова Ирина Владимировна

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ В СРЕДЕ ЗАЩИТНОГО ГАЗА
В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЕТРА**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент

ПАРШИН Сергей Георгиевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук

ДОРОНИН Юрий Викторович

ООО «АЦГХ»,
Начальник лаборатории сварки

Кандидат технических наук

РЫБАЧУК Александр Михайлович

МГТУ имени. Н.Э. Баумана,
кафедра технологий сварки и диагностики,
доцент

Ведущая организация:

**РГУ нефти и газа имени И.М.Губкина,
(Москва)**

Защита состоится «22» июня 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.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В судостроении, судоремонте, при строительстве зданий и сооружений, монтаже нефтегазопроводов значительный объем сварочных работ выполняется на открытых монтажных площадках. Ветер затрудняет применение прогрессивных способов механизированной и автоматической сварки в защитном газе из-за нарушения газовой защиты сварочной ванны, и образования дефектов в сварных соединениях, в результате чего снижается качество сварных соединений.

По оценке экспертов Национального агентства контроля сварки (НАКС) при строительстве ответственных конструкций, трудно обеспечить надежную защиту зоны сварки от ветра. Например, при монтаже крыши стадиона «Зенит-Арена» в Санкт-Петербурге, необходимо выполнить сварку большого количества коротких швов в различных пространственных положениях, что затрудняет установку ветрозащитных сооружений.

Следовательно, для решения задачи по повышению эффективности газовой защиты необходимо разработать технологию и оборудование, которые позволяют обеспечить высокое качество сварных соединений.

Степень разработанности темы работы

Разработка технологий сварки на ветру началась в конце 60-х годов прошлого столетия в России, США, Японии, Германии. Однако внедрение разработок ограничивалось уровнем развития приборостроения. Влияние условий на технологический процесс дуговой сварки в среде защитных газов изложено в трудах ученых Г.А. Николаева, В.Л. Руссо, Н.И. Акатнова, В.В. Ардентова, Г.А. Федоренко, Д.Л. Поправка и др.

Исследования Д.К. Безбаха по дуговой сварке на ветру при постоянной скорости ветра показали, что сварочное оборудование нуждается в серьезной доработке. В трудах К.К. Хренова, Г.А. Николаева, Н.Н. Рыкалина, А.И. Акулова, Г.Г. Чернышова, Н.М. Новожилова отмечается важность защиты зоны сварки для повышения качества и надежности сварных конструкций. Также отмечается, что эффективность защиты зависит от характера истечения газовой струи из сопла горелки. К концу XX века определился единый подход при исследовании процесса струйной газовой защиты на основе применения теории турбулентных струй. Однако, не были установлены граничные условия для параметров режима сварки на ветру, а также предельные скорости ветра, при которых обеспечивается эффективная газовая защита. Кроме того, не учитывался тот факт, что в реальных условиях скорость ветра имеет резкие усиления, что обуславливает проведение исследований в условиях влияния ветра с переменной скоростью.

Цель работы: повышение эффективности газовой защиты и качества сварных соединений при дуговой сварке в условиях воздействия ветра путем разработки специализированного оборудования и технологии.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ дефектов и способов улучшения газовой защиты при дуговой сварке в условиях ветра.

2. Исследовать закономерности истечения защитных газовых струй и характеристики эффективности газовой защиты при сварке в условиях ветра.

3. Разработать специализированное оборудование и технологию для сварки в условиях ветра.

4. Исследовать технологические особенности сварочной дуги и свойства сварных соединений, полученных при сварке на ветру.

Научная новизна работы:

1. На основе моделирования в среде ANSYS обнаружена и экспериментально подтверждена возможность управления эффективностью газовой защиты в условиях ветра за счет стабилизации и увеличения размеров ядра защитной газовой струи при высоких скоростях истечения из конфузорного сопла сварочной горелки, внутренняя поверхность которой имеет двухасимптотную параболическую форму.

2. Установлены расчетно-экспериментальные зависимости между размерами ядра защитной газовой струи, расходом защитного газа, скоростью ветра, режимами сварки и расстоянием до свариваемой поверхности, обеспечивающие эффективную газовую защиту в условиях ветра.

3. Расчетно-экспериментальным методом обнаружен механизм уменьшения неоднородности поля скоростей, вращения и турбулентности защитного газового потока на выходе из сопла сварочной горелки при высоких скоростях истечения защитной газовой струи при воздействии ветра за счет изменения траектории движения и уменьшения энергии защитной струи в конфузорном сопле газовой горелки с устанавливаемым пакетом сеток.

Практическая ценность результатов:

1. Разработан универсальный стенд с многорежимной аэродинамической трубой и автоматическая система управления режимами стенда для моделирования процесса дуговой сварки в условиях воздействия ветра с резкими усилениями.

2. Разработана и внедрена в производство конструкция сварочной горелки с конфузорным соплом, внутренняя поверхность которого имеет двухасимптотную параболическую форму, с устанавливаемым перед входным отверстием сопла пакетом сеток.

3. Разработана и запатентована система автоматического управления режимами дуговой сварки в условиях ветра, позволяющая увеличить эффективность газовой защиты за счет регулирования расхода защитного газа в зависимости от скорости ветра, частоты его усилений, расстояния от сопла до изделия и силы сварочного тока.

4. Установлены оптимальные параметры режимов дуговой сварки в среде защитных газов с применением сварочной горелки с конфузорным соплом, которые обеспечили высокую стабильность горения дуги, эффективную газовую защиту при различных скоростях и частоте усиления ветра.

5. Установлено, что применение новой сварочной горелки с конфузорным соплом в условиях ветра позволило уменьшить отклонения сварочного тока и напряжения, улучшить механические свойства и химический состав сварных швов из стали повышенной прочности.

Методы исследований

Для достижения поставленной цели использовали расчетно-экспериментальные методы исследований, а также методы математического моделирования в программе ANSYS. Эксперименты проводили на установке, состоящей из многорежимной аэродинамической трубы, автоматической системы управления, механизма перемещения горелки и источника питания ЛЭТ-350. Изучение размеров зоны газовой защиты проводили методом пробы на пятно, при определении диаметра и конфигурации пятна без цветов побежалости. Математическое моделирование выполняли на ЭВМ с использованием пакетов ANSYS Fluent, ADClab.

Видеосъемку сварочной дуги выполняли в прямом свете через зеркальный светофильтр с помощью высокоскоростной видеокамеры CITIUS IMAGING C10 с частотой 2 кГц. Осциллографирование сварочных токов и напряжений производили с частотой 10 кГц с помощью цифрового регистратора сигналов S-Recorder 2-Opto. Скорость ветра и газов измеряли с помощью цифрового термоанемометра Dwyer Series 471. Регистрацию полей концентрации газов осуществляли на газоанализаторе ГХП-3М.

Исследования свойств сварных соединений проводили в испытательной лаборатории ООО «Учебный Научно-Технический Центр «Сварка» (Санкт-Петербург) и в лаборатории металлургической экспертизы ФГАОУ ВО «СПбПУ». Испытания на ударный изгиб проводили по ГОСТ 9454-78, ГОСТ 6996-66 на копре РН450. Испытания на статическое растяжение проводили по ГОСТ 1497-84, ГОСТ 6996-66 на испытательной машине Super «L» 60, измерение твердости проводили по ГОСТ 2999-75 на твердомере «DuraScan-20». Химический анализ швов проводили по ГОСТ 18895-97 на оптико-эмиссионном спектрометре «Q4 TASMAN». Содержание азота и кислорода в металле сварного шва определяли с помощью газоанализатора ELTRA ON900 в соответствии с ГОСТ 18895-97 методом восстановительного плавления в графитовых тиглях в среде сверхчистого гелия.

На защиту выносятся следующие положения:

- разработанные математические модели истечения защитных газовых струй в условиях ветра;
- результаты расчетно-экспериментальных исследований параметров режима сварки в условиях ветра;
- оборудование и технология дуговой сварки в условиях ветра;
- результаты исследований свойств сварочной дуги и сварных соединений в условиях ветра.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается:

- применением теории моделирования газодинамических процессов;
- применением стандартных апробированных средств измерений и методов математической обработки экспериментальных данных;
- применением расчетно-экспериментальных методов моделирования процесса сварки при воздействии ветра;

- корректностью математических моделей и результатов экспериментальных измерений и их адекватностью известным критериям оценки изучаемых процессов;
- производственными испытаниями новой технологии и оборудования в условиях ветра;
- экспериментальными исследованиями свойств сварочной дуги и сварных соединений при дуговой сварке в условиях ветра.

Апробация работы

Основные и отдельные положения работы представлены и обсуждены на российских и международных конференциях и семинарах: научно-технических семинарах кафедры теории и технологии сварки материалов СПбПУ (С.-Петербург, 2014, 2015, 2016 г.); научно-технических семинарах кафедры технологий сварки и диагностики МГТУ (Москва, 2015, 2016 г.); всероссийских научно-практических семинарах «Металлургия сварки и сварочные материалы (Петровские чтения)» (Зеленогорск, 2015 г., С.-Петербург, 2016 г.); молодежных форумах в рамках международной выставки СВАРКА/WELDING (С.-Петербург, 2012, 2016 г.); международных научно-технических конференциях (Курск, 2014, 2015, 2016 г.); VI Российской научно-практической конференции «Актуальные вопросы нефтегазового строительства» (Москва, 2015 г.); научно-техническом семинаре кафедры сварки, обработки материалов давлением и родственных процессов ТГУ (Тольятти, 2015 г.); молодежных научно-практических конференциях в рамках Недели Науки СПбПУ (С.-Петербург, 2013, 2014, 2015 г.); научно-технической секции «Технологии судостроения» Российского Научно-технического Общества судостроителей им. ак. А.Н. Крылова (С.-Петербург, 2013 г.); международном научно-практическом семинаре «Сварка в судостроении и машиностроении» (С.-Петербург, 2011 г.); научно-техническом семинаре «Современные технологии в промышленности России» (С.-Петербург, 2011 г.).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 17 печатных работ, в том числе 5 работ в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, получен 1 патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора

Личный вклад автора в исследованиях и разработках составил до 80 %. В работах, выполненных в соавторстве, вклад автора заключался в постановке проблемы, разработке методов исследований, построении математических моделей, разработке установки для моделирования процесса сварки, проведении экспериментальных исследований, разработке специализированного оборудования и технологии.

Структура и объем

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 173 страницах машинописного текста, содержит 103 рисунка, 35 таблиц, 107 наименований библиографических источников.

Внедрение и опробование результатов работы

Отдельные разделы диссертационной работы выполняли в ФГАОУ ВО

«СПбПУ» в 2011–2014 гг. в рамках госбюджетной НИР № 01201165735, в 2015–2016 гг. в рамках НИР № 203315501 по заказу ООО «ГазпромВНИИГАЗ».

Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров и магистров ФГАОУ ВО «СПбПУ». Система автоматического управления потоком защитного газа прошла промышленное опробование в Научном учреждении «Центр стратегических исследований», научные результаты диссертации использованы в практике работы ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей», экспериментальная технология внедрена в ООО «Техник-V», ООО «МРК Модуль», оборудование прошло промышленное опробование в ЗАО «Невский завод» (г. Санкт-Петербург, РФ) и на предприятии «BUCHER» (г. Вентспилс, Латвия).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновали актуальность исследований, определили цель и задачи работы, сформулировали положения, определяющие научную новизну и практическую значимость работы, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе провели анализ особенностей дуговой сварки в защитном газе на открытых монтажных площадках. На основе данных Гидрометеоцентра РФ установили диапазоны скоростей и усиления ветра.

На основании данных НАКС проанализировали типичные дефекты, возникающие при сварке на ветру. В качестве критериев оценки качества выбрали требования нормативных документов с применением разрушающих и неразрушающих методов контроля. На основании анализа способов улучшения газовой защиты установили, что эффективность определяется стабильностью, формой и размерами ядра защитной струи, которые зависят от скорости истечения и расхода газа, траектории движения защитной струи по соплу, равномерности поля скоростей и турбулентности струи на выходе из сопла в условиях ветра.

Во второй главе разработали методику, провели исследования закономерностей истечения защитных газовых струй, определили характеристики эффективности газовой защиты при сварке в условиях ветра, разработали физическую и математическую модели истечения защитной газовой струи из сопла сварочной горелки.

Для моделирования процесса сварки в условиях ветра разработали универсальный стенд с многорежимной аэродинамической трубой и автоматической системой управления, позволяющей регулировать скорость, длительность и усиления ветра (Рис. 1).

При исследованиях выполняли серию экспериментов с определенной безразмерной величиной отношения H/D_0 (где: H – расстояние от среза сопла до свариваемой поверхности, D_0 – диаметр выходного отверстия сопла), с изменением сварочного тока I , продолжительности горения дуги t , скорости ветра V_v , скорости защитной струи V_c , расхода защитного газа Q_g . Установили, что деформация защитной газовой струи при воздействии ветра изменяет градиент скорости на срезе сопла, что сокращает длину ядра защитной струи.

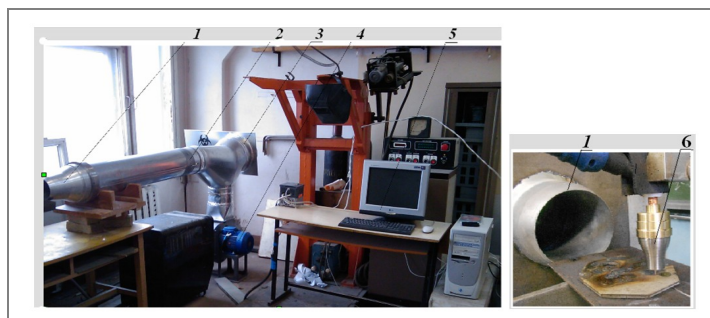


Рис. 1. Общий вид стенда: 1 – конфузторное сопло; 2 – дроссельная заслонка; 3 – шиберная задвижка; 4 – корпус вентилятора; 5 – компьютерное управление; 6 – горелка

Расчетно-экспериментальным способом установили зависимости и количественные связи между скоростью струи защитного газа (Рис. 2), расходом газа (Рис. 3) и конструктивно-технологическими параметрами сварки, при которых обеспечивалась эффективная газовая защита на ветру: $Q = V_g k f(2,5H/D_0 + 0,6h) * \pi(D_0^2 - d^2)/4$.

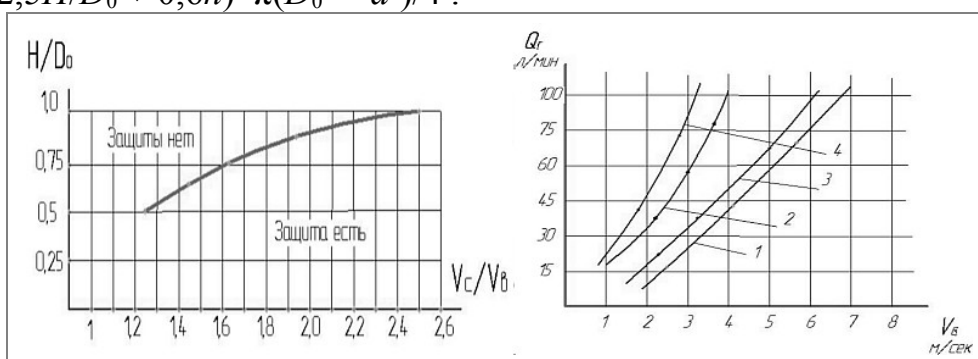


Рис. 2. Характеристика эффективности газовой защиты в зависимости от соотношения скоростей струи и ветра и отношения H/D_0

Рис. 3. Зависимости расходов аргона, обеспечивающие эффективную защиту: 1 – $H/D_0 = 0,5$; $I = 250$ А; 2 – $H/D_0 = 1,0$; $I = 250$ А; 3 – $H/D_0 = 0,5$; $I = 400$ А; 4 – $H/D_0 = 1,0$; $I = 400$ А

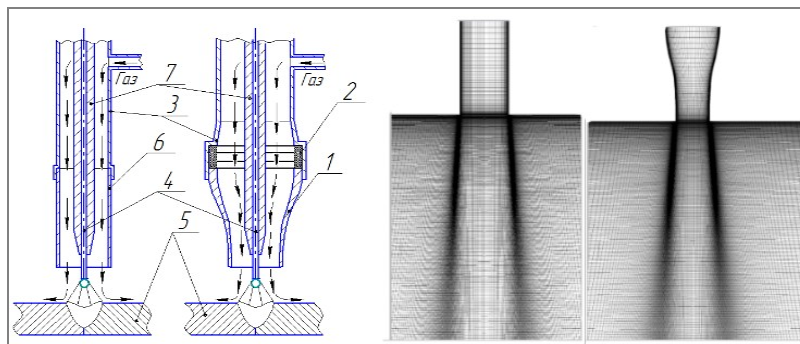
Определили, что эффективная газовая защиты на ветру достигается при соотношении $V_g/V_v = 1,8$ если $H/D_0 = 0,5$ и $V_g/V_v = 3,2$ если $H/D_0 = 1$. Установили, что реальными рабочими расстояниями от среза сопла до свариваемых поверхностей должны быть величины: $H/D_0 = 1$ и менее. Экспериментально подтвердили, что полученные формулы и зависимости возможно применять как для дуговой сварки неплавящимся электродом в среде аргона, так и для сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа.

Математическое моделирование газодинамических процессов производили в среде ANSYS Fluent. Результаты первого этапа компьютерного моделирования предлагались для свободных струй, развитие которых не ограничено твердой поверхностью. При моделировании применяли конфузторное сопло и сопло цилиндрической формы диаметром 30 мм.

Для обоих сопел рассматривали несколько величин скорости газа на входе в сопло. Движение и теплообмен в газе моделировали с помощью уравнений Навье-Стокса, осредненных по уравнениям Рейнольдса (RANS), которые приводили к дискретному виду и решали на расчетной сетке (Рис. 4).

$$p \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad p \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = \frac{-\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-p \bar{u}'_i \bar{u}'_j)$$

где u – поле скоростей (u^- – скорость, осредненная по времени, u' –



пульсационная составляющая), p – давление, μ – молекулярная вязкость.

Рис. 4. Схема истечения защитного газа из сопла: цилиндрического (6); конфузорного (1);

2 – пакет сеток; 3 – корпус; 4 – электродная проволока; 5 – изделие; 7 – мундштук.

Справа – вид расчетных сеток для цилиндрического и конфузорного сопла

Анализ результатов моделирования позволил установить зависимости продольного и поперечного поля скоростей газовой струи, определить изменение формы и протяженности ядра при определенных скоростях струи и ветра и подтвердить способность конфузорного сопла обеспечивать жесткость и ветроустойчивость струи (Рис. 5).

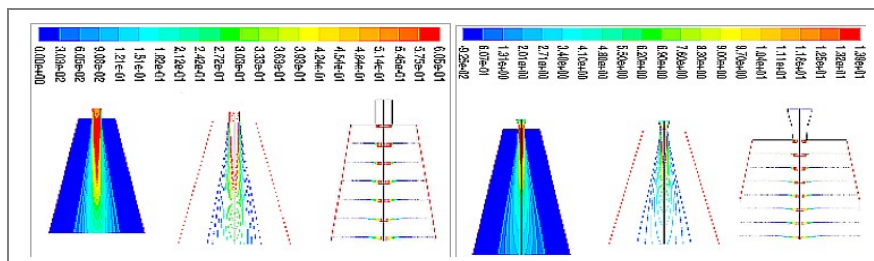


Рис. 5. Продольное и поперечное осесимметричное поле скоростей струи на выходе из цилиндрического (слева) и конфузорного сопла при скорости потока на входе 5 м/с

Полученные при моделировании данные позволили рассчитать коэффициенты, подтверждающие жесткость и ветроустойчивость защитной струи при высоких скоростях истечения при использовании конфузорного сопла (Рис. 6, 7).

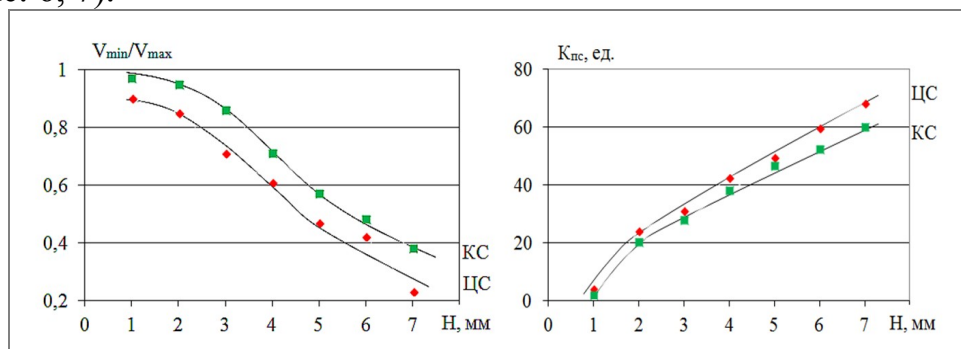


Рис. 6. Коэффициент изменения скорости защитной струи в продольном поле $V_{\min}/V_{\max}$

Рис. 7. Коэффициент изменения величины пограничного слоя защитной струи $K_{\text{пс}}$

Влияние ветра, электрода и плоскости, имитирующей свариваемую поверхность моделировали при решении трехмерной задачи. По результатам была получена трехмерная модель деформации газовых потоков, распределение скоростей потока, определены границы ядра струи и области распределения концентрации защитного газа при различных скоростях ветра (Рис. 8).

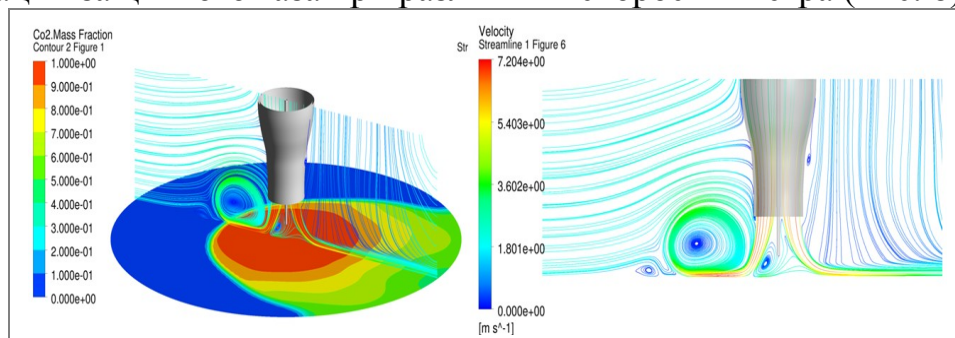


Рис. 8. Распределение концентрации защитного газа и скоростей газовых струй при сварке в среде CO_2 с использованием конфузорного сопла; $V_c/V_v = 2,0$

Установили зависимость эффективности газовой защиты от соотношений скоростей струи и ветра V_c/V_v , параметров режима сварки, определили критерий эффективности газовой защиты. Виртуальная модель доказала образование вихревых зон при обтекании элементов горелки на её продольной оси, которые могут быть причиной нарушения газовой защиты при сварке.

Сравнение данных ANSYS с экспериментальными результатами показало их расхождение на 5–8 %, что позволило сделать заключение об адекватном соответствии расчетных и экспериментальных значений и о пригодности разработанной модели для проведения дальнейших численных экспериментов.

Третья глава посвящена разработке оборудования для дуговой сварки в условиях ветра. Анализ конструкций горелок и сопел показал, что горелки имеют низкую эффективность в условиях ветра.

Для разработки конструкции горелки с конфузорной проточной частью применили теорию аэродинамики. Анализ истечения осесимметричных струй и свойств диффузоров, показал, что для достижения максимальной эффективности газовой защиты сопло должно иметь вид конфузора, внутренняя поверхность которого имеет форму параболической кривой, у которой начало и конец асимптотически стремятся к прямой линии, параллельной продольной оси конфузора. Форма параболической кривой может быть рассчитана согласно функциональным зависимостям:

$$f(x) = 1/(1+x^2)^q, \quad f(x) = 1/(\varepsilon h x^2)^q, \quad f(x) = l^{-x^2 q},$$

где l – длина конфузора, м, x – текущая осевая координата, м, q – произвольный коэффициент, который во всех случаях ≥ 1 . При этом, степень сжатия газовой струи на выходе из сопла $n = 1,5\text{--}4$ и определяется отношением площадей входного и выходного отверстия сопла F_1 и F_0 , где D_1 , D_0 – диаметры тех же отверстий: $n = F_1/F_0 = 4\pi D_1^2 / 4\pi D_0^2 = D_1^2/D_0^2$,

Общая длина сопла L определяется по опытным данным и принимается как сумма длины конфузора l , равная 1,5–3 выходных диаметров сопла D_0 , и длин прямолинейных участков: (0,2–0,4) выходного диаметра D_0 (Рис. 9, 11).

На основании изучения теории выравнивания поля скоростей, во входном сечении сопла установили пакет сеток с диаметром D и толщиной h . Пакет содержит не менее двух стальных сеток с размером ячеек $0,15\text{--}0,25\text{ мм}$ (Рис. 10).

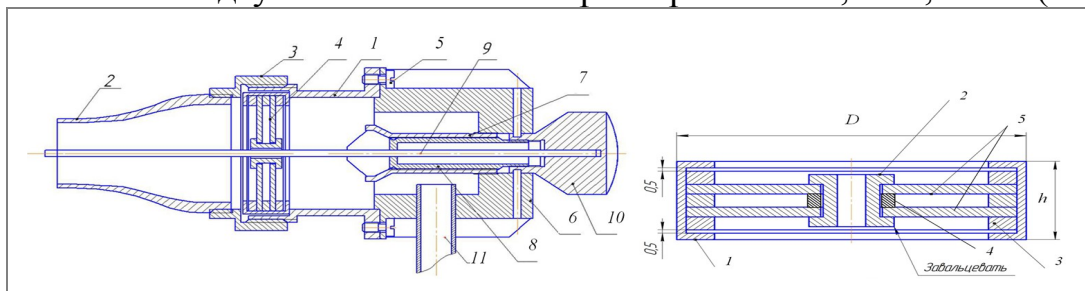


Рис. 9. Горелка с конфузным соплом: 1 – корпус, 2 – сопло, 3 – гайка, 4 – пакет сеток, 5 – винт, 6 – головка, 7 – электрододержатель, 8 – цанга, 9 – электрод, 10 – ручка, 11 – трубка газотокосвода

Рис. 10. Пакет сеток: 1 – корпус, 2 – втулка, 3, 4 – кольцо, 5 – сетка

Разработанная конструкция сопла имеет улучшенные аэродинамические характеристики, обеспечивающие повышение скорости истечения защитной газовой струи и необходимую степень сжатия газовой струи на выходе из сопла, что увеличивает ее стабильность и жесткость в условиях ветра (Рис. 11).

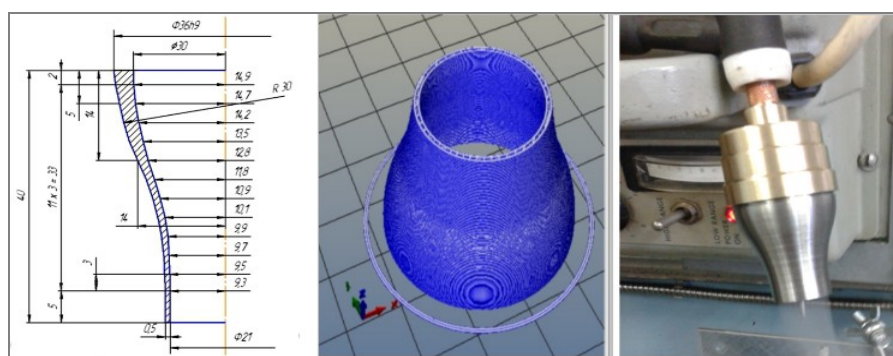
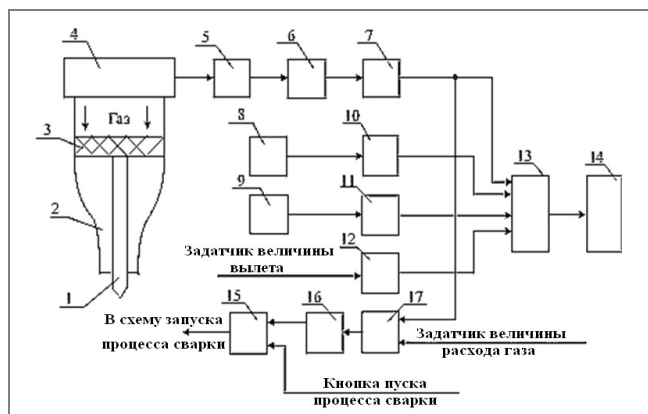


Рис. 11. Конструкция проточной части, визуализация прототипа сопла и вид сварочной горелки с конфузным соплом

Для автоматического управления процессом сварки в условиях ветра разработали и запатентовали схему устройства (Патент РФ № 2465997). (Рис. 12).



1 – электрод, 2 – конфузное сопло, 3 – пакет сеток, 4 – датчик скорости ветра, 5, 6, 10, 11 – интегрирующие усилители, 7 – запоминающее устройство, 8 – датчик температуры, 9 – датчик тока, 12 – задатчик величины вылета электрода, 13 – сумматор, 14 – автоматический регулятор скорости истечения газа, 15, 16 – логические элементы, 17 – задатчик максимальной величины скорости ветра

Рис. 12. Функциональная схема автоматической системы управления

Согласно функциональной схеме собрали макет устройства, позволяющий мгновенно управлять расходом защитного газа в зависимости от скорости ветра с учетом его усиления (Рис. 13).

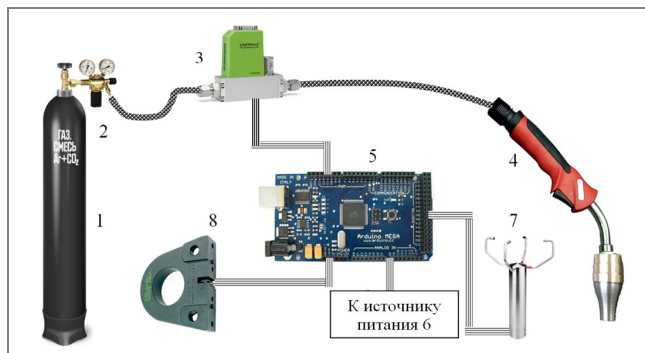


Рис. 13. Макет автоматической системы управления потоком защитного газа: 1 – баллон с газом; 2 – редуктор; 3 – электронный регулятор-расходомер; 4 – горелка с конфузным соплом; 5 – контроллер Arduino; 6 – источник питания; 7 – ультразвуковой анемометр; 8 – датчик тока на эффекте Холла

В четвертой главе представлены результаты исследования сварочно-технологических свойств дуги и свойств сварных соединений, выполненных в условиях ветра. Расход газа оставляли постоянным, скорость ветра увеличивали от опыта к опыту. Видеосъемка при аргонодуговой сварке показала, что в условиях ветра применение новой горелки позволило стабилизировать форму дуги и уменьшить ее отклонения от продольной оси в 2–3 раза (Рис. 14).

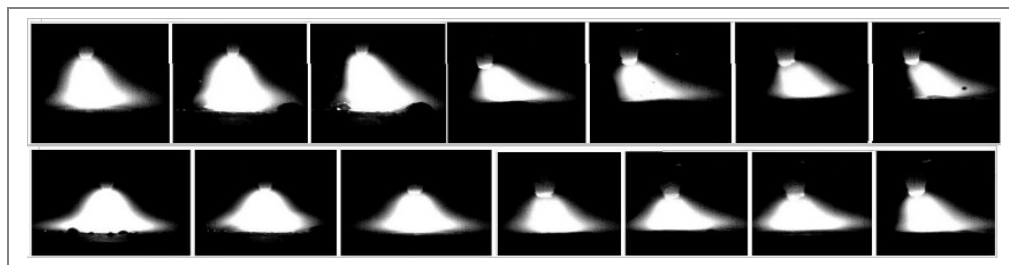


Рис. 14. Видеокадры сварочной дуги при аргонодуговой сварке промышленной (вверху) и разработанной (внизу) горелкой. Слева-направо: скорость ветра 2,5; 2,8; 3,5; 4,8; 5,8; 6,3 м/с

Осциллографирование сварочных токов и напряжений производили при механизированной сварке образцов толщиной 10 мм из стали 09Г2С в среде углекислого газа проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм при скорости сварки $V_{св} = 2,8$ мм/с, на лабораторном стенде с применением промышленной и разработанной горелки при воздействии ветра (Рис. 15).

Применение новой горелки позволило уменьшить отклонения сварочного тока и напряжения от среднеарифметической величины по сравнению с промышленной горелкой до ± 50 А и $\pm 4,5$ В, соответственно в 2 и 1,4 раза. При этом частота и длительность коротких замыканий уменьшилась в 1,7–2,1 раза, что свидетельствует об улучшении стабильности горения дуги в условиях ветра.

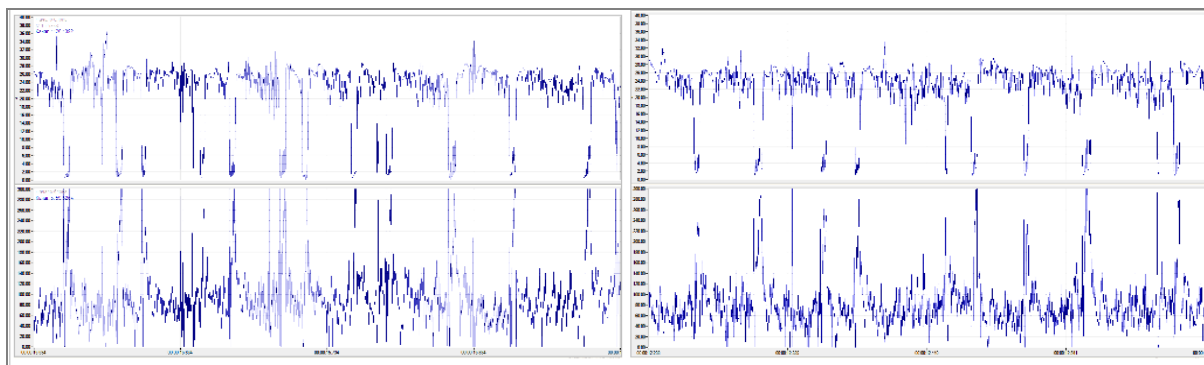


Рис. 15. Осциллограммы сварочного напряжения (вверху) и тока (внизу): слева – сварка промышленной горелкой при скорости ветра 1 м/с; справа – сварка новой горелкой при скорости ветра 3 м/с. Длительность записи 0,4 с

Для исследования свойств сварных соединений выполняли автоматическую сварку контрольных сварных соединений (КСС) труб диаметром 1420 мм с толщиной стенки 21,3 мм из стали класса прочности К60 при скорости ветра 3 м/с. Результаты испытаний образцов КСС показали, что при сварке с конфузорным соплом (КС) по сравнению с цилиндрическим соплом (ЦС) средняя величина ударной вязкости возрастает по шву на 8,3 %, по границе шва на 49,8 %; средняя величина твердости HV_{10} по сварному шву увеличивается на 37,8 %, в ЗТВ уменьшается на 5,1 %. Анализ химического состава швов КСС труб показал, что при использовании новой горелки средние значения углерода, кремния, марганца, никеля в шве увеличились соответственно на 53,3 %; 10,5 %; 13,9 %, 1,9 %, что свидетельствует об улучшении газовой защиты сварочной ванны (Рис. 16).

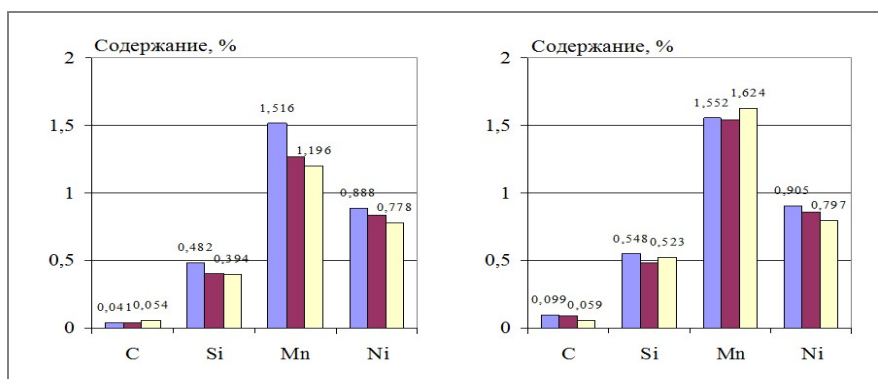


Рис. 16. Содержание в шве КСС элементов C, Si, Mn, Ni. Три точки измерения. КСС № 1: ЦС (слева), КСС № 2: КС (справа)

Результаты газового анализа шва образцов КСС, выполненных в условиях ветра показали, что среднее интегральное содержание кислорода [O] при сварке горелкой с КС уменьшается в корне шва (КШ) на 20,7 % и на 30,8 % в выпуклости шва (ВШ). Среднее интегральное содержание азота [N] при сварке горелкой с КС уменьшается в корне шва (КШ) на 22,9 % и на 32,8 % в выпуклости шва (ВШ) (Рис. 17).

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют об улучшении газовой защиты сварочной ванны при воздействии ветра с использованием горелки с конфузорным соплом.

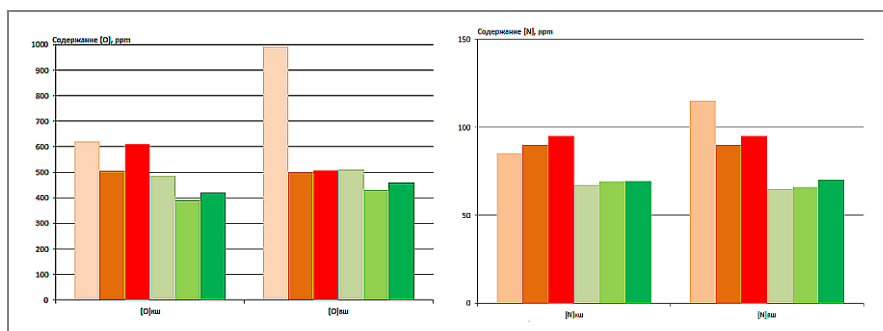


Рис. 17. Содержание в швах КСС кислорода и азота. По три образца: КШ – корень шва; ВШ – выпуклость шва: слева – ЦС, справа – КС

Общие выводы и результаты

1. Установлено, что при строительстве и монтаже объектов с применением дуговой сварки в условиях ветра происходит деформация защитной газовой струи, что приводит к возникновению внутренних и внешних дефектов, ухудшению механических свойств и химического состава наплавленного металла, что снижает качество, надежность и работоспособность ответственных сварных конструкций.

2. Установлено, что эффективность газовой защиты при сварке на ветру определяется стабильностью, формой и размерами ядра защитной газовой струи, которые зависят от скорости и характера истечения, расхода газа, траектории движения по соплу и равномерности поля скоростей струи в условиях воздействия ветра.

3. На основе математического моделирования защитной струи в программе ANSYS и экспериментального моделирования на испытательном стенде установлено распределение поля скоростей движения газовой струи и расход защитного газа, в зависимости от формы сопла, его расстояния до свариваемой поверхности и начальной скорости газовой струи на входе в сопло.

4. Экспериментально показано, что при различной частоте и скорости ветра с резкими усилениями, эффективность газовой защиты и стабильность сварочной дуги повышается при увеличении скорости истечения защитной струи из конфузорного сопла.

5. На основе расчетно-экспериментальных данных подобраны режимы сварки в условиях ветра в зависимости от диаметра сопла, от величины отношения скоростей газовой струи и ветра, а также от расстояния между соплом и свариваемой поверхностью.

6. На основе анализа технических решений и расчетно-экспериментальных данных, разработана и внедрена в производство конструкция сварочной горелки, состоящая из конфузорного сопла с внутренней поверхностью в виде двухасимптотной параболической кривой и пакетом сеток, которая позволила увеличить стабильность и размеры ядра газовой струи при высокой скорости истечения, уменьшить неравномерность поля скоростей и турбулентность газовой струи на выходе из сопла в условиях ветра.

7. Разработан универсальный стенд с многорежимной аэродинамической трубой и автоматической системой управления для моделирования процесса дуговой сварки в условиях воздействия ветра с резкими усилениями.

8. Разработан и изготовлен 3D-принтер для аддитивного выращивания узлов сварочной горелки, состоящий из электромеханического, электронного и программного модулей.

9. Разработана и запатентована система автоматического управления процессом сварки, которая позволяет управлять подачей и расходом защитного газа в зависимости от режима сварки, скорости и частоты усиления ветра.

10. Проведены успешные производственные испытания технологии и оборудования на базе ОАО «Ленгазспецстрой» в рамках НИОКР по заказу ООО «ГазпромВНИИГАЗ», путем автоматической сварки магистральных труб газопроводов диаметром 1420 мм с толщиной стенки 21,3 мм из стали с категорией прочности К60 в условиях ветра со скоростью 3 м/с.

11. На основе проведенных комплексных исследований показано, что показатели прочности, пластичности и геометрические характеристики сварных соединений, выполненных по новой технологии, удовлетворяют требованиям СТО Газпром 2–2.2–083–2007, СТО Газпром 2–2.2–136–2007. Экспериментально показано, что новая технология и оборудование позволяют улучшить стабильность горения сварочной дуги, уменьшить отклонения параметров режима сварки при воздействии ветра.

Таким образом, применение разработанного оборудования и технологии для дуговой сварки в условиях ветра позволило повысить эффективность газовой защиты и качество сварных соединений, **что свидетельствует о достижении цели работы.**

Основные результаты работы представлены в публикациях:

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ:

1. Федоренко Г.А., Иванова И.В., Синяков К.А. Совершенствование технологического процесса сварки в защитных газах на ветру // Сварочное производство. 2010. № 1. С. 6–13.

2. Fedorenko G.A., Ivanova I.V., Sinyakov K.A. Improving the efficiency of welding in shielding gases in windy conditions // Welding International. 2011. V. 25, № 6. P. 484–490.

3. Паршин С.Г., Иванова И.В., Кобецкой Н.Г. Исследование эффективности газовой защиты при дуговой сварке в условиях воздействия воздушных потоков // Сварка и диагностика. 2015. № 3. С. 31–34.

4. Паршин С.Г., Иванова И.В. Исследование сварочной дуги в защитных газах в условиях воздействия воздушных потоков // Сварка и диагностика. 2016. № 2. С. 46–48.

5. Паршин С.Г., Иванова И.В., Петухов Е.П. Математическое моделирование параметров защитной газовой струи при сварке в условиях ветра // Сварка и диагностика. 2016. № 3. С. 21–25.

Публикации в изданиях РИНЦ:

6. Иванова И.В. Горелка для сварки в защитных газах – инструмент эффективности газовой защиты // Инструмент и технологии. 2010. № 32–33. С. 32–38.

7. Иванова И.В., Кобецкой Н.Г., Калинина В.И., Паршин С.Г. Исследование сварочной дуги в защитных газах в условиях сносящих

воздушных потоков // Современные материалы, техника и технологии. 2015. № 1. С. 101–103.

8. Завьялов В.Е., Иванова И.В., Калинина В.И., Кобецкой Н.Г. Развитие технологии и оборудования сварки на ветру // Труды МНТК «Современные материалы, техника и технология». Курск: ЮЗГУ, 2014. С. 175–178.

9. Иванова И.В., Янулина В.Ю. Исследование возможности управления сварочными процессами в среде защитных газов в условиях ветровой нагрузки // Труды МНТК «Неделя Науки». СПб: Изд-во СПбПУ, 2014. С. 183–190.

10. Иванова И.В., Кобецкой Н.Г., Калинина В.И., Завьялов В.Е. Автоматизированная установка для проведения экспериментальных исследований эффективности газовой защиты при сварке в сносных воздушных потоках // Труды МНТК «Современные материалы, техника и технология». Курск: ЮЗГУ, 2014. С. 209–211.

11. Иванова И.В., Паршин С.Г., Калинина В.И., Кобецкой Н.Г. Устройство для электродуговой сварки в среде защитных газов на ветру // Труды МНТК «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации». Курск: ЮЗГУ, 2015. С. 184–186.

12. Иванова И.В., Калинина В.И., Липик А.Э. Система управления газовой защитой при дуговой сварке в условиях ветра // Прогрессивные технологии и процессы. 2015. № 2. С. 153–157.

13. Иванова И.В., Калинина В.И., Паршин С.Г. Исследование свойств сварочных горелок, эксплуатируемых на открытом воздухе // Современные материалы, техника и технологии. 2015. № 2. С. 55–58.

14. Иванова И.В., Липик А.Э. Автоматическое устройство управления газовой защитой при дуговой сварке в условиях ветра // Труды МНТК «Неделя Науки». СПб: Изд-во СПбПУ, 2015. С. 106–109.

15. Иванова И.В., Калинина В.И., Паршин С.Г. Методика исследования механических свойств материала сварных соединений, выполненных в условиях ветра // Труды МНТК «Современные материалы, техника и технологии». Курск: ЮЗГУ, 2015. С. 58–60.

16. Иванова И.В., Калинина В.И., Паршин С.Г. Совершенствование конструкции сварочных горелок для работ на открытых монтажных площадках // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 2. С. 155–159.

17. Иванова И.В., Калинина В.И. Постановка научных и учебных экспериментов с использованием ресурсов аддитивных технологий // Труды МНТК «Прогрессивные технологии и процессы». Курск: ЮЗГУ, 2016. С. 101–103.

18. Кобецкой Н.Г., Иванова И.В., Федоренко Г.А. Устройство для электродуговой сварки в среде защитных газов на ветру. Патент РФ № 2465997 от 24.09.10 г. Опубл. 10.11.2012. Бюл. № 31.

Отпечатано в типографии Политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Заказ

Тираж