

На правах рукописи



Торопчин Артём Игоревич

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЖАТОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ С
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ**

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт – Петербургский политехнический университет Петра Великого» на кафедре «Электротехника и электроэнергетика»

Научный руководитель: **Фролов Владимир Яковлевич**
доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:** **Карасев Михаил Валентинович**
доктор технических наук,
генеральный директор ЗАО «Научно-
производственная фирма «Инженерный и
технологический сервис»

Кузнецов Владимир Евгеньевич
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией ФГБУН «Институт
электрофизики и электроэнергетики Российской
академии наук»

Ведущая организация: ОАО «НПО ЦКТИ» (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится 28 декабря 2015 г., в 16 часов на заседании диссертационного совета Д.212.229.20 в ФГАОУ ВО «Санкт – Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт – Петербург, ул. Политехническая, 29, Главный учебный корпус, аудитория 150.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте университета <http://www.spbstu.ru/science>.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Иванов Д.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Технологические процессы, производимые с помощью сжатой электрической дуги (резка, сварка, термическая обработка), нашли применение в различных областях промышленности, таких как машиностроение, судостроение, космическое аппаратостроение, электроника и т.д. В данной работе взаимодействие потока сжатой электрической дуги с технологическим объектом рассматривается на примере сварочного процесса, и результаты исследования могут быть адаптированы для сварочного производства. Технология сварки сжатой дугой является родственной технологии аргонодуговой сварки неплавящимся электродом. Достоинства воздействия сжатой электрической дугой заключаются в более высокой температуре плазменного потока, её более концентрированном и локальном нагреве технологического объекта по сравнению со свободно горящей дугой в случае аргонодуговой сварки. За счёт перечисленных особенностей данной технологии обеспечивается более глубокое проплавление свариваемых кромок, меньшая ширина сварного шва, а, следовательно, и зона термического влияния (далее по тексту ЗТВ). Именно в области ЗТВ, а не в сварном шве, происходит излом при механических испытаниях заваренных проб. Меньшие размеры ЗТВ по сравнению с аргонодуговой сваркой позволяют судить о том, что прочностные характеристики сварного шва, выполненного сжатой дугой, выше, чем у швов, заваренных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом.

Не менее важным параметром, чем механические характеристики сварного шва, является тепловложение в металл от электрической дуги и последующие деформации. Сварка сжатой дугой позволяет выполнять процесс концентрированным потоком плазмы, не перегревая металл и уменьшая последующие затраты, связанные с правкой заваренной конструкции.

По глубине проплавления и ширине сварного шва сварку сжатой электрической дугой можно сравнить с лазерно-дуговой сваркой. Однако

неоспоримым преимуществом для отечественной промышленности является наличие ГОСТ'а на плазменную сварку, в то время как на лазерно-дуговой процесс он отсутствует, что позволяет уже сейчас применять сжатую электрическую дугу для более широкого спектра производственных задач. Так как плазменная сварка является дуговым способом сварки по ГОСТ Р ИСО 4063-2010, то основные типы, конструктивные элементы и размеры сварных швов определяются по ГОСТ 14771-76.

Изучению и моделированию плазмы сжатой электрической дуги посвящены научные труды Б.Е. Патона, В.В. Башенко, В.Я. Фролова, Н.А. Соснина, Ю.Д. Щицына, Y.M. Zhang, J. Haidar, J.C. Metcalfe. В области моделирования сварочной ванны, описании физических процессов, происходящих в расплавленном металле под действием электрической дуги, значительный вклад внесли работы Н.Н. Рыкалина, В.А. Кархина, В.А. Судника, М. Tanaka, J.J. Lowke, A.V. Murphy и др.

Возможность управления тепловым потоком и давлением электрической дуги, воздействующей на технологический объект, начиная с зажигания дуги и заканчивая процессом охлаждения расплавленного металла, за счёт разработанной компьютерной модели процесса и рекомендованных параметров силы тока, расстояния между электродами и др., позволяет применять данную технологию в более широких (по сравнению с нынешними) диапазонах производственных задач. Однако, рассматривая процесс взаимодействия сжатой электрической дуги с технологическим объектом на примере сварочного процесса, было установлено, что область применения технологии ограничивается отсутствием:

- уточнённых режимов ведения процесса, обеспечивающих максимальный провар детали необходимой толщины совместно с минимальными размерами ЗТВ;

- компьютерной модели, учитывающей все известные силы и физические явления, сопровождающие процесс сварки сжатой электрической дугой.

Цели и задачи работы. Разработка модели и исследование процесса взаимодействия сжатой электрической дуги с технологическим объектом с целью

совершенствования технологического процесса обработки металлов и расширения области применения концентрированного плазменного потока.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка алгоритма моделирования процесса взаимодействия сжатой электрической дуги с технологическим объектом, включая расчёт плазменной дуги и её взаимодействие с расплавленным металлом, на примере сварочного процесса.
2. Разработка методики проведения экспериментальных исследований температуры и формы сжатой дуги, глубины проплавления и формы сварочной ванны, размеров ЗТВ с целью подтверждения результатов численного моделирования.
3. Исследование влияния эффекта Марангони на форму сварочной ванны и направление движения расплавленного металла в ней в зависимости от химического состава технологического объекта и способа воздействия на него.
4. Определение удельной кондуктивной, конвективной и электронной составляющих мощности, выделяемой на поверхности анода, при взаимодействии сжатого теплового потока с технологическим объектом.
5. Определение режимов воздействия сжатой электрической дугой для обеспечения проплавления свариваемых кромок технологического объекта.

Объектами исследования являются сжатая электрическая дуга и нагреваемый ей технологический объект.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования выполнялись методом численного моделирования процесса горения электрической дуги и взаимодействия «плазменная струя – технологический объект». В основе моделирования лежит решение уравнений баланса энергии, неразрывности, движения, системы уравнений Максвелла методом контрольного объёма.

Для достижения цели диссертационной работы и верификации результатов численного моделирования было принято решение выполнить экспериментальные исследования процесса взаимодействия сжатой и свободно

горящей дуги с технологическим объектом методами спектральной диагностики плазменного потока и изготовления макрошлифа из технологического объекта.

Методологической основой диссертационной работы послужили фундаментальные знания в областях теорий газовой динамики, процессов термодинамики и теплообмена, металлургии для твёрдых, жидких и газообразных сред, а также научные труды отечественных и зарубежных учёных по проблемам численного моделирования процессов сварки, проведения спектральной диагностики электрической дуги и последующей обработки результатов.

Научная новизна. По результатам диссертационной работы были получены следующие результаты, представляющие научную новизну:

1. Разработана модель взаимодействия сжатой дуги и технологического объекта в пакете прикладных программ ANSYS CFX, учитывающая эффекты и физические явления, возникающие при взаимодействии «плазма - деталь». Произведён анализ эффекта Марангони на форму ванны расплавленного металла и ЗТВ при взаимодействии «сжатая электрическая дуга – технологический объект».
2. Разработаны режимы сварки сжатой электрической дугой (включая силу тока, расстояние между электродами, скорость перемещения горелки и расход защитного газа аргона), обеспечивающие эффективное проплавление свариваемых деталей при минимальных размерах ЗТВ.
3. Разработана методика расчёта размеров ЗТВ, позволяющая установить профиль ЗТВ без проведения дополнительных экспериментов. Установлены закономерности изменения параметров, влияющих на ЗТВ.

Практическая значимость работы. Результаты работы могут быть применены при выполнении технологического процесса сварки сжатой электрической дугой на производственных объектах с целью усовершенствования технологического процесса. А именно, за счёт уменьшения размеров ЗТВ улучшить механические свойства сварных швов, за счёт уменьшения тепловложения по сравнению с аргонодуговой сваркой снизить расходы на правку конструкций. Применение численного моделирования процесса сварки на

производственных объектах позволит сократить объёмы работ, выполняемых лабораторией сварки экспериментальным методом.

Также результаты могут оказаться полезными научным центрам при актуализации стандартов на сварку сжатой электрической дугой.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм создания численной модели процесса взаимодействия сжатой электрической дуги и свободно горящей дуги с технологическим объектом, позволяющей выделить зависимость размеров ванны расплавленного металла и ЗТВ от силы тока и степени концентрации дуги.
2. Анализ формирования сварочной ванны в зависимости от химического состава стали. Влияние эффекта Марангони на профиль сварочной ванны и ЗТВ при взаимодействии сжатой электрической дуги с технологическим объектом.
3. Результаты теоретических исследований режимов сварки сжатой электрической дугой, анализ составляющих мощности теплового потока (выделяемой на поверхности анода) и способов управления им.
4. Методика проведения экспериментальных исследований: схема эксперимента, определение температуры столба электрической дуги методами видеосъёмки быстрыми (высокоскоростными) камерами и с помощью спектрографа, анализ, полученных в результате нагрева технологического объекта, макрошлифов.
5. Сравнение и анализ результатов, полученных методом численного моделирования и экспериментальным путём.

Достоверность полученных результатов обеспечивается системным подходом к решаемой задаче, теоретически обоснованными уравнениями, которые лежат в основе компьютерного моделирования, анализом сторонних научных источников и сравнением результатов эксперимента, полученных с помощью анализа макрошлифов и спектральной диагностики, с результатами численных расчётов.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на следующих научных конференциях:

1. Международная конференция «High Tech Plasma Processes - 2014» (Франция, Тулуза, 2014).
2. XX и XXI Международные конференции «Physics of Switching Arcs» (Чехия, Нове-Место-на-Мораве, 2013 и 2015 соответственно).
3. XI Международная конференция «Плёнки и покрытия - 2013» (Россия, Санкт-Петербург, 2013).
4. Международная научно-практическая конференция: «Инновационные технологии в науке и образовании - III» (Россия, Улан-Удэ, 2013)
5. XLI, XLII, XLIII Научные форумы с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Россия, Санкт-Петербург, 2012, 2013, 2014 соответственно).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 работ, из которых 4 изданы в журналах, входящих в список ВАК и индексируемых в базе Scopus.

Личный вклад. Автор на всех этапах работы непосредственно участвовал в постановке задачи, разработке компьютерной модели исследуемого процесса, выборе методик расчётов теоретических параметров, определении схемы проведения эксперимента и методов диагностики сжатой электрической дуги, а также обработке результатов, полученных методом численного моделирования и экспериментальным путём, и формировании выводов по проведённой работе.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы, включающего 83 наименования. Полный объём диссертации – 110 страниц, в том числе рисунков – 70, таблиц – 10.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении представлены актуальность выбранной темы, краткое состояние проблем исследования сжатой электрической дуги, её взаимодействия с технологическим объектом и процессов формирования ванны расплавленного металла и ЗТВ, сформулированы цели и задачи работы, отмечены научная новизна и практическая ценность.

Первая глава посвящена обзору современного состояния исследований в области взаимодействия электрической дуги с технологическим объектом, исследований процесса формирования ванны расплавленного металла и ЗТВ. ЗТВ при динамических и вибрационных нагрузках может стать местом разрушения сварной конструкции. На данном этапе выполнено несколько работ по изучению размеров зоны расплавленного металла для различных режимов и способов сварки в зависимости от химического состава технологического объекта. Однако критический анализ широко известных работ в области моделирования сварочных процессов не выявил однозначного нахождения зависимости поверхностного натяжения металла в зависимости от температуры нагрева. А ведь значение поверхностного натяжения является ключевым в определении эффекта Марангони и степени его влияния на размеры сварочной ванны, а также на ЗТВ.

Также в первой главе представлены основные достижения в области моделирования плазменного потока, как для случая сжатой электрической дуги, так и для родственного процесса, выполняемого свободно-горящей дугой (на примере аргонодуговой сварки). Несмотря на широкий спектр изучаемых вопросов (способ подачи газа – аксиальный или тангенциальный, можно ли принять плазму находящейся в состоянии локального термодинамического равновесия или необходимо усложнять модель дуги, отходя от её равновесности), отсутствует детальное описание процесса теплообмена между электрической дугой и заготовкой, а также основные принципы управления плазменным потоком с целью минимизации размеров ЗТВ. Именно этим аспектам уделено широкое внимание в данной работе.

Кроме того широко представлены современные достижения в области диагностики электрической дуги с помощью спектрографа, а также относительно нового метода, анализирующего снимки быстрых камер, сделанные с использованием интерференционного фильтра для отбора определённых диапазонов спектра, которые требуют теоретических знаний обо всех типах эмиссии (атомной, ионной и континууме, так называемом непрерывном излучении).

Таким образом, на основании критического анализа в области исследований взаимодействия сжатой электрической дуги с технологическим объектом, определён ряд задач, позволяющих разработать компьютерную модель процесса взаимодействия сжатой электрической дуги с технологическим объектом, выполнить верификацию численных расчётов с помощью экспериментальных методов исследований. Результаты могут оказаться актуальными при определении режимов воздействия сжатой электрической дугой, обеспечивающих проплавление свариваемых кромок технологического объекта, без проведения дополнительных экспериментов, и при переиздании существующих стандартов, в том числе ГОСТ 14771-76, который определяет конструктивные элементы и размеры сварных швов как для сварки сжатой дугой, так и для аргонодуговой сварки. Такая универсальность стандарта не соответствует основному преимуществу сжатой электрической дуги - более глубокому проплавлению с меньшей шириной шва и размерами ЗТВ.

Во второй главе представлена методика численного моделирования процесса взаимодействия «сжатая электрическая дуга – технологический объект» в используемом пакете прикладных программ ANSYS CFX.

Разработанная модель включает расчёт уравнений баланса энергии, неразрывности, движения и систему уравнений Максвелла. Также при моделировании ванны расплавленного металла были учтены сила Архимеда; сила, возникающая под действием давления дуги; электромагнитная сила; эффект Марангони, возникающий вследствие наличия градиента поверхностного натяжения. Численные расчёты в программном продукте ANSYS CFX выполняются с помощью метода контрольного объёма.

В результате математического моделирования получены распределения температуры плазменного потока, давления в области анода и аксиальной скорости, а также размеры ванны расплавленного металла и ЗТВ для случая сжатой электрической дуги при различных режимах ведения процесса: сила тока варьировалась от 100 А до 200 А, длина дуги – 6 - 13 мм, расход защитного инертного газа аргона – 4 - 12 л/мин, скорость перемещения горелки – 12,5 и 25,0

м/ч. Аналогичные распределения были рассчитаны для свободно горящей дуги при близких условиях. На рисунке 1 представлены результаты профиля ванны расплавленного металла, ЗТВ и распределения температуры сжатой электрической дуги (слева) и свободно горящей (справа) при следующих условиях: сила тока – 200 А, расстояние между катодом и анодом – 10 мм (длина открытой части сжатой дуги – 5 мм), диаметр вольфрамового катода марки ЭВЛ – 3 мм, скорости перемещения горелки 25 м/ч, расход аргона – 4 л/мин и 12 л/мин соответственно, технологический объект – низкоуглеродистая низколегированная сталь марки S235.

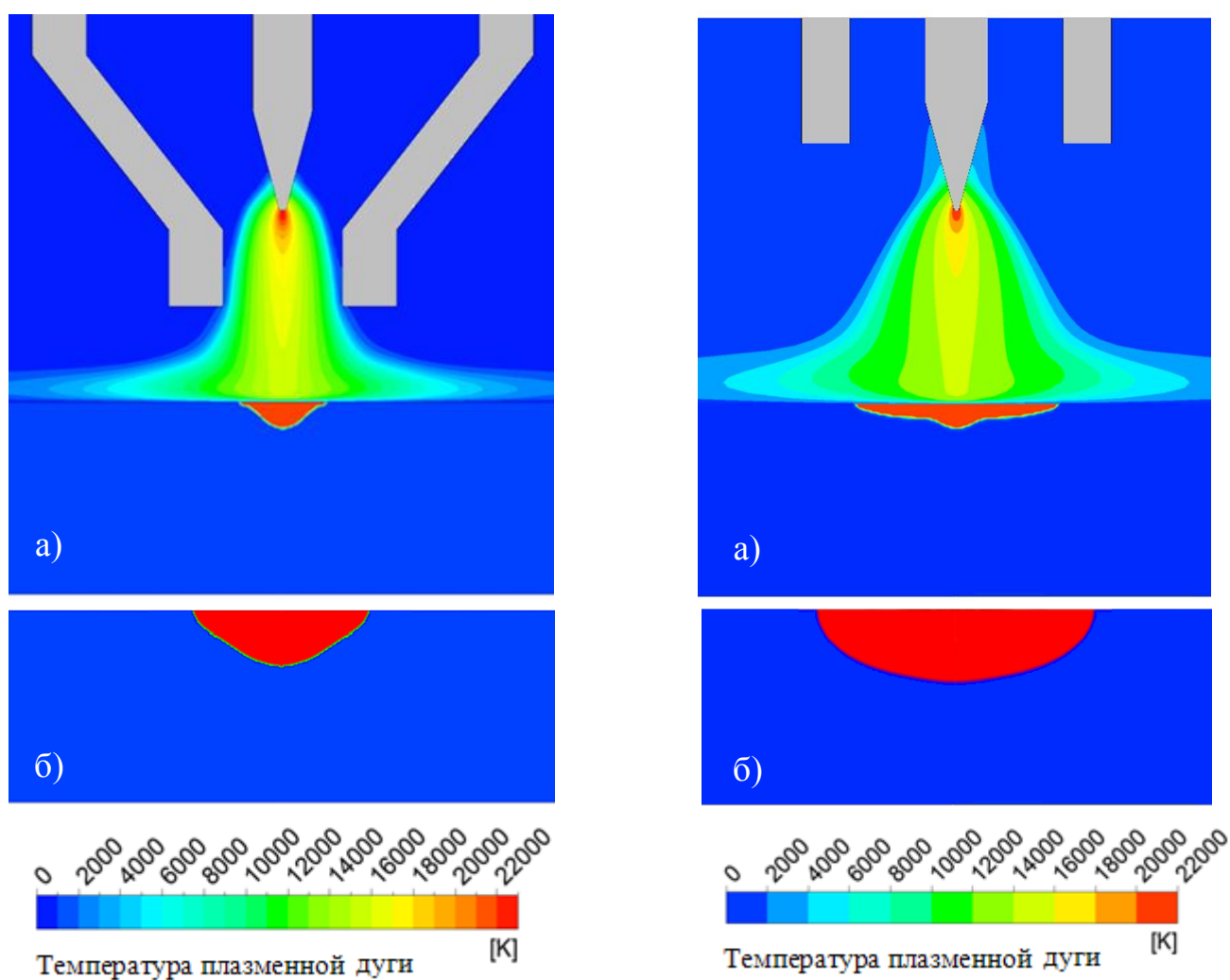


Рисунок 1 – Распределение температуры сжатой электрической дуги (слева) и свободно горящей (справа) при токе 200 А, расстоянии между электродами 10 мм.

а – красная область в технологическом объекте показывает профиль ванны расплавленного металла, б – профиль ЗТВ

На рисунке 2 представлен профиль ванны расплавленного металла марки S235 с учётом в модели эффекта Марангони (а) и без его учёта (б) для случая свободно горячей дуги. Полученные результаты подтверждают необходимость включения в компьютерную модель значений силы поверхностного натяжения, зависящих от химического состава технологического объекта и температуры его нагрева.

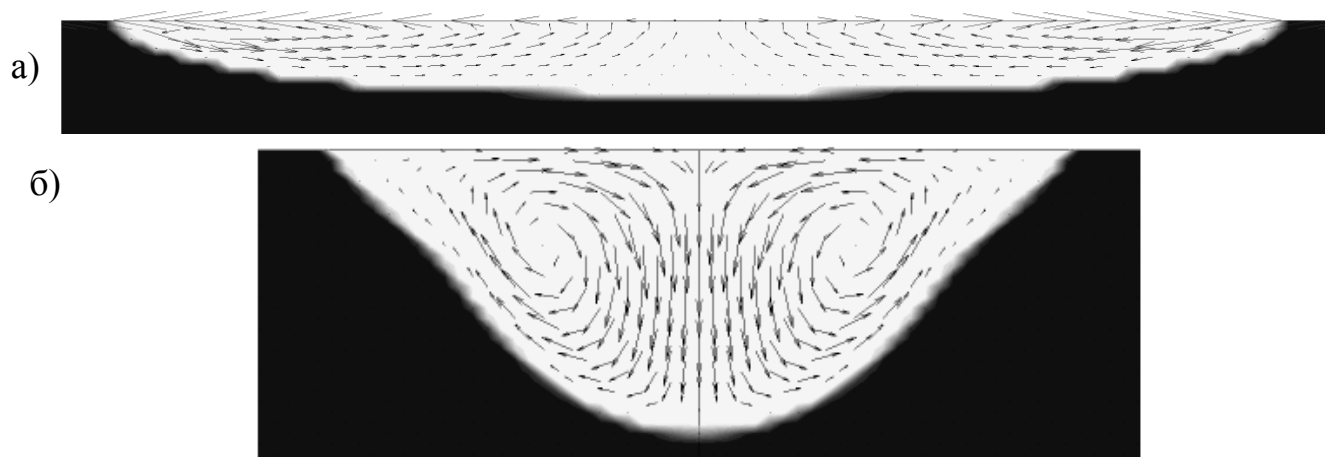


Рисунок 2 – Профиль ванны расплавленного металла с учётом в модели эффекта Марангони (а) и без его учёта (б) для случая свободно горячей дуги

Кроме того, был проведён анализ движения расплава и профиля ванны расплавленного металла марки S235 для случая воздействия на технологический объект сжатой электрической дугой (рисунок 3).

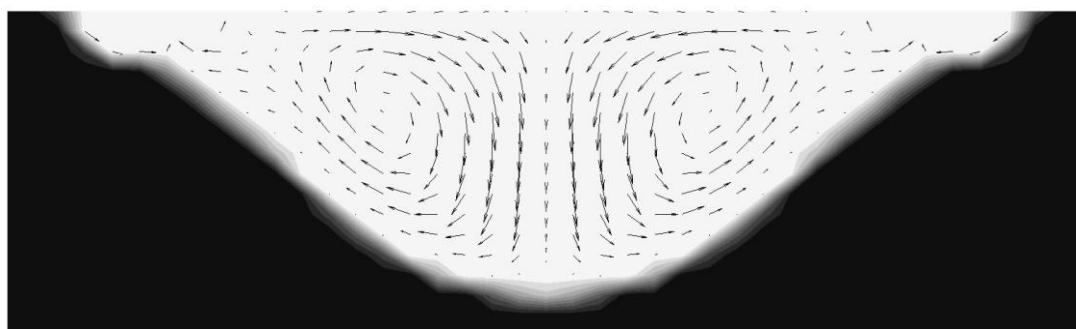


Рисунок 3 – Профиль ванны расплавленного металла с учётом в модели эффекта Марангони для случая сжатой электрической дуги

Полученный результат очень близок к форме ванны и движению расплава внутри при воздействии на технологический объект свободно горячей дугой без учёта эффекта Марангони и достигается за счёт большего давления по оси сжатой электрической дуги. Однако можно заметить, что на краях сварочной ванны, в тех областях, где давление плазменного потока ниже, движение расплавленного

металла происходит в обратном направлении, сходном с ванной, образовавшейся под действием свободно горящей дуги.

Также во второй главе приведены результаты серии расчетов, выполненных с целью установления основных зависимостей параметров теплового потока в соответствии с технологическими нуждами. В процессе работы была рассчитана удельная мощность, выделяемая на поверхности анода, в случае сжатой электрической дуги и в случае свободно горящей при расстоянии между анодом и катодом – 10мм. Приведены режимы ведения сварочного процесса сжатой электрической дугой при скорости перемещения горелки 12,5 и 25,0 м/ч, обеспечивающие глубокое проплавление и минимальные размеры ЗТВ.

В третьей главе приведена разработанная методика проведения экспериментальных исследований, целью которых является верификация компьютерной модели, сравнение температур и особенностей горения свободного и сжатого плазменных потоков, а также их воздействия на технологический объект (размеры ванны расплавленного металла и ЗТВ) при различных значениях силы тока, межэлектродного расстояния и скорости ведения процесса. На рисунке 4 изображена схема в соответствии с которой проводился эксперимент.

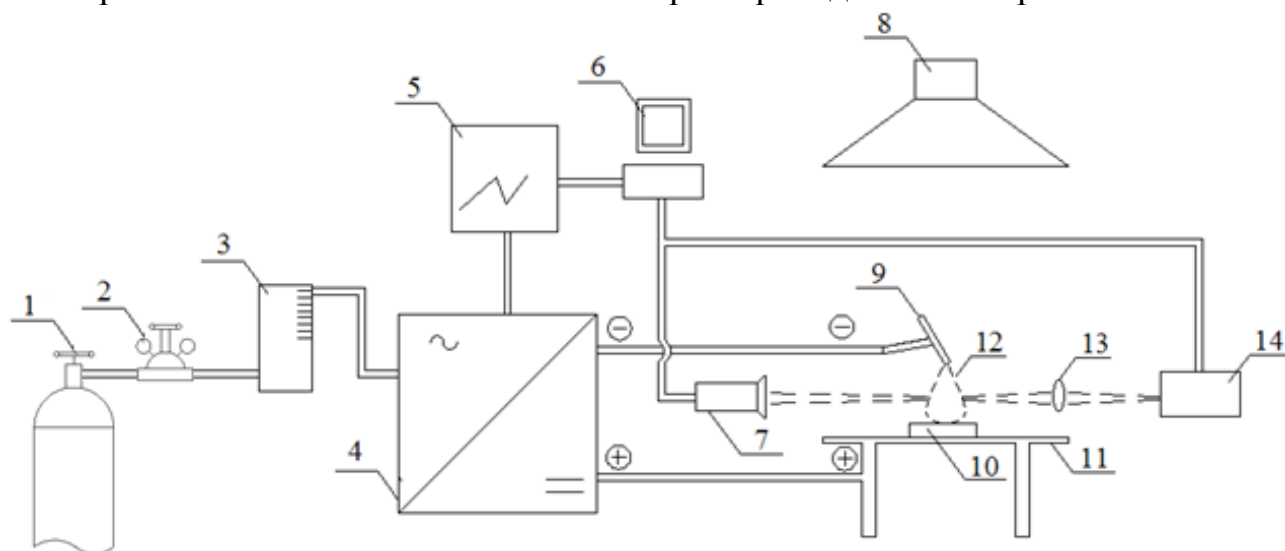


Рисунок 4 – Принципиальная схема экспериментальной установки

На рисунке 4 изображены: 1 - баллон с аргоном, 2 - газовый редуктор, 3 - ротаметр, 4 – сварочная установка, 5 - осциллограф, 6 - персональный компьютер, 7 - высокоскоростная камера, 8 – вытяжной зонт, 9 - горелка, 10 –

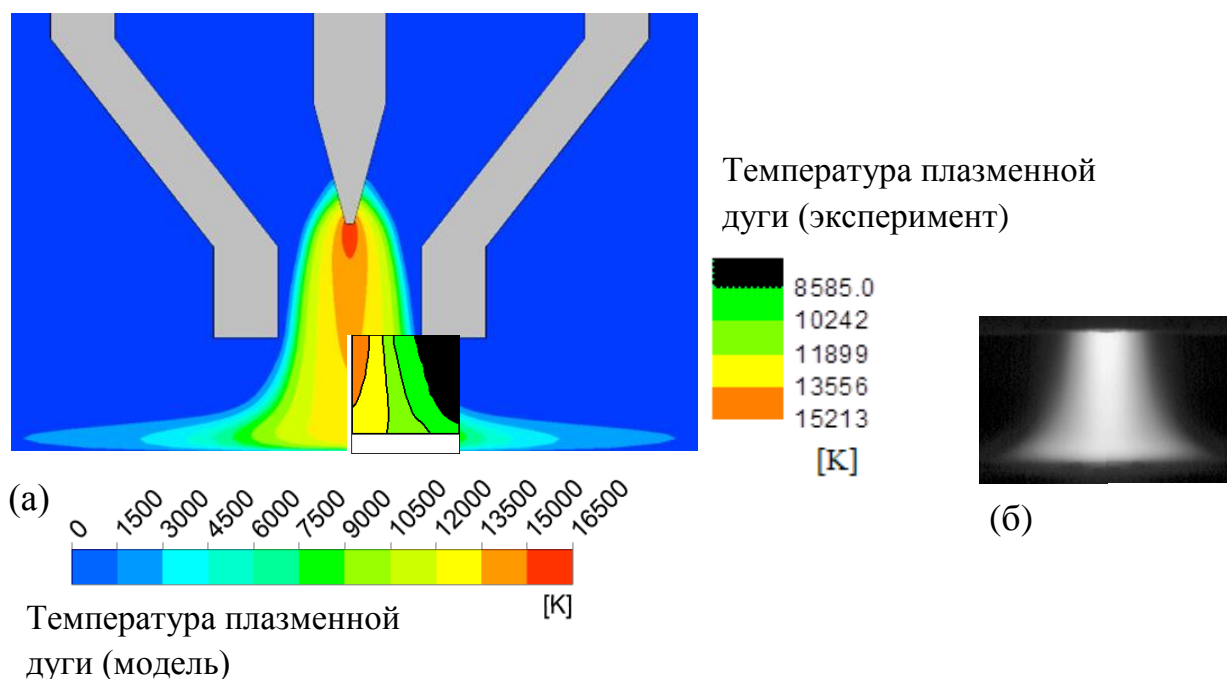
технологический объект, 11 - рабочий стол, 12 – электрическая дуга, 13 – фокусирующий элемент, 14- спектрограф.

Для изучения интенсивности электрической дуги, горящей в инертном газе – аргоне, использовалась быстрая камера с красным интерференционным фильтром для спектральных линий с длиной волны 812 ± 2 нм. Оптическая ось камеры в ходе эксперимента располагалась в середине межэлектродного промежутка и была параллельна заготовке. Время экспозиции – 20 μ s.

Кроме того, дуга была снята с помощью сферического зеркала на входную щель 0,75 монохроматора с усиливающей CCD камерой (PIMAX-2, Roper Scientific), обеспечивающей спектральное разрешение 0,05 нм. Время экспозиции составило 1 μ s, число штрихов дифракционной решётки – 2400 штр/мм. Данный метод нахождения температуры плазменного потока был применён, как более исследованный, с целью верификации данных, полученных с помощью быстрой камеры. Щель спектрографа отбирает поперечное сечение перпендикулярное к оси дуги. Таким образом, в одном осевом положении дуги было записано радиальное распределение интенсивностей для аргоновой линии 696,5 нм. С помощью спектрографа было исследовано распределение температуры электрической дуги по всему радиусу её горения в трёх осевых положениях: 1 мм выше технологического объекта (анода), середина дуги и 1мм ниже катода (только для случая свободно горящей дуги).

На рисунке 5 приведена экспериментально полученная карта температур и снимок сжатой электрической дуги, сделанный быстрой камерой, которые подтверждают рассчитанные форму дуги и распределение температуры при силе тока 100 А, расходе защитного газа аргона 4 л/мин и расстоянии между катодом и анодом – 10 мм. Разница в экспериментальных и теоретических результатах составляет не более 9%, за исключением краевых областей дуги. Расхождение в температуре на границе сжатой электрической дуги между результатами эксперимента и численных расчётов связано с отклонением плазмы в этой области от состояния локального термодинамического равновесия. Результаты измерения температуры электрической дуги в середине межэлектродного

промежутка и на расстоянии 1 мм от технологического объекта представлены на рисунке 6 и сравнены с результатами численного моделирования.



а – обработанные экспериментальные данные с быстрой камеры;

б – фотография, полученная с помощью быстрой камеры

Рисунок 5 – Сравнение результатов численного моделирования с экспериментально полученным полем температур сжатой электрической дуги при токе 100 А, расходе аргона 4 л/мин и расстоянии между катодом и анодом 10 мм

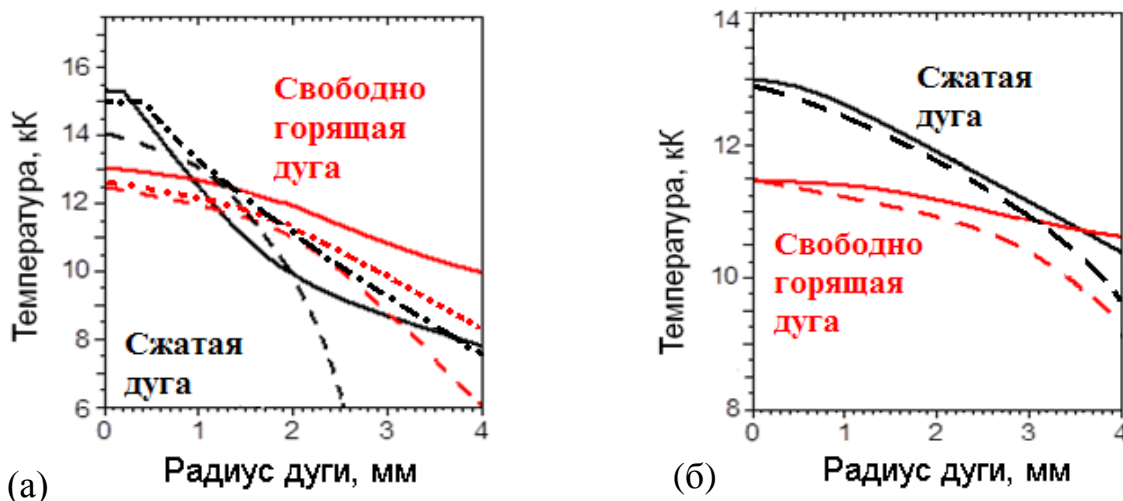
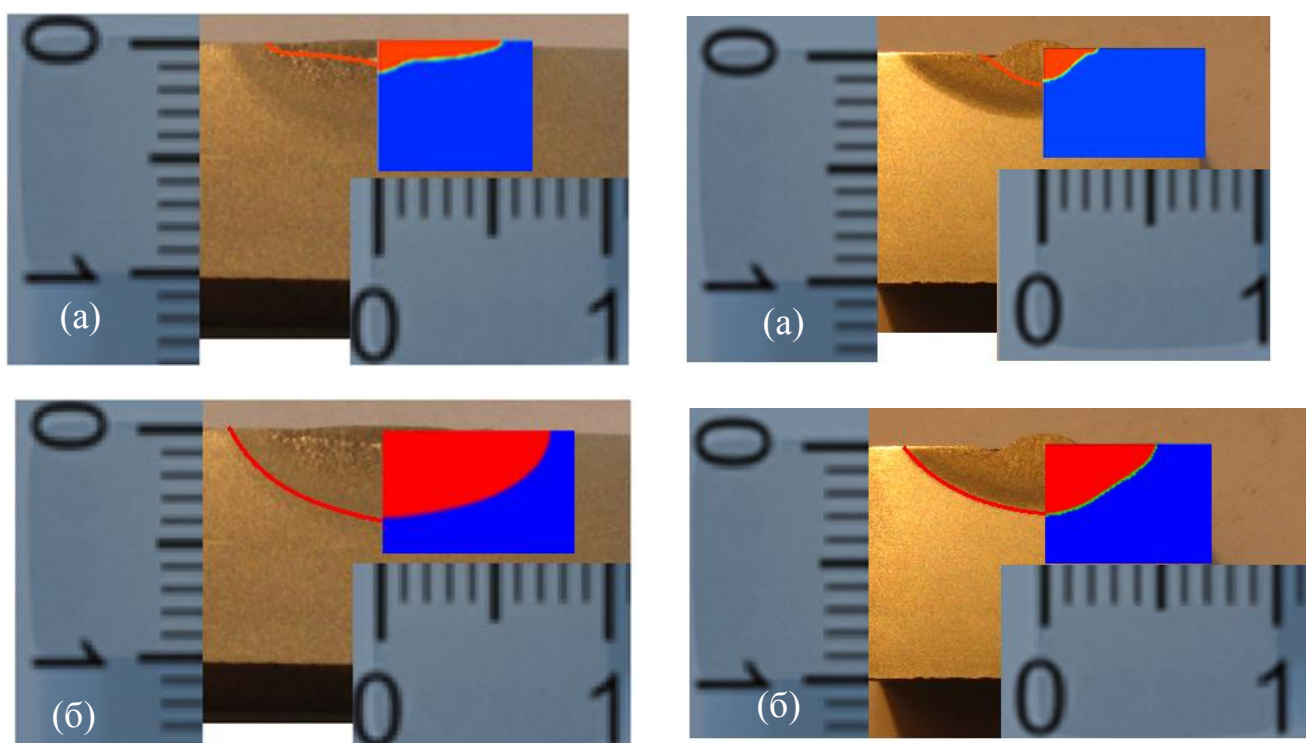


Рисунок 6 – Зависимость температуры дуги от её радиуса в середине межэлектродного промежутка (а) и на расстоянии 1 мм от анода (б) при токе 100А

Пунктирная линия на рисунке 6 – результаты моделирования; сплошная линия – результаты экспериментальных исследований; точка-тире – данные спектрографа.

На рисунке 7 представлены макрошлифы – результат взаимодействия сжатой электрической дуги и свободно горящей с технологическим объектом при силе тока 200 А, расстоянии между электродами 10 мм, скорости ведения процесса 25 м/ч и расходе аргона – 4 л/мин и 12 л/мин соответственно. На изображении отмечены профиль ванны расплавленного металла и ЗТВ, а результаты эксперимента сравнены с результатом компьютерной модели.

Анализ формы и размеров ванны расплавленного металла и ЗТВ, произведённый на основе макрошлифов, даёт представление о том, что при большей глубине проплавления технологического объекта (~ в два раза) и вдвое меньшей ширине ванны расплавленного металла для случая воздействия сжатой дугой, размеры ЗТВ ~ на 30% меньше по сравнению с процессом, производимым свободно горящей дугой. Это связано с локальным нагревом сжатой электрической дугой и её более кратковременным воздействием на технологический объект.



а – профиль ванны расплавленного металла, б – профиль ЗТВ

Рисунок 7 – Макрошлифы технологических объектов из стали марки S235, нагретых свободной горящей (слева) и сжатой (справа) электрической дугой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана компьютерная модель взаимодействия потока сжатой электрической дуги с технологическим объектом, детально рассмотрены силы, влияющие на процесс формирования ванны расплавленного металла и развития ЗТВ. Произведён анализ влияния эффекта Марангони на движение расплавленного металла внутри ванны, по результатам сделан следующий вывод: в случае воздействия на технологический объект свободно горячей электрической дугой поверхностное натяжение имеет главенствующее значение при формировании сварочной ванны. Для сжатой дуги на первый план выходит сила давления плазменного потока, особенно на его оси. При дальнейших исследованиях взаимодействия сжатой электрической дуги с технологическим объектом с целью получения более точной модели необходимо учесть изменение формы поверхности ванны расплавленного металла, что особенно важно при расчёте процессов резки металла и выплёскивании расплава из ванны.

2. В результате численного расчёта поставленной задачи в пакете прикладных программ ANSYS CFX получены пространственные распределения температуры, аксиальной скорости плазменного потока, давления, оказываемого на анод, для двух случаев: сжатой электрической дуги и свободно горячей дуги. Также получены профили ванны расплавленного металла и ЗТВ в результате взаимодействия потока сжатой электрической дуги и свободно горячей с технологическим объектом. Все результаты получены для широкого диапазона параметров горения дуги: сила тока варьировалась от 100 А до 200 А, длина дуги – 6 - 10 мм, расход защитного инертного газа аргона – 4 - 12 л/мин, скорость движения горелки – 12,5 м/ч и 25 м/ч.

3. Представлены режимы сварочного процесса сжатой электрической дугой для исследованного диапазона параметров. Разработанная компьютерная модель позволяет расширить диапазон параметров и адаптировать результаты для конкретных производственных задач.

4. На основе полученных численным методом результатов посчитаны удельная мощность и отдельно каждый её компонент, выделяемые на поверхности технологического объекта, а также энтальпия плазменного потока, характеризующая общий запас энергии системы. Данные результаты позволяют детально оценить эффект более мощного локального нагрева технологического объекта сжатой электрической дугой по сравнению со свободно горящей при сходных параметрах процесса.

5. Разработанная методика проведения экспериментальных исследований позволяет получить температуру дуги одновременно двумя методами: с помощью спектрографа и на основе снимков, полученных высокоскоростной камерой с фильтром для получения изображений спектральной области $811,8 \pm 2$ нм, что повышает точность проводимых измерений. Чтобы получить температуру в прикатодной области при проведении будущих экспериментов следует применить широкополосный интерференционный фильтр для спектральных линий с длиной волны 429 ± 10 нм.

6. Обработанные результаты со скоростной камеры и спектрографа, а также макрошлифов нагретых технологических объектов позволяют сравнить результаты экспериментальных исследований с результатами компьютерного моделирования, оценить форму столба сжатой электрической дуги совместно с узким и глубоким проплавлением, и небольшие размеры ЗТВ относительно случая воздействия на технологический объект свободно горящей дугой.

7. Результаты работы, имея теоретическую основу, подтверждённые экспериментальным и численным методами, могут быть применены при выполнении технологического процесса сварки сжатой электрической дугой на производственных объектах с целью уменьшения размеров ЗТВ сварных соединений и уменьшения тепловложения в конструкцию. Применение численного моделирования процесса сварки на производственных объектах позволит сократить объёмы работ, выполняемых лабораторией сварки экспериментальным методом.

Список публикаций автора:

- 1. Фролов, В.Я. Влияние параметров плазмы дуги на форму сварочной ванны / В.Я. Фролов, А.И. Торопчин // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, №13. – С. 41-47. (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)**
- 2. Toropchin, A. Calculation of the weld pool profile coupled with the arc simulation in a TIG process using software ANSYS CFX/ A. Toropchin, V. Frolov, D. Uhrlandt // Proc. XXth Symposium on Physics of Switching Arc. Editors: V. Aubrecht, M. Bartlova. – Brno, 2013. – P. 301–304. (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)**
- 3. Toropchin, A. Analysis of processes in DC arc plasma torches for spraying that use air as plasma forming gas / V. Frolov, D. Ivanov, A. Toropchin // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – Vol. 550. – 012021. (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)**
- 4. Toropchin, A. Influence of the arc plasma parameters on the weld pool profile in TIG welding / A. Toropchin, V. Frolov, A.V. Pipa, R. Kazakov, D. Uhrlandt // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – Vol. 550. – 012004. (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)**
5. Торопчин, А.И. Прогнозирование профиля сварочной ванны в среде ANSYS CFX / А. И. Торопчин, В. Я. Фролов // Пленки и покрытия – 2013: труды 11-й Международной конференции, 6 мая-8 мая 2013 года / Российская академия наук, Институт проблем машиноведения; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; [под ред. В. Г. Кузнецова]. – Санкт-Петербург, 2013. – С. 287–289.
6. Торопчин, А.И. Расчёт профиля сварочной ванны совместно с моделированием сварочной дуги в среде ANSYS CFX / А.И. Торопчин, В.Я. Фролов // Инновационные технологии в науке и образовании – III. – В сб. тр. м/н научно-практ. конф. 15–18 июля 2013 г., БГУ. – Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2013. – С. 124 – 130.
7. Торопчин, А.И. Прогнозирование профиля сварочной ванны в среде ANSYS CFX / А.И. Торопчин, В.Я. Фролов // XLI Неделя Науки СПбГПУ : материалы

научно-практической конференции с международным участием. – Санкт-Петербург, 2012. – Часть II. – С. 88–90.

8. Торопчин, А.И. Сравнительный анализ компьютерных моделей аргонодуговой сварки неплавящимся электродом и плазменной сварки / А.И. Торопчин, В.Я. Фролов // XLII Неделя Науки СПбГПУ : материалы научно-практической конференции с международным участием. – Санкт-Петербург, 2013.–Сборник лучших докладов. – С. 6–10.

9. Фролов, В.Я. Сравнение результатов экспериментально полученного профиля сварочной ванны и температуры плазменной дуги с результатами компьютерного моделирования в среде ANSYS CFX / В.Я. Фролов, А.И. Торопчин, А.С. Ефимов // Неделя Науки СПбГПУ : материалы научно-практической конференции с международным участием. – Санкт-Петербург, 2014. – Часть I. – С. 252–255.

10. Toropchin, A. Calculation of the heat affected zone coupled with the arc simulation in TIG welding process considering the Marangoni effect/ A. Toropchin, V. Frolov, A.V. Pipa, D. Uhrlandt // Plasma Physics and Technology Journal. – 2015. – V. 2, №1. – P. 92–95.