

На правах рукописи

Васильев Евгений Олегович

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА СЖАТОЙ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2009 г.

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт – Петербургский государственный политехнический университет» (ГОУ «СПбГПУ»)

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент  
Фролов Владимир Яковлевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
Башенко Всеволод Владимирович;  
кандидат технических наук,  
Бурьяненко Владимир Дмитриевич

Ведущая организация: ООО «ВНИИЭСО».

Защита состоится "17" декабря 2009 г., в 16 часов на заседании диссертационного совета Д.212.229.20 в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт – Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: Санкт Петербург, ул. Политехническая 29, Гл. здание, аудитория 150.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ «СПбГПУ».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, СПбГПУ, отдел аспирантуры и докторантуры.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.212.229.20

к.т.н., доцент

Курмашев А.Д.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Широкое использование сжатой электрической дуги в технологических процессах металлообработки обусловлено высокой концентрацией теплового потока. Эта особенность горения сжатой дуги позволяет производить обработку металлов с максимальной скоростью, качеством и эффективностью при относительно небольших затратах. Обеспечение высокой эффективности электродуговой обработки металлов требует всесторонних исследований плазмы электрической дуги, позволяющие максимально учесть все многообразие физических процессов, протекающих в электродуговом разряде, и установить взаимосвязь между характеристиками рассматриваемого разряда и параметрами технологического объекта.

При таком применении свойств электрической дуги определяющую роль играют принципы управления тепловым и силовым воздействием на металл, определяемые механизмами передачи энергии от сжатой дуги в анодное пятно обрабатываемого изделия.

Различным аспектам решения задач исследования плазмы сжатой электрической дуги и разработки генерирующих ее плазмотронов посвящены работы Б.Е. Патона, Н.Н. Рыкалина, К.В. Васильева, В.С. Клубникина, Н.А. Соснина, В.Я. Фролова и др. В то же время значительный вклад в моделирование плазменных процессов внесли М.Ф. Жуков, С.В. Дресвин, О.П. Солоненко, Н.К. Ши, Д.В. Иванов и др. Однако, отсутствие в литературе детального анализа характеристик сжатой электрической дуги и способов управления тепловым потоком и скоростным напором плазмы затрудняет развитие отрасли при разработке технологических процессов, выборе плазмотронов и установлении режимов работы оборудования.

Сложность экспериментальных исследований плазмы сжатой электрической дуги связана с интенсивностью процессов тепло- и массообмена, высокой степенью концентрации энергии и значительными градиентами основных величин, в том числе и температуры, что существенно ограничивает применение существующих методов диагностики ввиду значительной погрешности при обработке экспериментальных результатов.

Учитывая вышесказанное, необходимо поэтапное изучение характеристик сжатой электрической дуги. Это позволит адекватно отразить процессы в сжатых дугах и учесть взаимосвязь параметров в системе «плазмотрон-заготовка» в широком диапазоне выполняемых технологических операций с определением искомых режимов работы оборудования.

**Цель и задачи работы.** Повышение качества работы плазмотронов прямого действия путем установления закономерностей воздействия теплового потока и скоростного напора сжатой электрической дуги на технологический объект.

Поставленная цель может быть достигнута посредством решения следующих основных задач:

1. Разработка методики и алгоритма расчета системы «плазмотрон-заготовка» с учетом взаимосвязи сжатой электрической дуги и технологического объекта.
2. Выявление закономерностей влияния параметров плазмотрона на характеристики сжатой электрической дуги.
3. Определение количественных характеристик механизмов передачи энергии в анодное пятно.
4. Разработка методики проведения экспериментальных исследований сжатой электрической дуги, имеющей высокие градиенты температуры и скорости потока плазмы.
5. Определение режимов работы плазмотронов, использующих сжатую дугу, в условиях сварки, резки и других способов обработки металлов по критериальной зависимости устойчивости расплавленного металла ванны с учетом скоростного напора потока плазмы.

**Методологическая основа исследований.** Методологической основой диссертационной работы явились фундаментальные положения теорий газодинамики, термодинамики и теплофизики для твердых, жидких и газообразных сред, а также общие представления связи теории с практикой, вытекающие из анализа процессов и достоверности получаемых результатов. Теоретические исследования плазмы сжатой электрической дуги базировались на численном решении уравнения баланса энергии, уравнений движения, уравнения неразрывности и уравнения электромаг-

нитной задачи методом контрольного объема, а исследования тепловых процессов на численном решении нестационарного уравнения теплопроводности тем же методом.

Достоверность результатов и выводов в работе обеспечивается обоснованным применением теоретических положений и определена путем сопоставления результатов расчета с результатами комплексных экспериментальных исследований. Результаты исследований обоснованы теоретически и подтверждаются практической реализацией электротехнологии.

**Научная новизна.** К основным научным результатам, полученным впервые и защищаемых автором, относятся:

1. Методика и алгоритм расчета системы «плазмотрон-заготовка», учитывающие взаимосвязи между сжатой электрической дугой и технологическим объектом.
2. Методика экспериментального определения температуры плазмы сжатой электрической дуги, имеющей значительные градиенты по сечению столба дуги, одновременно со скоростным напором плазмы на технологический объект.
3. Количественные характеристики передачи энергии в анодное пятно обрабатываемого изделия, описанные семейством тепловых потоков и скоростным напором, отражающие пространственные распределения параметров сжатой электрической дуги в широком диапазоне изменения конструктивных, технологических и внешних параметров системы.

**Практической значимостью работы** является повышение качества работы плазмотронов за счет изменения характеристик сжатой электрической дуги в зависимости от параметров технологической системы. Полученные результаты используются для расчета и разработки плазмотронов прямого действия в учебных материалах кафедры.

**На защиту выносятся следующие основные положения:**

1. Методика и алгоритм расчета системы «плазмотрон-заготовка», учитывающая взаимосвязи между формируемой плазмотроном сжатой электрической дугой и технологическим объектом и критериальную зависимость теплового состояния металла.

2. Результаты теоретических исследований параметров сжатой электрической дуги при различных режимах ее горения.

3. Методика определения количественных характеристик передачи энергии в анодное пятно обрабатываемого изделия с помощью семейства тепловых потоков и скоростного напора, отражающих пространственные распределения параметров сжатой электрической дуги в широком диапазоне изменения конструктивных, технологических и внешних параметров системы.

4. Температурные распределения в технологическом объекте, которые совместно с разработанным критерием позволяют судить о соответствии выбранного режима горения сжатой дуги стандартам металлургических процессов и, в конечном счете, установить режимы работы плазмотронов, генерирующих сжатую дугу, в зависимости от выполняемой технологической операции с целью повышения качества их работы.

5. Методика проведения экспериментальных исследований, позволяющая одновременно установить параметры, входящие в критериальную зависимость (скоростной напор набегающего потока плазмы на расплавленный металл ванны), и температуру столба сжатой электрической дуги.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах: всероссийских межвузовских научно-технических конференциях студентов и аспирантов (Россия, Санкт-Петербург – XXXIV неделя науки СПбГПУ, 2006; Россия, Санкт-Петербург – XXXV неделя науки СПбГПУ, 2007; Россия, Санкт-Петербург – XXXVI неделя науки СПбГПУ, 2008); третьей научно-технической конференции с международным участием (Россия, Новосибирск, 2007); восьмой Международной конференции «Пленки и покрытия – 2007» (Россия, Санкт-Петербург, 2007); девятой Международной конференции «Пленки и покрытия – 2009» (Россия, Санкт-Петербург, 2009).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 4 печатные работы.

**Структура и объем.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 39 наименований. Полный объем диссертации – 150 страниц, в том числе рисунков – 72, таблиц – 30.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, дается краткое состояние проблем изучения и исследований сжатой электрической дуги, сформулированы цели и задачи исследований, отражены научная новизна и практическая ценность.

**Первая глава** посвящена состоянию проблем изучения и исследований сжатой электрической дуги. Критический анализ литературных источников за последние три десятилетия не выявил однозначной взаимосвязи характеристик сжатой электрической дуги с параметрами плазматрона и способами ее формирования, имея при этом значительный разброс результатов исследований у различных авторов.

Также на фоне освещенности качественного уровня процессов, протекающих в прианодном слое электрической дуги, выявлено отсутствие количественных характеристик передачи энергии в анодное пятно обрабатываемого изделия.

Экспериментальные исследования плазмы сжатой электрической дуги являются важным и сложным объектом исследований и диагностики. Сложность проведения измерений параметров сжатой дуги в большей мере связана с интенсивностью процессов тепло- и массообмена и высокой степенью концентрации энергии. Процессы в сжатой электрической дуге характеризуются значительными градиентами основных величин, в том числе и температуры, что существенно ограничивает применение существующих методов экспериментальных исследований ввиду значительной погрешности при обработке экспериментальных результатов.

Существующие сведения о тепловых и силовых характеристиках сжатой электрической дуги, являющиеся основным инструментом воздействия на обрабатываемое изделие, не позволяют в полной мере использовать их при решении теоретических и технологических задач сварочного и других производств, так как взаимосвязь параметров дуги с тепловым потоком и скоростным напором устанавливает закономерности нагрева и формирования сварочной ванны или реза заготовки.

Таким образом, на основании критического анализа состояния исследований в области электротехнологий, использующих в качестве инструмента сжатую дугу, определен ряд задач, позволяющих повысить качество работы плазматронов прямого действия со сжатой электрической дугой.

Во второй главе разработана методика расчета системы «плазмотрон-заготовка», блок-схема которой представлена на рис. 1, учитывающая взаимосвязи между формируемой плазмотроном сжатой электрической дугой и технологическим объектом и критериальную зависимость теплового состояния металла анода и ее алгоритм.

Данная методика включает в себя модель сжатой электрической дуги, построенную с использованием основных уравнений баланса и электромагнитной задачи (1). Система линейных алгебраических уравнений (1) решалась одним из известных численных методов – методом контрольного объема – с использованием пакета MathCad. В результате математического моделирования получены пространственные распределения температуры (рис. 2), скорости, давления скоростного напора набегающего потока плазмы на анод и другие параметры плазмы электрического разряда для различных режимов его горения, которые позволяют установить взаимосвязь между характеристиками сжатой дуги и параметрами технологической системы.

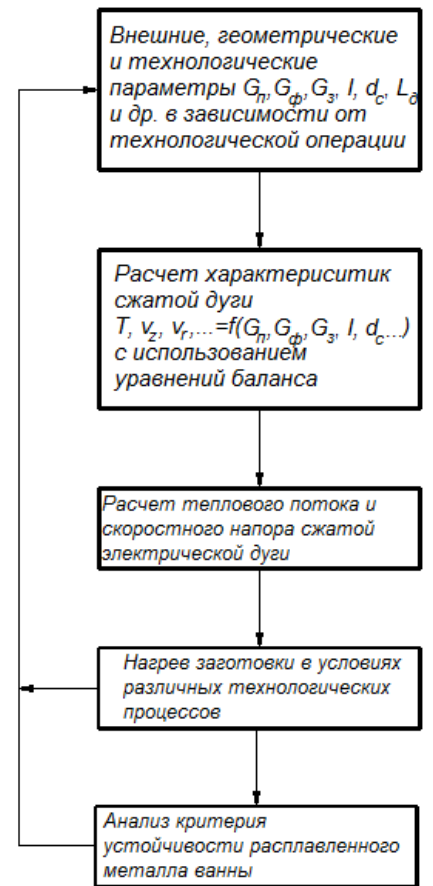
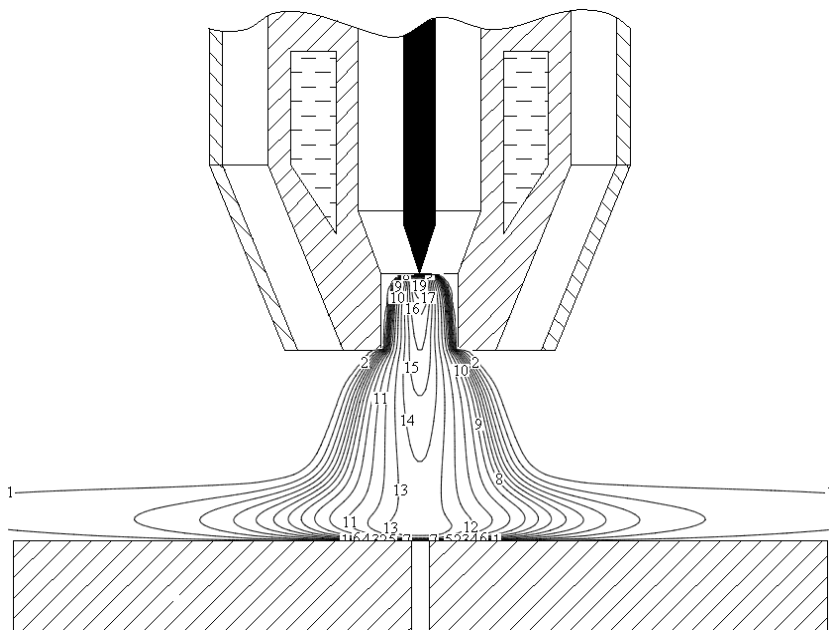


Рис. 1. Блок-схема расчета системы «плазмотрон-заготовка»

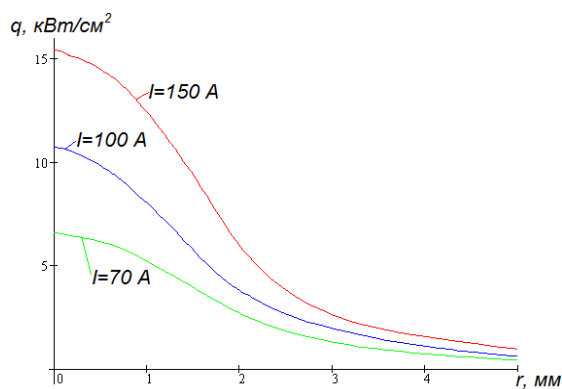
$$\left\{ \begin{array}{l}
 \rho C_p (V_z \frac{\partial T}{\partial z} + V_r \frac{\partial T}{\partial r}) = \sigma E^2 - U_{rad} + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda \frac{\partial T}{\partial r}) - \text{УБЭ} \\
 \left. \begin{array}{l}
 \text{div}(\rho \vec{V} V_z) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} V_z) + \mu_0 \left[ \vec{j} \times \vec{H} \right]_z + \rho g_z + F_{\mu z} \\
 \text{div}(\rho \vec{V} V_r) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \text{div}(\mu \text{grad} V_r) + \mu_0 \left[ \vec{j} \times \vec{H} \right]_r - \mu \frac{V_r}{r^2} + F_{\mu r}
 \end{array} \right\} - \text{УД} \\
 \frac{\partial}{\partial z} (\rho V_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho V_r) = 0 - \text{УН} \\
 \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\sigma r} \frac{\partial \chi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\sigma r} \frac{\partial \chi}{\partial z} \right) = 0 - \text{УЭ/МЗ}
 \end{array} \right. \quad (1)$$



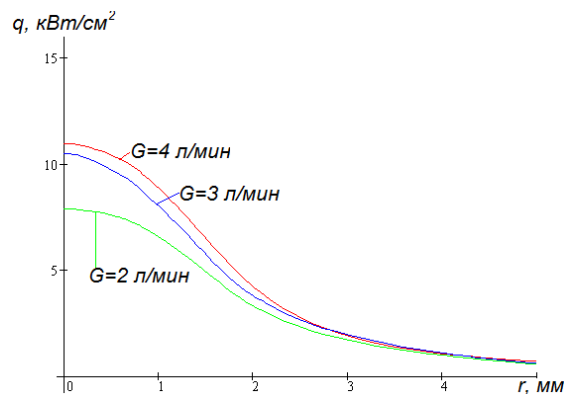
Разработана методика определения количественных характеристик передачи энергии в анодное пятно обрабатываемого изделия с помощью тепловых потоков (рис. 3, рис. 4) и скоростного напора плазмы сжатой электрической дуги, отражающих пространственные распределения параметров сжатой электрической дуги в широком диапазоне изменения входных параметров.



**Рис. 2.** Расчетное распределение температуры (тыс. К) сжатой дуги ( $I=100$  А;  $G_{пл}=3$  л/мин;  $d_c=4.2$  мм;  $L_d=15$  мм, плазмообразующий газ – аргон)



**Рис. 3.** Расчетные распределения плотности тепловых потоков в прианодной области ( $G_{пл}=3$  л/мин;  $d_c=4.2$  мм;  $L_d=15$  мм)



**Рис. 4.** Расчетные распределения плотности тепловых потоков в прианодной области ( $I=100$  А;  $d_c=4.2$  мм;  $L_d=15$  мм)

В условиях контрагированной привязки электродугового разряда к аноду связь между электрической дугой и обрабатываемым изделием может быть осуществлена тепловым потоком. Вид приведенных графиков (рис. 3, рис. 4) позволяет установить их отличие от кривой, соответствующей распределению Гаусса. Данное обстоятельство может быть пояснено при разбиении теплового потока на составляющие. В суммарный тепловой поток основной вклад вносят электронная, конвективная и теплопроводностная составляющие. Наиболее значимую роль в передаче энергии в

анодное пятно вносит электронная составляющая, определяемая следующим обра-

$$\text{зом: } q_e = j \left( \frac{5 kT}{2 e} + \frac{e\phi}{e} + U_{\text{л}} \right).$$

Как видно из ее определения, ее рост в большей мере связан с увеличением полного тока дуги, что отражено в таблице 1.

**Таблица 1. Составляющие теплового потока сжатой дуги ( $G_{\text{пл}}=3$  л/мин;  $d_c=4.2$  мм;  $L_\delta=15$  мм)**

	$P_e$ , Вт	$\frac{P_e}{P} 100$ , %	$P_v$ , Вт	$\frac{P_v}{P} 100$ , %
$I=70$ А	588	64.3	200	21.9
$I=100$ А	923	67.1	334	24.3
$I=150$ А	1422	69.1	531	25.8

Варьирование электронной составляющей теплового потока позволяет производить «грубое» управление проплавляющей способностью сжатой электрической дуги.

Однако изменение плотности и концентрации теплового потока может быть также осуществлено варьированием его конвективной составляющей (табл. 2), определяемой как:  $q_v = \rho v_z H$ .

**Таблица 2. Составляющие теплового потока сжатой дуги ( $I=100$  А;  $d_c=4.2$  мм;  $L_\delta=15$  мм)**

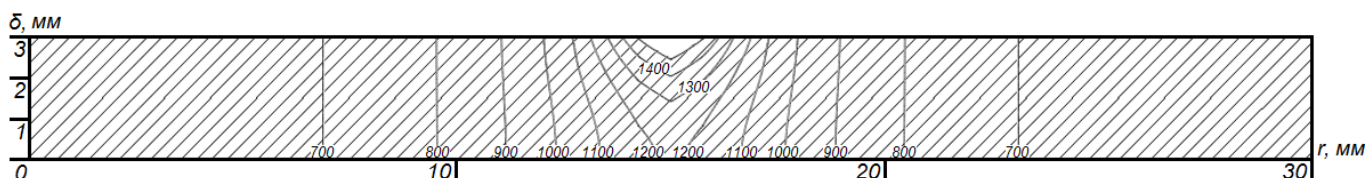
	$P_e$ , Вт	$\frac{P_e}{P} 100$ , %	$P_v$ , Вт	$\frac{P_v}{P} 100$ , %
$G_{\text{пл}}=2$ л/мин	916	72.5	258	20.4
$G_{\text{пл}}=3$ л/мин	923	67.1	334	24.3
$G_{\text{пл}}=4$ л/мин	928	64.6	418	28.3

Конвективная составляющая теплового потока в большей степени определяется аксиальной скоростью потока плазмы. Скорость же, наравне с механизмом магнитогазостатического ускорения, определяемого током, может быть изменена механизмом газостатического ускорения, определяемого расходом плазмообразующего газа при соответствующих размерах катодной камеры. Причем варьирование расхода не приводит к значительному изменению электронной составляющей.

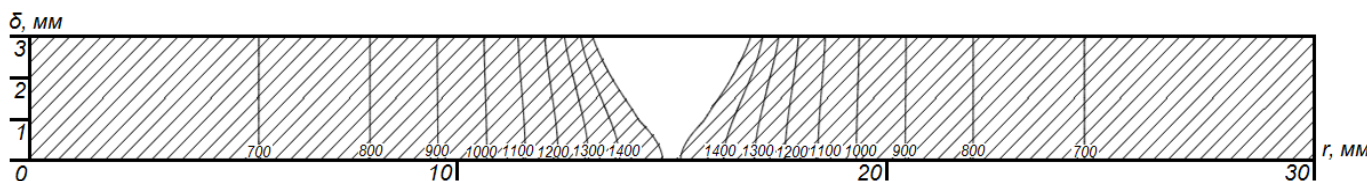
Варьирование конвективной составляющей теплового потока позволяет производить «мягкое» управление проплавляющей способностью сжатой электрической дуги.

Температурные распределения в обрабатываемом изделии определялись решением нестационарного уравнения теплопроводности, где тепловой поток использован в качестве одного из граничных условий.

Далее представлены расчетные распределения температур в металле анода при варьировании тока дуги (рис. 5 – рис. 7) и расхода плазмообразующего газа (рис. 6, рис. 8, рис. 9).



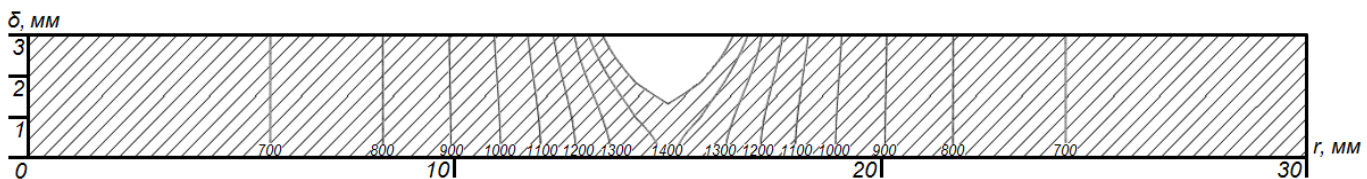
**Рис. 5. Расчетное распределение температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) в металле анода (X18H9T) под действием сжатой дуги ( $I=70\text{ А}$ ;  $G_{\text{пл}}=3\text{ л/мин}$ ;  $d_c=4.2\text{ мм}$ ;  $L_d=15\text{ мм}$ )**



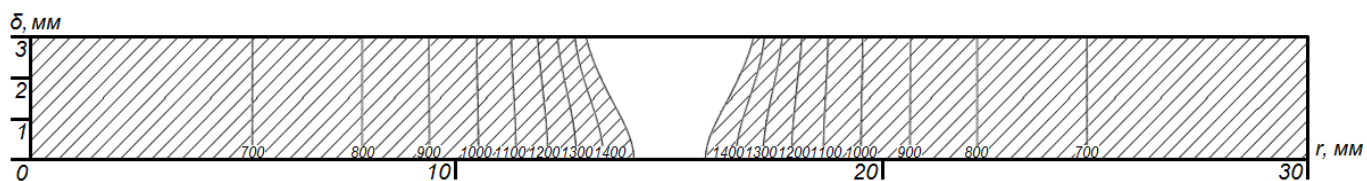
**Рис. 6. Расчетное распределение температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) в металле анода (X18H9T) под действием сжатой дуги ( $I=100\text{ А}$ ;  $G_{\text{пл}}=3\text{ л/мин}$ ;  $d_c=4.2\text{ мм}$ ;  $L_d=15\text{ мм}$ )**



**Рис. 7. Расчетное распределение температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) в металле анода (X18H9T) под действием сжатой дуги ( $I=150\text{ А}$ ;  $G_{\text{пл}}=3\text{ л/мин}$ ;  $d_c=4.2\text{ мм}$ ;  $L_d=15\text{ мм}$ )**



**Рис. 8. Расчетное распределение температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) в металле анода (X18H9T) под действием сжатой дуги ( $I=100\text{ А}$ ;  $G_{\text{пл}}=2\text{ л/мин}$ ;  $d_c=4.2\text{ мм}$ ;  $L_d=15\text{ мм}$ )**



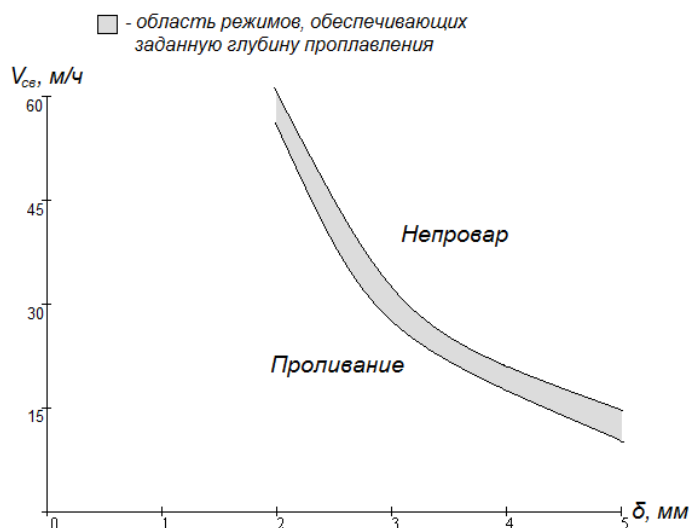
**Рис. 9. Расчетное распределение температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) в металле анода (X18H9T) под действием сжатой дуги ( $I=100\text{ А}$ ;  $G_{\text{пл}}=4\text{ л/мин}$ ;  $d_c=4.2\text{ мм}$ ;  $L_d=15\text{ мм}$ )**

Здесь оценено влияние электронной (рис. 5 – рис. 7) и конвективной (рис. 6, рис. 8, рис. 9) составляющих на размеры и форму ванны расплавленного металла.

Однако получив необходимое температурное поле в металле анода следует принимать во внимание давление сжатой дуги на расплавленный металл ванны, определяемое скоростным напором набегающего потока плазмы.

Скоростной напор непосредственным образом входит в критериальную зависимость устойчивости расплавленного металла ванны:  $\frac{\sigma_{пл}}{r} \geq \rho_{ме} g \delta + \langle p_{ск.н} \rangle$ .

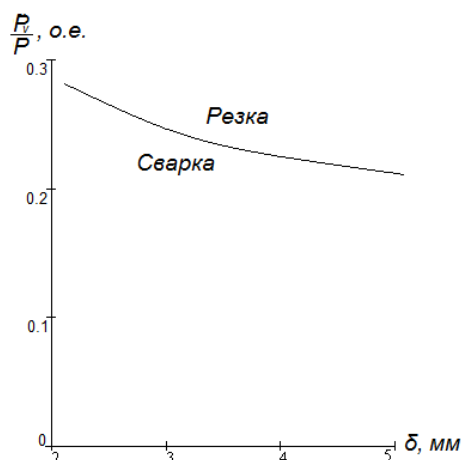
На основании температурных полей в металле анода определены области режимов, обеспечивающих заданную глубину проплавления (рис. 10).



**Рис. 10. Область режимов, обеспечивающая заданную глубину проплавления стали X18H9T ( $I=100$  А;  $d_c=4.2$  мм;  $L_d=15$  мм)**

Однако, даже находясь в искомой области, следует учитывать скоростной напор набегающего потока плазмы.

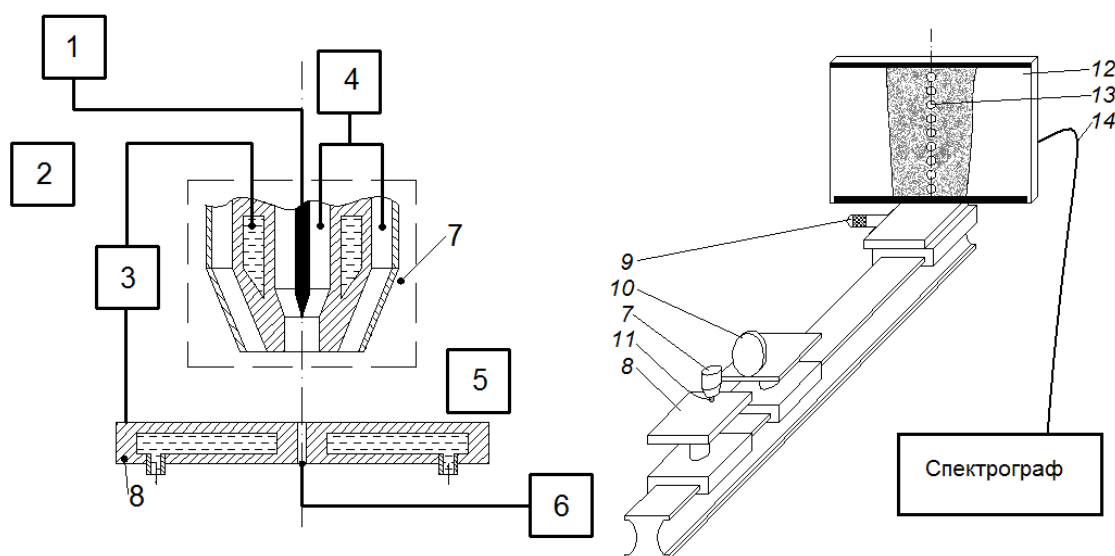
Так с увеличением толщины свариваемых встык заготовок методом плазменной сварки с проникающей дугой необходимо уменьшать давление скоростного напора набегающего потока плазмы, ибо нарушение критерия устойчивости приведет к проливанью расплавленного металла.



**Рис. 11. Граница перехода режимов «резка»-«сварка» стали X18H9T ( $I=100$  А;  $d_c=4.2$  мм;  $L_d=15$  мм)**

Уменьшение последнего может быть осуществлено снижением конвективной составляющей теплового потока по отношению к общему (рис. 11).

В **третьей главе** разработана методика проведения экспериментальных исследований, позволяющая одновременно установить параметры, входящие в критериальную зависимость (давление набегающего потока плазмы на расплавленный металл ванны) и температуру столба сжатой электрической дуги.



**Рис. 12. Принципиальная схема экспериментальной установки**

1 – источник сварочного тока (ВДУ-306); 2 – стенд с контрольно-измерительной аппаратурой; 3 – система охлаждения; 4 – система газоснабжения; 5 – устройство для проведения спектрального анализа плазмы электрической дуги и (или) фотоаппарат; 6 – устройство для определения скоростного напора дуги в анодном пятне; 7 – плазменная горелка; 8 – водоохлаждаемый анод; 9 – микрометрический винт; 10 – оптическая линза (объектив); 11 – сжатая электрическая дуга; 12 – экран; 13 – отверстия для размещения оптоволоконного кабеля; 14 – оптоволоконный кабель.

В соответствии с разработанной методикой проведения экспериментальных исследований повышена точность определения температуры столба дуги, определяемая значительными градиентами температурного поля в радиальном направлении (до 10 тысяч К на миллиметр) и относительно малыми размерами самой дуги (~5 мм), путем проецирования увеличенного в 36 раз изображения электродугового разряда на экран.

Таким образом, измерено пространственное распределение температуры сжатой электрической дуги, давление набегающего потока плазмы в области торможения на поверхности анода, а также мощность, поглощаемая анодом обрабатываемо-

го изделия. По измеренным значениям скоростного напора и температуры плазмы в прианодном слое найдено радиальное распределение аксиальной составляющей скорости плазмы в данной области.

Расхождение экспериментальных и расчетных результатов не превышает 12%, что позволяет судить о корректности постановки эксперимента, методики проведения экспериментальных исследований, а также об адекватности принятых расчетных методик, реализованных с использованием математических моделей, и, в целом, о достоверности результатов исследований характеристик сжатой электрической дуги.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Разработана методика расчета системы «плазмотрон-заготовка», учитывающая взаимосвязи между формируемой плазмотроном сжатой электрической дугой и технологическим объектом и критериальную зависимость теплового состояния металла.

2. В результате математического моделирования получены пространственные распределения температуры столба сжатой дуги, аксиальной и радиальной составляющих скорости плазмы, давления набегающего плазменного потока на анод и другие параметры плазмы электрического разряда, которые позволяют установить взаимосвязь между характеристиками сжатой дуги в широких диапазонах варьирования тока (70–150) А, расхода плазмообразующего газа (2–10) л/мин, диаметра сопла плазмообразующего газа (3.1–5) мм, длины дуги (9–15) мм и параметрами технологической системы, что позволило исследовать режимы горения дуги, имеющие место при сварке и резке металлов.

3. Разработана методика определения количественных характеристик передачи энергии в анодное пятно обрабатываемого изделия с помощью семейства тепловых потоков и скоростного напора, адекватно отражающих пространственные распределения параметров сжатой электрической дуги в широком диапазоне изменения конструктивных, технологических и внешних параметров системы.

4. На основании разработанной методики передачи энергии в анодное пятно получены температурные распределения в технологическом объекте, которые совместно с предложенным критерием  $\frac{\sigma_{пл}}{r} \geq \rho_{ме} g \delta + \langle p \rangle$  устойчивости расплавленного металла ванны позволяют установить искомые режимы работы плазмотронов, генерирующих сжатую электрическую дугу, в соответствии со стандартами металлургических процессов, для реализации технологической операции для конкретного изделия.

5. Разработанная методика проведения экспериментальных исследований позволяет одновременно установить параметры, входящие в критериальную зависимость (давление набегающего потока плазмы на расплавленный металл ванны), и температуру столба сжатой электрической дуги.

6. Повышена точность измерения температуры столба дуги, определяемая значительными градиентами температурного поля в радиальном направлении (до 10 тысяч К на миллиметр) и относительно малыми размерами самой дуги (~5 мм), путем проецирования увеличенного в 36 раз изображения электродугового разряда на экран, причем расхождение экспериментальных и расчетных результатов не превышает 12%.

7. Установлено, что в диапазоне изменений скоростного напора сжатой электрической дуги (30–600) Па и температуры плазмы (8000–12000) К в прианодном слое, радиальное распределение аксиальной скорости плазмы в той же области достигает своих максимальных значений на оси (60–230) м/с и по мере удаления от оси ниспадает до 0.

8. Повышено качество работы плазмотронов прямого действия путем установления закономерностей воздействия теплового потока и скоростного напора сжатой электрической дуги на технологический объект.

## Основные публикации по теме диссертации

*Публикации в центральных изданиях, включенных в перечень периодических изданий ВАК России*

1. Васильев, Е. О. Повышение эффективности работы установки для плазменной сварки металлов / В. Я. Фролов, Е. О. Васильев, И. Сосо // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – № 2(78). – С. 119–125.

*Публикации в других изданиях*

2. Васильев, Е. О. Моделирование параметров электрической дуги в условиях плазменной сварки металлов / В. Я. Фролов, Д. В. Иванов, М. В. Дубов, Е. О. Васильев // Электротехника, электромеханика и электротехнология / ЭЭЭ-2007: материалы третьей научно-технической конференции с международным участием. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2007. – С. 199–204.

3. Васильев, Е. О. Оценка влияния испарения металла анода на параметры электрической дуги при плазменной сварке металлов / Е. О. Васильев, В. Я. Фролов // Тезисы докладов Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «XXXVI Неделя науки СПбГПУ». – СПб: Изд-во СПбГПУ. – 2007. – С. 63.

4. Васильев, Е. О. Исследование параметров сжатой электрической дуги / В. Я. Фролов, Д. В. Иванов, С. Ю. Грачев, Е. О. Васильев, И. Сосо // Пленки и Покрытия-2009: труды 9-й Международной конференции. – СПб: Изд-во СПбГПУ. – 2009. – С. 288–297.

В работах, выполненных в соавторстве, вклад автора заключался в постановке проблемы, разработке методов и их решения, а также построении математических моделей (статьи 1, 2, 4), в разработке методики экспериментальных исследований (статьи 1, 4). В статьях 1, 2 вклад автора в объем изданий составляет 30% и 50% соответственно, в статьях 3, 4 вклад между авторами распределен равномерно.