

*На правах рукописи*

**МАТУШКИН Анатолий Владимирович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ГАЗОВИХРЕВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ  
ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЛАЗМОТРОНОВ ДЛЯ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ**

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена на кафедре «Технология сварочного производства» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Шалимов Михаил Петрович**

Официальные оппоненты: **Гузанов Борис Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Российский государственный  
профессионально-педагогический университет», г.  
Екатеринбург, заведующий кафедрой «Инжиниринг и  
профессиональное обучение в машиностроении и  
металлургии»;

**Ильиных Сергей Анатольевич**,  
кандидат технических наук,  
ФГБУН Институт металлургии Уральского отделения  
Российской академии наук, г. Екатеринбург, старший  
научный сотрудник лаборатории порошковых,  
композитных и нано-материалов

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический университет»,  
г. Пермь

Защита диссертации состоится «21» декабря 2017 г. в 15:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.10 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=271484>

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Раскатов Евгений Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В нашей стране разработано и используется большое количество различных конструкций плазмотронов для резки металлов, однако их технические характеристики значительно уступают зарубежным аналогам. Конструкции отечественных плазмотронов в основном, создаются без учета газодинамических процессов, происходящих в газоздушном тракте (ГВТ) плазмотрона (ПОГ), не используются также методы моделирования течения плазмообразующего газа ПОГ по ГВТ плазмотрона, позволяющие оптимизировать этот процесс.

Применение современных методов моделирования газодинамических процессов, связанных с течением потока ПОГ внутри плазмотрона, позволяет не только установить критерии оценки эффективности различных конструкций плазмотронов, но и по-новому осуществить их проектирование. Использование критериев оценки эффективности конструкции плазмотронов по газодинамическому признаку, основанных на применении современных методов моделирования газодинамических процессов, является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Основная часть рекомендаций по конструированию плазмотронов, которые отображены в работах отечественных исследователей не затрагивают газодинамические особенности плазмотрона. Поэтому влияние конструкции ГВТ на технологические характеристики плазмотронов по данным работам установить не удалось.

За последние годы за рубежом, были достигнуты существенные результаты в совершенствовании оборудования для плазменной резки. Основные достижения в данной области следует отнести к немецким (Kjelberg Finsterwalde Maschinen & Electroden GmbH) и американским (HyperTherm) производителям, которые разработали плазмотроны, позволяющие наряду с высокой производительностью получать вырезаемые детали с высоким качеством.

Особое место среди предлагаемых технологий зарубежных производителей занимает технология «узкоструйной» или «сжатой» плазмы, сопоставимой по своим параметрам с лазерной резкой. Технические характеристики отечественного электроплазменного оборудования в большинстве случаев уступают зарубежным аналогам из-за несовершенства конструкции плазмотронов.

В целях ликвидации теоретического и технологического отставания в проектировании плазмотронов в работе проведены газодинамические исследования, а результаты моделирования этих процессов, позволили определить влияние конструкции ГВТ плазмотрона на течение (ПОГ). Оптимизация газодинамических параметров течения ПОГ позволила модернизировать конструкцию ГВТ плазмотрона и по ряду технических характеристик приблизиться к зарубежным образцам.

**Цель работы.** Исследование, разработка и внедрение системы оценки эффективности газовыхревой стабилизации плазменной дуги на основе изучения закономерностей и особенностей газодинамических процессов в ГВТ для создания конструкции плазмотрона для прецизионной резки металла.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

1. Провести анализ систем газовихревой стабилизации металлорежущих плазмотронов, изучить газодинамические процессы в ГВТ, определяющие технологические параметры и технико-экономические показатели их работы. В качестве базовых конструкций приняты плазмотроны ПМВР-М и ВПР-401.

2. Разработать методику оценки и критерии эффективности системы газовихревой стабилизации плазменной дуги металлорежущих плазмотронов.

3. Выполнить модернизацию системы газовихревой стабилизации плазмотрона ПМВР-М для повышения эффективности плазменной резки металлов.

4. Провести исследования модернизированного плазмотрона для прецизионной резки металлов по технологическим критериям, а также по показателям качества поверхности реза металла.

5. Провести исследования возможности применения плазморезательного оборудования со стабилизированной дугой для резки низколегированных сталей в технологиях производства сварных конструкций без дополнительной механической обработки кромки реза.

#### **Научная новизна работы:**

- по результатам анализа газодинамических особенностей протекания ПОГ по ГВТ плазмотронов выявлены недостатки конструкции ГВТ, определяющие неравномерность распределения скоростей ПОГ по сечению ГВТ и, влияющие на производительность, качество и безопасность процесса резки металлов;

- разработана методика оценки эффективности системы газовихревой стабилизации плазменной дуги, которая учитывает величину равномерности распределения потока ПОГ по сечению каналов ГВТ по критерию  $K_i$ , определяющему отношение скоростей потока ПОГ в различных точках сечения каналов ГВТ;

- на основании расчетов, выполненных по предложенной методике, сформулированы принципы конструирования ГВТ плазмотронов, спроектирована новая газовихревая система с комплексом газодинамических фильтров (ГДФ) для выравнивания потока ПОГ, реализованная в плазмотроне ПМВР-2М;

- предложены принципиальные схемы модернизации систем газовихревой стабилизации и ГВТ плазмотронов для повышения эффективности плазменной резки металлов, основанные на использовании ГДФ для выравнивания потока ПОГ.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

- разработанная методика позволяет выявить конструктивные недостатки в ГВТ отечественных плазмотронов и повысить эффективность течения ПОГ при их проектировании;

- разработана конструкция плазмотрона, обеспечивающего удовлетворение требований российских и европейских нормативных документов к качеству кромок реза в сочетании с высокой производительностью процесса резки и его экономичностью;

- спроектирована, изготовлена и испытана модернизированная опытно-промышленная модель плазмотрона для прецизионной плазменной резки металлов средних толщин, не уступающая зарубежным аналогам по показателям эффективности, качеству и безопасности;

- показана возможность применения отечественных плазмотронов для подготовки заготовок под сварку без предварительного механического удаления слоя металла кромки реза.

**Методология и методы диссертационного исследования.** Для достижения поставленной цели было использовано сочетание теоретических, экспериментальных и вычислительных методов исследований.

Для проведения экспериментов была скомпонована установка, состоящая из водяного стола для раскроя металла с токоподводом, механизма перемещения плазмотрона «Микрон», источника питания Кельберг РВ S-45W, системы подготовки сжатого воздуха и плазмотронов ПМВР-М и ПМВР2М. Параметры режима резки фиксировали с помощью электро- и газоизмерительных приборов. Акустические параметры контролировались шумомером.

Теоретический расчет течения потока ПОГ по каналам ГВТ плазмотрона выполнялся в программной среде SolidWorks с использованием приложения CosmosFlowworks. Обработка и анализ экспериментальных данных проводилась с помощью методов математической статистики.

**Положения, выносимые на защиту:**

- методика оценки и критерии эффективности системы газовихревой стабилизации дугового разряда металлорежущих плазмотронов.

- схема модернизации системы газовихревой стабилизации и конструкции ГВТ на примере серийно выпускаемого плазмотрона ПМВР-М.

- экспериментальное обоснование возможности применения отечественного оборудования плазменной резки для подготовки заготовок под сварку без последующего механического удаления слоя металла кромки реза.

**Степень достоверности полученных результатов** подтверждается применением современных методов исследований и большим объемом экспериментального материала, обработанного с использованием методов математической статистики. Положения и выводы по работе не противоречат известным научным представлениям и результатам.

**Апробация работы:**

Основные результаты работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях «Сварка и диагностика» в рамках IX, X, XI, XIII, XIV, XV, XVI Международной специализированной выставки «Сварка. Контроль и диагностика» (Екатеринбург, 2009, 2010, 2011, 2013, 2014, 2015, 2016 г.г.). Результаты работы представлены в материалах Международной научно-технической конференции, посвященной 125-летию изобретения Н.Г. Славяновым электродуговой сварки плавящимся электродом (г. Пермь, 2013 г.); «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее» в рамках международной конференции (Киев: Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2013 г.

По результатам работы получен патент на изобретение RU 2584367 C1.

За помощь в работе выражаю благодарность Генеральному директору НПО «Полигон» в лице докт.техн.наук, профессору Пыкина Ю.А. и Анахову С.В., к.ф.-м.н., доценту, заведующему кафедрой физико-математических дисциплин РГПТУ Россия, Екатеринбург.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 9 работ в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, приложений А и Б. Работа изложена на 132 страницах, содержит 75 рисунков, 36 таблиц. Библиографический список содержит 98 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано краткое обоснование актуальности темы диссертации, определена его цель и задачи, сформулированы положения, определяющие научную новизну и практическую ценность диссертационной работы.

**В первой главе** проведен сравнительный анализ различных способов термической резки металлов, который показал, что для преобладающего диапазона толщин разрезаемых металлов (до 100 мм) плазменная технология является наиболее универсальным способом резки. Применение плазменной резки в промышленных условиях является как экономически, так и технологически целесообразным. Для повышения конкурентоспособности процесса на фоне ужесточения требований к качеству кромок разрезаемого металла необходимо дальнейшее развитие и усовершенствование плазменного оборудования. Основными показателями эффективности являются скорость резки, производительность и удельная себестоимость, а показатели качества реза определяются точностью и шириной реза, перпендикулярностью кромок и шероховатостью поверхности реза, а также величиной зоны термического воздействия и др.

Повысить эффективность отечественных плазматронов, разработанных в последней четверти XX века, возможно за счет внедрения новых конструкторских решений, основанных на современных методах и принципах проектирования. В целях повышения показателей эффективности и качества плазменной резки были проанализированы работы 70-90-х гг. (Быховского Д.Г., Жукова М.Ф., Васильева К.В., Донского А.В., Пыкина Ю.А. и др.), а также ряд разработок последних лет. Было установлено, что в работах недостаточно подробно описаны газодинамические процессы течения ПОГ по ГВТ плазматрона, а также недостаточно изучены процессы распределения потока ПОГ по сечению ГВТ плазматрона, как в вихревой, так и в электродуговой камерах. Данный параметр, по мнению автора, является критериальным при оценке эффективности проектируемых газовых систем. Для оценки эффективности принимаемых решений необходима универсальная методика определения параметров течения ПОГ по каналам плазматрона с целью выявления особенностей организации его течения, а также возможности сравнения различных конструкций плазматронов между собой и определения наилучших конструктивных решений на каждом участке течения потока ПОГ. Подобные решения должны послужить основой для проектирования новых конструкций плазматронов.

Для проверки эффективности работы плазматрона предложено также провести анализ параметров качества кромок реза металлов, полученных при использовании различных конструкций плазматронов. В качестве дополнительного фактора эффективности целесообразно рассмотреть возможность сварки пластин металла,

подготовленных плазмотронами, как с улучшенной системой вихревой стабилизации ПОГ, так и с базовой системой стабилизации без механической обработки кромок реза.

**Вторая глава** посвящена анализу газодинамических процессов, возникающих в ГВТ различных конструкций плазмотронов для резки металлов.

Газовые тракты отечественных и зарубежных плазмотронов имеют резкие расширения и сужения, что приводит к появлению мелкомасштабной турбулентности, гидравлическим потерям давления ПОГ, местным изменениям скорости и усиленным пульсациям потока ПОГ. Следствием этого является снижение эффективности стабилизации дуги, надежности зажигания дежурной дуги, производительности и качества работы плазмотрона, а также усиление эффекта акустического воздействия на окружающую среду.

Конструктивное изменение профиля проточной части ГВТ (изменение формы и размеров ГВТ) плазмотрона своей конечной целью ставит формирование газового потока в ГВТ, сопловом узле и на выходе из плазмотрона с «плавным» течением ПОГ, эффективным и равномерным обжатию плазменной дуги и её стабилизацией на выходе из сопла. В результате оптимизации параметров этого процесса достигаются необходимые электрические, теплофизические и газодинамические параметры дуги (струи), обеспечивающие снижение износа электрода и сопла, уменьшение электро- и газодинамических пульсаций в ГВТ и плазменной дуге.

Конструкция ГВТ базового плазмотрона представляет собой сложную газовихревую систему каналов, в которой условно можно выделить пять основных участков (рисунок 1, а): 1 - входная часть, 2 - зона выравнивания потока газа, 3 - завихритель, 4 - сопловый узел, 5 - область формирования плазменной струи. Конструкция каждого участка имеет свою форму и размеры, величина которых определяет величину площади проходного сечения каналов ГВТ (рисунок 1, б).

Движение и теплообмен текучей среды моделируется с помощью уравнений Навье—Стокса в программной среде SolidWorks. Кроме того, используются уравнения состояния компонентов текучей среды, а также эмпирические зависимости вязкости и теплопроводности компонентов этой среды от температуры. Расчетная система уравнений сохранения массы, импульса и энергии нестационарного пространственного течения имеет следующий вид в рамках подхода Эйлера в декартовой системе координат:

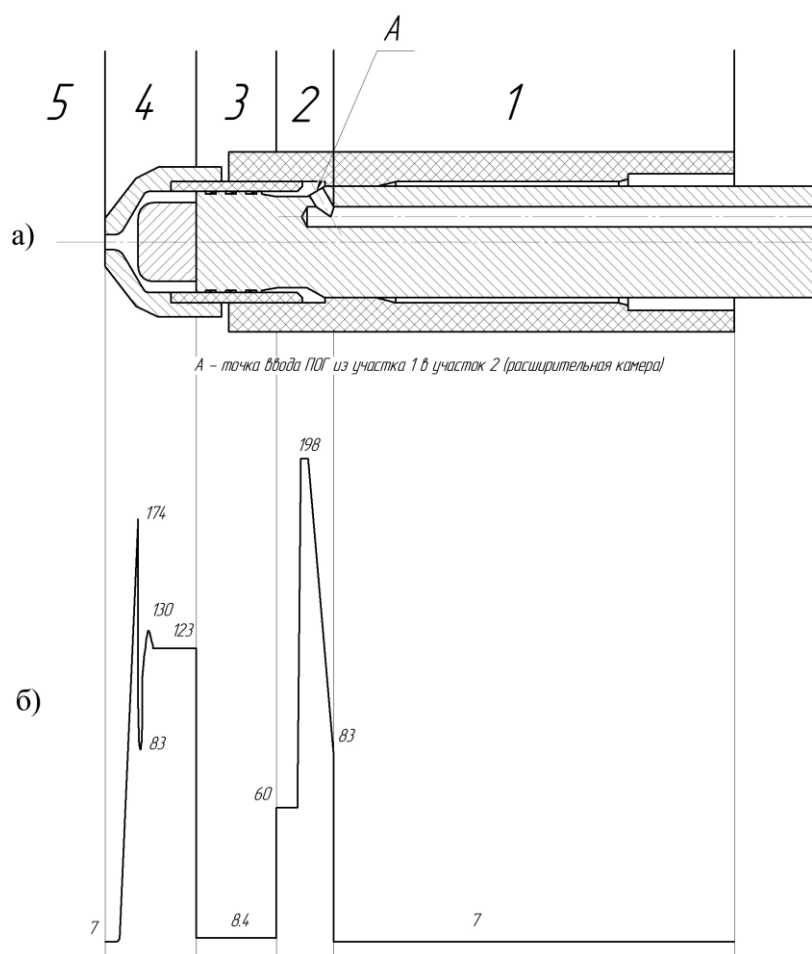
$$\frac{dp}{dt} + \frac{d}{dx_k} (pu_k) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d(pu_i)}{dt} + \frac{d}{dx_k} (pu_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{dP}{dx_i} = S_i, \quad (2)$$

$$\frac{d(pE)}{dt} + \frac{d}{dx_k} ((pE + P)u_k + q_k - \tau_{ik} u_i) = S_k u_k + Q_H, \quad (3)$$

где  $t$  - время, с;  $u$  - скорость текучей среды, м/с;  $p$  - плотность текучей среды, кг/м<sup>3</sup>;  $P$  - давление текучей среды, Па;  $S_i$  - внешние массовые силы, действующие на единичную массу текучей среды, Н/м<sup>3</sup>;  $E$  - полная энергия единичной массы текучей среды, Дж/кг;  $Q$  - мощность тепловыделения теплового источника в единичном объеме текучей среды, Вт/м<sup>3</sup>;  $\tau_{ik}$  - тензор вязких сдвиговых напряжений, Н/м<sup>2</sup>;  $q_i$  -

диффузионный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>, нижние индексы означают суммирование по трем координатным направлениям.



а – схема проточной части ГВТ базового плазматрона ПМВР-М;  
 б – график изменения площади проходного сечения ГВТ, мм<sup>2</sup>  
 Рисунок 1 – Участки течения ПОГ по каналам ГВТ плазматрона

Для ПОГ используется уравнение состояния следующего вида:

$$\rho = \rho(P, T, y), \quad (4)$$

где  $y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$  - вектор концентраций компонентов текучей среды.

Моделирование теплообмена между твердой поверхностью и текучей средой выполняется путем создания пограничного слоя потока текучей среды.

Так как течение ПОГ происходит внутри плазматрона, то граничные условия, определяющие связь физических процессов в расчетной области с физическими процессами вне ее, задаются параметрами текучей среды на входе и выходе расчетной модели:

1. на входе задается массовый расход ПОГ;
2. на выходе задается значение статического давления.

Для нахождения искомого численного решения задачи непрерывная нестационарная математическая модель физических процессов, используемая в COSMOSFloWorks, дискретизируется как по пространству, так и по времени.

Для оценки равномерности распределения скорости потока ПОГ по сечению каналов плазматрона была использована величина изменения скорости потока



относительно точки А (рисунок 1,а) - точки ввода газа в плазмотрон. Можно предположить, что при выходе потока газа из отверстия в точке А в кольцевой канал ГВТ плазмотрона (в случае отсутствия систем выравнивания потока газа по сечению канала) скорость потока ПОГ будет максимальной напротив отверстия и минимальной на противоположной стороне кольцевого сечения. Это связано с тем, что достижение потока ПОГ противоположной стороны кольцевого сечения и его выравнивание по сечению происходит только на определенном удалении от точки ввода газа, что подтверждают проведенные ниже расчеты.

Значение скорости потока ПОГ фиксировалось в 4-х точках V1, V2, V3, V4 (рисунок 2,а). Точка V1 расположена напротив точки ввода ПОГ- точка А. В качестве основного критерия оценки равномерности распределения скорости потока ПОГ по ГВТ плазмотрона принята величина  $K_i$ , которая определяется отношением значений скоростей в рассматриваемых точках.  $K_1=V1/V4$ ,  $K_2=V1/V2$ ,  $K_3=V1/V3$ , ( $K_i=1$  при абсолютно равномерном распределении).

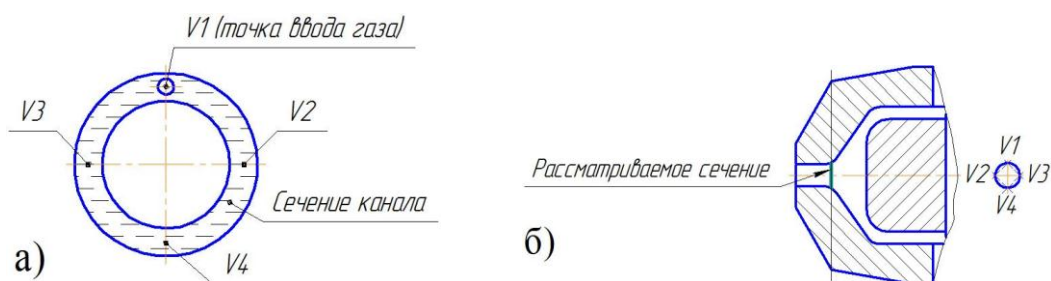


Рисунок 2 – Расположение точек расчета скорости потока ПОГ по сечению каналов ГВТ (а) и расположение контрольной плоскости (б)

Расположение контрольного сечения для расчета распределения скорости выбрано в плоскости, находящейся на входе в цилиндрическую часть сопла, рисунок 2,б, так как взаимодействие плазменной струи и сопла плазмотрона, начинается именно в этой плоскости. Неравномерность распределения потока ПОГ по сечению в данной плоскости будет приводить к износу сопла.

Расчет скоростей V1-V4 в контрольной плоскости выполнялся согласно схеме, представленной на рисунке 3.

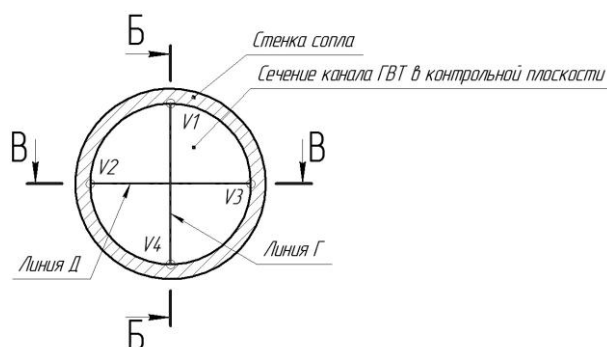


Рисунок 3 – Схема расчета скоростей потока ПОГ в контрольной плоскости.

Расположение точек расчета скоростей V1-V4 совпадает с расположением аналогичных точек на схеме рисунок 2,а.

Расчет скоростей выполнялся по двум контрольным линиям Г и Д, равным по длине диаметру сечения канала ГВТ в контрольной плоскости, составляющему 4,5 мм. При этом линия Г характеризует изменения скорости потока ПОГ между точками V1 и V4, а линия Д - изменения скорости между точками V2 и V3.

По полученным данным оценивалась неравномерность распределения скорости потока по сечению ГВТ плазмотрона путем нахождения отношений  $K_i = V1/V2 = V1/V3 = V1/V4$ . Данные отношения должны быть максимально одинаковыми и стремиться к 1. Расчеты выполнялись для всех рассматриваемых конструкций плазмотронов с целью определения влияния конструктивных изменений, на распределение скорости потока ПОГ.

В качестве исходных были использованы паспортные данные плазмотронов по массовому расходу газа, характерное значение которого составляет – 0,011 кг/с. На выходе из сопла плазмотрона использовались параметры окружающей среды с нормальным атмосферным давлением.

Расчетная модель плазмотрона представлена на рисунке 4 (расчетная сетка на рисунке условно не показана, так как ее наличие не позволит рассмотреть конструкцию расчетной модели).

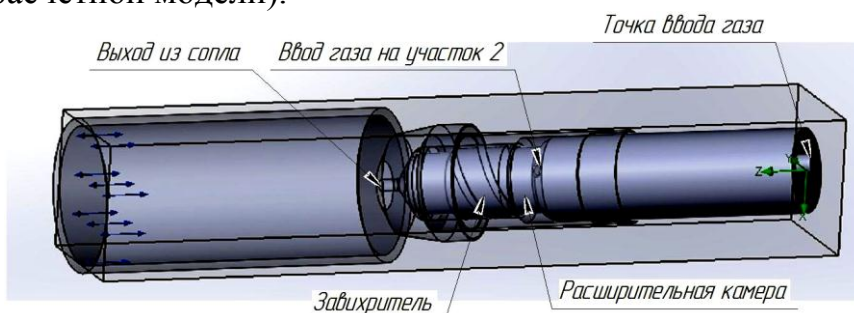


Рисунок 4 – Расчетная модель плазмотрона

Результаты расчетов скоростей в контрольной плоскости фиксировались в таблице 1.

Таблица 1 – Форма таблицы фиксации результатов расчета скорости потока ПОГ

Скорость	V1	V2	V3	V4
Значение, м/с				

Последовательность выполнения основных этапов расчетов осуществлялась по предложенной методике:

1. Создание трехмерной модели ГВТ исследуемого плазмотрона.
2. Создание на модели входного отверстия для подачи ПОГ в ГВТ плазмотрона и выходного объема для истечения потока ПОГ из плазмотрона.
3. Задание параметров текущей среды.
4. Задание граничных условий на входе в ГВТ плазмотрона и на его выходе.
5. Задание условий взаимодействия ПОГ со стенками каналов ГВТ.
6. Задание параметров расчетной сетки, обеспечивающей расчет параметров потока ПОГ в самых малых по сечению каналах ГВТ.
7. Задание параметров точности расчета.
8. Выполнение расчета течения потока ПОГ по ГВТ плазмотрона.
9. Выбор расположения сечения ГВТ для фиксации значений выбранных параметров потока ПОГ (в нашем случае – скорости потока ПОГ).

10. Выбор точек, траекторий, направлений и др. фиксации значений выбранных параметров потока ПОГ в выбранном сечении.

11. Вывод результатов расчета.

Дополнительно был проведен анализ газодинамических параметров ПОГ (потери динамического напора, средние по сечению осевые скорости газа и характера течения) при течении ПОГ по ГВТ с учетом инерционных и вязких потерь по исследуемым участкам 1-5 путем вычисления в программной среде MathCAD.

В таблице 2 приведены расчетные значения скоростей в контрольной плоскости для плазмотрона ПМВР-М.

Таблица 2 – Результаты расчета фиксируемых скоростей потока ПОГ в контрольной плоскости плазмотрона ПМВР-М

Скорость	V1	V2	V3	V4
Значение, м/с	70.7	56.5	63.3	53.3

Приведенные в таблице 2 значения скоростей V1-V4 в контрольной плоскости для базовой конструкции плазмотрона ПМВР-М показали, что различие величины скоростей потока V1 и V4 составляет 32 %. Таким образом, на участке 2 полноценного выравнивания потока по сечению ГВТ не происходит.

Величина скорости ПОГ на противоположной по сечению стороне от входного отверстия принимает минимальные значения V4, в то время, как по линии ввода газа V1 – она принимает максимальные значения. На рисунке 5 представлено распределение скорости потока ПОГ в контрольной плоскости плазмотрона ПМВР-М.

На рисунке 5 кривая между значениями V1 и V4 показывает изменение скорости потока ПОГ по линии Г, равной диаметру сопла в контрольном сечении (рисунок 2.6). Кривая между значениями V2 и V3 показывает изменение скорости потока ПОГ по линии Д (рисунок 3). Контрольные точки V1-V4 располагаются в контрольной плоскости вблизи поверхности сопла и находятся в месте взаимодействия потока ПОГ со стенкой сопла.

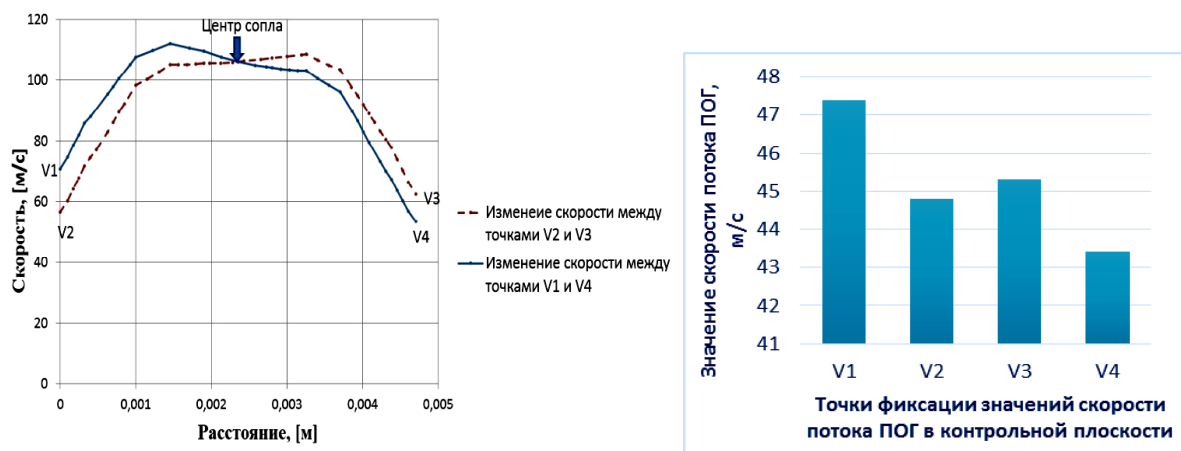


Рисунок 5 – Распределение скоростей в контрольной плоскости плазмотрона ПМВР-М

Представленные результаты расчета равномерности распределения скорости ПОГ по сечению ГВТ для базовых конструкций плазматронов (ПМВР-М и ВПР-402) показали несовершенство конструкции проточной части ГВТ, а также позволили сделать вывод о необходимости ее модернизации в целях создания оптимальной конструкции системы газовихревой стабилизации электродуговых плазматронов рассматриваемого типа. В качестве основного направления модернизации выбрано внесение конструктивных изменений на 2-м участке ГВТ плазматрона (рисунок 1), влияющих на эффективность выравнивания скорости потока газа по сечению ГВТ.

В данной главе выполнен анализ газодинамических особенностей ГВТ базовых плазматронов ПМВР-М и ВПР-402, который выявил конструктивные недостатки ГВТ данных моделей. Для создания модернизированной конструкции плазматрона разработана методика оценки качества распределения скорости потока ПОГ по каналам ГВТ плазматрона

**В третьей главе** рассматривается процесс конструктивного изменения системы газовихревой стабилизации и разработка оптимизированной конструкции плазматрона для резки металлов.

Для улучшения конструкции зоны выравнивания потока газа (участок 2 ГВТ) плазматрона в качестве возможных способов были рассмотрены:

- изменение объема расширительной камеры;
- установка стенки или стенки с отверстиями на пути течения потока газа.

Оптимизация конструкции предусматривала выполнение следующих работ:

1. Определение влияния размеров расширительной камеры на характер выравнивания скорости потока ПОГ по сечению ГВТ;

2. Определение влияния расположения и конструкции стенки на пути течения потока, на скорость потока ПОГ по сечению ГВТ;

3. Определение влияния стенки с отверстиями на пути течения потока ПОГ на скорость потока ПОГ по сечению ГВТ;

4. Разработка оптимизированной конструкции зоны выравнивания ПОГ;

5. Исследование характера выравнивания скорости потока ПОГ по каналам ГВТ оптимизированной конструкции плазматрона.

Для определения влияния конструкции зоны выравнивания потока ПОГ (расширительной камеры) на распределение скорости потока по сечению каналов плазматрона было исследовано 2 варианта камеры с шириной сечения 3 и 6 мм.

Расчетные данные представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 3 – Соотношения значений скоростей потока ПОГ по сечению каналов ГВТ скорости при ширине кольцевого канала расширительной камеры 3 и 6 мм

Расчетные параметры скорости	Расстояние от т. А, (3/6) мм			
	0	20	25	50
$V_1$ , м/с	478/66,6	174/12,4	172/27	120/42,5
$V_2=V_3$ , м/с	7/18,6	57/11	72/8,7	91/24
$V_4$ , м/с	13/2,5	58/10,5	65,5/13	88/1
$K_2=K_3=V_1/V_2=V_1/V_3$	<b>68,3/3,6</b>	<b>3.05/1,12</b>	<b>2,4/3,2</b>	<b>1,32/1,8</b>
$K_1=V_1/V_4$	<b>36,8/26,6</b>	<b>3.1/1,18</b>	<b>2,6/2,1</b>	<b>1,36/42,5</b>

Анализ полученных результатов показал (таблица 3), что при увеличении ширины сечения канала камеры до 6 мм поток ПОГ выравнивается быстрее, чем при ширине 3 мм, что выражается в появлении точек выравнивания скоростей потока V1 и V4. Наибольшая степень выравнивания потока по сечению наблюдается на расстоянии 20 мм от входа ПОГ. На этом расстоянии значения скоростей V2 и V3 ближе к значениям скоростей V1 и V4.

Дальнейшее увеличение ширины канала, возможно, приведет к более эффективным результатам, но подобные варианты нецелесообразны с точки зрения увеличения размеров и металлоемкости конструкции плазмотрона.

Результаты расчетов скорости потока при наличии стенки на пути течения ПОГ представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Значение скорости потока ПОГ в каналах ГВТ при наличии стенки на пути потока ПОГ

Расстояние от т. А до стенки, мм	Расстояние до точки схождения, мм	V1, м/с	V2, м/с	V3, м/с	V4, м/с	K1=V4/V1	K2=V1/V2	K3=V1/V3
1	14	44,5	24,8	24,8	44,5	1	1,794	1,794
2	16,7	36	26,5	26,5	36	1	1,358	1,358
<b>3</b>	<b>18,5</b>	<b>27</b>	<b>24,5</b>	<b>24,5</b>	<b>27</b>	<b>1</b>	<b>1,102</b>	<b>1,102</b>
4	18,5	27	23,5	23,5	27	1	1,149	1,149
<b>5</b>	<b>20,8</b>	<b>21,3</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>21,3</b>	<b>1</b>	<b>1,065</b>	<b>1,065</b>
6	21,2	27,4	23,8	23,8	27,4	1	1,151	1,151

По результатам выполненных расчетов было установлено, что выравнивание скоростей V1-V4 наблюдается на определенном расстоянии от т.А. Это расстояние изменяется в зависимости от расположения стенки, а оптимальным результатом можно считать расположение стенки на расстоянии 3 - 5 мм. При этих значениях достигается максимальное выравнивание скоростей V1-V4, однако с точки зрения оптимизации массы и размеров конструкции плазмотрона лучшим вариантом следует считать расположение стенки на расстоянии 3 мм от т. А. Максимальное выравнивание скорости в этом случае наблюдается на расстоянии 18.5 мм от точки ввода ПОГ.

В работе было рассмотрено влияние перфорации на выравнивание скорости потока ПОГ по сечению ГВТ. Количество перфорированных отверстий выбрано равным 6, что соответствует числу заходов (канавок) завихрителя.

В таблице 5 приведены результаты анализа степени равномерности распределения скорости потока ПОГ при наличии перфорации на его пути.

Таблица 5 – Значение скорости потока ПОГ в ГВТ при наличии перфорации на его пути

Расчетные параметры скорости	Расстояние от т. А, мм			
	0	5	25	50
V1, м/с	53,5	30,4	24	16,2
V2=V3, м/с	26,6	150	180,6	37,5
V4, м/с	30,6	24,6	29	1
K2=K3=V1/V2=V1/V3	<b>2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,13</b>	<b>0,42</b>
K1=V1/V4	<b>1,7</b>	<b>1,23</b>	<b>0,82</b>	<b>16,2</b>

По результатам расчетов установлено, что скорости потока ПОГ по сечению V1 и V4 на отдалении от перфорированной преграды в пределах 7 мм отличаются незначительно, после чего разница скоростей увеличивается.

В результате проведенных исследований установлено, что наличие стенки и перфорированной преграды на пути течения потока ПОГ обеспечивает высокий уровень выравнивания потока ПОГ, при этом завихритель должен располагаться от перфорированной преграды на расстоянии 5 – 8 мм.

Результаты исследований различных способов выравнивания скорости потока ПОГ по сечению ГВТ плазмотрона позволили оптимизировать систему газодинамической стабилизации. В модернизированной конструкции плазмотрона был использован газодинамический фильтр (ГДФ) (рисунок 6), установленный в расширительной камере и состоящий из следующих конструктивных элементов – вертикальная стенка с фаской на внешней стороне, размещенная на расстоянии 3 мм от т. А и перфорированная преграда с 6 равномерно расположенными отверстиями, размещенная на расстоянии 16 мм от т. А. Модернизированная конструкция плазмотрона получила маркировку ПМВР-2М.

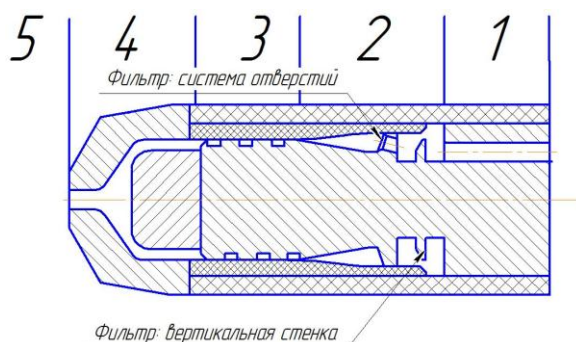


Рисунок 6 – Схема газового тракта модернизированного плазмотрона ПМВР-2М с системой выравнивающих фильтров.

На рисунке 7 представлено распределение скорости потока ПОГ в контрольной плоскости (рисунок 3) плазмотрона ПМВР-2М.

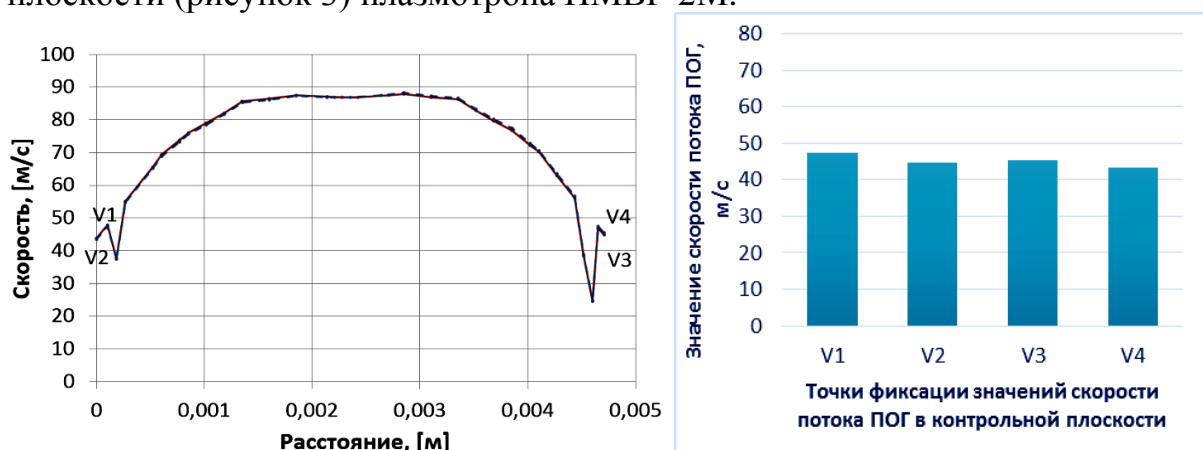


Рисунок 7 – Распределение скоростей в контрольной плоскости канала сопла плазмотрона ПМВР-2М.

Результаты расчетов скорости потока ПОГ для плазмотрона ПМВР-2М представлены в таблице 6. Представленные результаты демонстрируют малое отличие величины скорости потока V1-V4 в точках замера, не более 9 %.

Таблица 6 – Результаты расчета скорости потока ПОГ в контрольной плоскости плазмотрона ПМВР-2М

Скорость	V1	V2	V3	V4
Значение, м/с	47.4	44.8	45.3	43.4

В таблице 7 приведены сводные данные по отношению скоростей потока ПОГ в точках V1-V4 при рассмотрении конструкций плазмотронов ВПР-402, ПМВР-М и ПМВР-2М.

Таблица 7 – Сводная таблица скоростей потока ПОГ рассматриваемых конструкций плазмотронов

Плазмотрон	$K_2=V1/ V2$	$K_3=V1/ V3$	$K_4=V1/ V4$
ВПР-402	1.2	1.24	1.66
ПМВР-М	1.25	1.17	1.33
ПМВР-2М	1.06	1.05	1.09

Оптимизация газовихревой системы плазмотрона позволила обеспечить равномерность распределения потока ПОГ и увеличить его скорость в сопловой камере, что увеличило надежность фиксации катодного пятна и уровень стабилизации плазменной дуги. При этом наиболее высокие результаты достигнуты в модернизированном плазмотроне ПМВР-2М.

Оценка эффективности работы плазмотрона ПМВР-2М, сделанная с учетом приведенных значений потерь давления в потоке ПОГ, свидетельствует о повышении на 2-3 % его КПД и на 5-6 % его полезной тепловой мощности по сравнению с базовой моделью.

В данной главе показаны приемы оптимизации ГВТ плазмотронов. Представлена оптимизированная конструкция проточной части плазмотрона ПМВР-2М, обладающая более равномерным распределением скорости потока ПОГ по сечению ГВТ, высокой надежностью фиксации катодного пятна и стабилизации плазменной дуги.

**В четвертой главе** приведены результаты комплексных исследований, направленных на определение влияния конструкции ГВТ плазмотрона на эффективность плазменной резки по показателям качества реза и ее применимости при производстве сварных конструкций.

Для выполнения эксперимента использовали металлические пластины из горячекатаной листовой стали 09Г2С 300x500x10 мм, класса прочности 345 при значении временного сопротивления разрыву 490 МПа по ГОСТ 19281-2014. Сталь 09Г2С имеет широкое применение во многих отраслях промышленности, в частности при производстве сварных металлоконструкций различного назначения, в трубном производстве и т.д. Применение плазменной резки для подготовки заготовок под сварку в этих отраслях также имеет приоритетное значение. Для анализа поверхности реза были использованы требования ГОСТ 14792-80 и DIN EN ISO 9013:2017. При этом международный стандарт предусматривает анализ



поверхностей реза не только на вертикальных поверхностях реза, но и при выполнении резов под углом. Блок-схема испытаний представлена на рисунке 8.



Рисунок 8 – Блок-схема подготовки образцов для испытаний

Все образцы после резки и сварки подвергались исследованию по программе испытаний (рисунок 8).

Режимы плазменной резки плоских контрольных пластин металла при разных углах наклона плазматрона представлены в таблице 8.

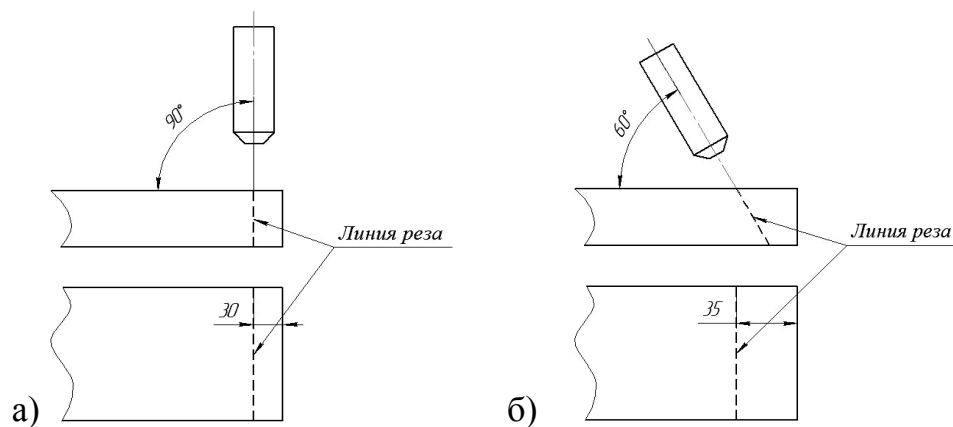
Таблица 8 – Режимы резки

Параметр	Плазматрон			
	ПМВР-М		ПМВР-2М	
	П	У	П	У
Ток дуги, А	110	105	88	80
Напряжение дуги, В	200	200	160	180
Скорость резки, м/мин	0,54	0,54	0,50	0,50
Диаметр сопла, мм	2	2	2	2
Расстояние до среза сопла L, мм	5	5	5	5
Давление плазмообразующего газа, МПа	0,45	0,45	0,5	0,5

П – перпендикулярный рез; У – рез под углом

Резка пластин выполнялась по схеме представленной на рисунке 9.





а – под углом 90 °, б – под углом 60°+5°

Рисунок 9 – Схема резки лабораторной пластины

Схемы образцов, полученных после резки, представлена на рисунке 10. Результаты измерений параметров кромок реза представлены в таблицах 9 и 10.

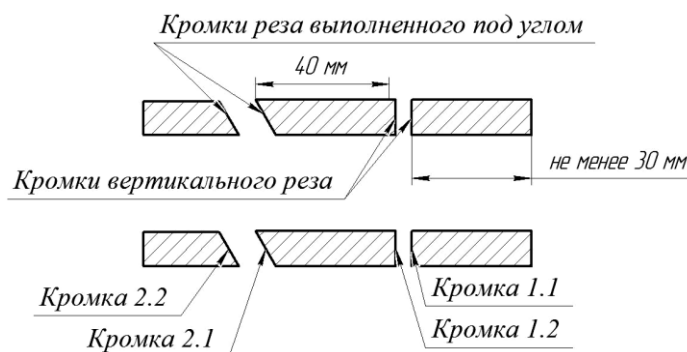


Рисунок 10 – Образцы для анализа поверхностей кромок реза

Таблица 9 – Качественные показатели поверхности вертикального реза

Параметр	ПМВР-М		ПМВР-2М	
	Кромка 1.1	Кромка 1.2	Кромка 1.1	Кромка 1.2
Отклонение от перпендикулярности, град (Δ, мм)	7° (1,1)	5° (0,8)	3° (0,5)	1° (0,17)
Радиус оплавления верхней кромки, мм	1,0	1,0	0,9	0,9
Шероховатость поверхности реза Rz, мм	0,06	0,07	0,10	-
Общая величина зоны термического влияния, мкм	0,8	0,8	0,8	0,7
Глубина зоны оплавления, мкм	5	10	5	5

В соответствии с методикой испытаний проведены исследования параметров кромок реза (перпендикулярность кромки реза, радиус закругления кромки реза, шероховатость кромки реза, величина ЗТВ) для плазмотронов ПМВР-М и ПМВР-2М на обеих кромках реза.

Таблица 10 – Качественные показатели поверхности косого реза

Параметр	ПМВР-М		ПМВР-2М	
	Кромка 2.1	Кромка 2.2	Кромка 2.1	Кромка 2.2
Отклонение углового размера кромки косого реза, $\Delta$ , мм	0,5	0,4	0,4	0,3
Радиус оплавления верхней кромки, мм	1,2	1,0	1,0	1,2
Шероховатость поверхности реза $R_z$ , мм	0,07	0,070	0,05	0,05
Общая величина зоны термического влияния, мм	0,7	0,7	0,8	0,5

Результаты измерений, представленные в таблицах 9 и 10, показали, что на вертикальном резе, выполненном плазматроном ПМВР-М наблюдается отклонение от перпендикулярности с величиной  $\Delta$  равной 0.8 – 1.1 мм, что соответствует второму классу качества по ГОСТ 14792-80 и третьему по DIN EN ISO 9013:2017. У образцов, полученных с применением плазматрона ПМВР-2М величина  $\Delta$  составляет 0.2 – 0.5 мм, что соответствует первому классу качества по ГОСТ 14792-80 и второму по DINENISO 9013-2003. Так для плазматрона ПМВР-М значения отклонения от перпендикулярности были от 5 до 7 °, а для плазматрона ПМВР-2М – от 1 до 3 °, рисунок 11.



Рисунок 11 – Величина отклонения от перпендикулярности кромок реза

Результаты измерений, представленные в таблице 10 показали, что при выполнении реза под углом (рисунок 9,б) плазматронами ПМВР-М и ПМВР-2М отклонение углового размера кромок реза соответствует второму классу качества по DIN EN ISO 9013:2017. При этом для плазматрона ПМВР-2М значения отклонения углового размера ближе к значениям первого класса точности по сравнению с образцами, полученными плазматроном ПМВР-М.

Для вертикального реза, выполненного плазматроном ПМВР-2М, наблюдается уменьшение отклонений от перпендикулярности, что связано с увеличением стабилизации плазменной дуги после выполнения конструктивных изменений ГВТ.

Величина радиуса закругления верхней кромки реза для всех случаев соответствует требованиям ГОСТ 14792-80 (не более 2 мм). Для плазматрона ПМВР-2М радиус верхней кромки на вертикальном резе меньше на 0.1 мм, чем у

плазмотрона ПМВР-М (0,9 мм против 1.0 мм). Это обусловлено уменьшением мощности при резке, с 21 кВт (ПМВР-М) до 14 кВт (ПМВР-2М).

Средняя величина глубины ЗТВ на образцах составляет от 0,7 до 0,9 мм, таблицы 9 и 10, что соответствует второму классу качества по ГОСТ 14792-80. При этом на ряде образцов, полученных плазмотроном ПМВР-2М глубина ЗТВ находится в пределах 0,5 – 0,55 мм.

Снижение мощности нагрева приводит к уменьшению величины деформации заготовок. На заготовках, выполненных плазмотроном ПМВР-М, деформация до 2 мм, а на заготовках, полученных с использованием плазмотрона ПМВР-2М, деформация не превышала 0.2 мм.

Проведенные замеры показали, что при использовании плазмотрона ПМВР-М шероховатость кромок реза находится в диапазоне от 0.061 до 0.072 мм, а для плазмотрона ПМВР-2М диапазон шероховатости составляет от 0.050 до 0.102 мм (таблицы 9 и 10). Представленные данные соответствуют 2-у классу качества (ГОСТ 14792-80). При этом минимальное значение 0,05 мм получено при использовании плазмотрона ПМВР-2М, что соответствует 1-у классу качества (ГОСТ 14792-80).

Величина твердости прилегающих зон к поверхности реза на заготовках полученных плазмотроном ПМВР-2М в большей части диапазона измерений ниже, чем у аналогичных образцов, полученных плазмотроном ПМВР-М. Это можно объяснить меньшей величиной тепловложения при выполнении резки, которая приводит к минимальным структурным и фазовым превращениям в ЗТВ.

Анализ данных по режимам резки показывает увеличение производительности при использовании плазмотрона ПМВР-2М в сравнении с ПМВР-М, при выполнении резки на одинаковых значениях тока, в среднем на 30 %, рисунок 12.

Анализ акустических параметров процесса резки показал, что наблюдается снижение уровня звукового потока при работе плазмотроном ПМВР-2М на 4-6 дБА.

Испытания механических свойств сварных соединений были выполнены для 3-х групп образцов, полученных с использованием:

1. плазмотрона ПМВР-М;
2. плазмотрона ПМВР-2М;
3. механической подготовки заготовок под сварку.

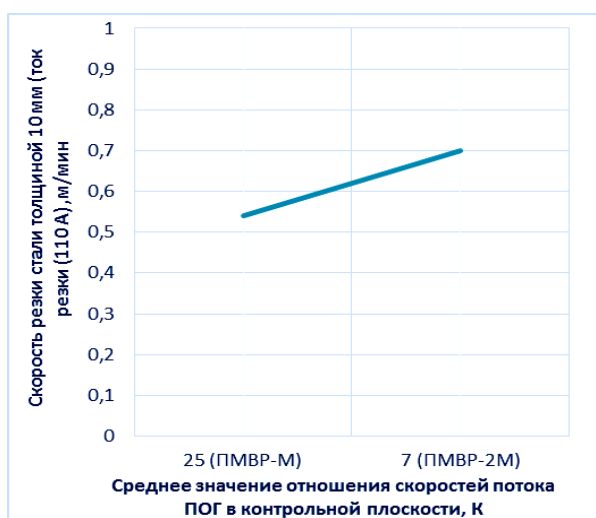


Рисунок 12 – Зависимость скорости резки стали от значения коэффициента равномерности распределения скорости потока ПОГ по сечению каналов ГВТ

В таблице 11 представлены результаты испытаний на статическое растяжение образцов, подготовленных разными способами.

Таблица 11 – Результаты испытаний механических свойств

Параметр	Способ подготовки заготовок под сварку			Основной металл
	ПМВР-М	Мех. обработка	ПМВР-2М	
$\sigma_T$ , МПа	307	416	442	<b>325</b>
$\sigma_B$ , МПа	457	546	562	<b>470</b>

Представленные данные показывают, что механические свойства сварных соединений не уступают свойствам листов стали 09Г2С за исключением образцов, выполненных с применением плазмотрона ПМВР-М.

Самое прочное сварное соединение наблюдается при использовании плазмотрона ПМВР-2М при подготовке кромок заготовок сварного соединения. При этом полученные при статическом растяжении результаты для образцов, полученных с применением плазмотрона ПМВР-2М при подготовке заготовок для сварки сопоставимы с образцами, полученными с применением механической резки.

Результаты испытаний плоских образцов со сварным швом на статический изгиб свидетельствует об отсутствии значимых различий в величинах определяемого угла загиба для различных серий образцов, значения которого превышают значения минимального угла загиба для исследуемой стали – не менее 80.

В таблице 12 представлены средние значения ударной вязкости KCV с погрешностью, определенной при доверительной вероятности  $p=0,95$ .

Таблица 12 – Результаты исследований образцов на ударную вязкость

Вид оборудования	Зона исследований	Ударная вязкость KCV $\pm \Delta KCV$ , Дж/см <sup>2</sup>	Доля вязкой составляющей, $\epsilon \pm \Delta \epsilon$ , %
ПМВР-М	СШ	150 $\pm$ 30	55 $\pm$ 15
	ЛС	180 $\pm$ 40	90 $\pm$ 40
Механическая обработка	СШ	160 $\pm$ 60	70 $\pm$ 25
	ЛС	240 $\pm$ 80	100-15
ПМВР-2М	СШ	132 $\pm$ 9	65 $\pm$ 15
	ЛС	121 $\pm$ 20	90 $\pm$ 5

\* СШ – сварной шов, ЛС – линия сплавления.

Результаты испытаний образцов на ударную вязкость по сварному шву и ЗТВ показали превышение значений  $KCV^{+20}$  по сравнению со значениями, характерными для основного металла (59÷64 Дж/см<sup>2</sup>), а также существенное превышение нижнего порога нормативных требований, предъявляемых к основному металлу.

Данные фрактографического анализа показали, что в области сварного шва, наблюдается хрупко-вязкий излом (доля вязкой составляющей  $\epsilon$  – 55÷70 %), а в области ЗТВ преобладает вязкое разрушение ( $\epsilon \geq 70$  %). Следует заметить, что сварные соединения, полученные после резки новым плазмотроном, имеют, в целом, более высокие значения доли вязкого излома ( $\epsilon$  – 60÷65 % в СШ), чем при резке базовым плазмотроном ПМВР-М ( $\epsilon$  – 55÷60 %), которые более близки по значениям к показателям, достигаемым после механической резки ( $\epsilon = 70$  %)

Результаты микроструктурного анализа представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты микроструктурного анализа зон сварных соединений

Образец	Участок	Размер зерна	Структура		
		Балл	Балл	п/ф	Тип перлита
1.ПМВР-М	основа	10	2	35/65	сорбитообразный
	ЗТВ	14	2	75/25	сорбитообразный
	СШ	4	1	15/85	сорбитообразный
2.Механическая обработка	основа	10	2	35/65	сорбитообразный
	ЗТВ	14	1	85/15	точечный
	СШ	5	1	5/95	точечный
3.ПМВР-2М	основа	10	2	35/65	сорбитообразный
	ЗТВ	14	1	85/15	точечный
	СШ	4	1	15/85	точечный

Анализ микроструктуры в материале СШ показывает, что формируется характерная для литых сталей структура с равноосными зёрнами в центре размерами от 20 до 35 мкм и вытянутыми вдоль направления теплоотвода на периферии. Установлено, что в нижней части сварного шва размеры зёрен принимают минимальные значения, а в верхней – максимальные.

Структура ЗТВ на всех исследованных образцах отличается от стали-основы. Непосредственно к СШ примыкают зоны крупнокристаллической структуры с размером зёрен до 60 мкм. Структура материала этих зон – сорбитообразный перлит (п/ф - 85/15) для образца № 1 и точечный перлит с диаметром зёрен цементита до 0,25 мкм для образцов № 2 и 3. Протяженность зон перегрева с крупным зёрном в ЗТВ составляет не более 0,2 мм.

По мере удаления от границы между СШ и ЗТВ зёрно измельчается, становится меньше, чем в стали-основе (см. таблицу 4.13). В образце № 1 материал ЗТВ имеет феррито-перлитную структуру с соотношением п/ф = 75/15 и скрытопластинчатым перлитом с межпластинчатым расстоянием 0,3 мкм, размер зёрна составляет 2,7 мкм. В образцах № 2 и 3 феррито-перлитная структура (п/ф = 85/15) с зернистым перлитом, диаметр зёрен перлита менее 0,25 мкм. Данные структурные изменения можно обосновать выполнением многопроходной сварки образцов, когда при сварке каждого последующего слоя выполнялась термообработка предыдущего слоя. Увеличение доли перлита в структуре ЗТВ по сравнению с основой связано с фазовыми превращениями в процессе термического цикла сварки.

Результаты измерений твердости в различных зонах сварных соединений представлены в таблице 14. Их анализ свидетельствует о соответствии всех исследованных образцов требованиям СТО Газпром 2-2.4-715-2013 ( $HV_{10} \leq 255$  для металла шва и  $HV_{10} \leq 300$  для ЗТВ). При этом наиболее качественные (по показателям отличия от средних значений и твердости основного металла) швы достигнуты при сварке образцов, полученных резкой новым плазмотроном ПМВР-2М. Качество данных швов по показателям твердости не уступает показателям, достигаемым после механической резки, и характеризуется отсутствием микродефектов в виде пор, наблюдаемых на границе шва и ЗТВ у образца № 1.

Таблица 14 – Результаты замера твердости сварных швов

Способ подготовки заготовок под сварку	Твердость ЗТВ сварного соединения, HV10 (верх/низ)	Твердость металла шва сварного соединения, HV10 (верх/низ)
ПМВР-М	128/140	167/141
Механическая резка	171/170	171/157
ПМВР-2М	173/172	187/177

В данной главе показано, что более высокие прочностные показатели при сварке образцов получены при использовании нового плазмотрона ПМВР-2М для подготовки заготовок под сварку. Исследования показали, что механические свойства сварных соединений, изготовленных из заготовок, подготовленных разными способами (термический и механический) незначительно отличаются. При использовании плазмотрона с оптимизированной конструкцией ГВТ (ПМВР-2М) для изготовления заготовок под сварку достигаются высокие прочностные показатели при сваренных образцов. Это свидетельствует об эффективности применения плазменных методов разделки проката без последующего механического удаления ЗТВ при производстве сварных конструкций.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам выполнения диссертационной работы можно сформулировать следующие выводы, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

1. На основании проведенных исследований выявлена зависимость характера течения ПОГ от конструктивного исполнения ГВТ плазмотрона. Предложенные в работе конструктивные изменения ГВТ обеспечили выравнивание потока ПОГ, способствовали улучшению основных технологических показателей плазмотронов. Так после модернизации производительность возросла в среднем на 30%.

2. Разработана методика оценки эффективности системы газовихревой стабилизации плазменной дуги. В качестве критерия эффективности проектирования газовихревой системы предложено использовать параметр  $K_i = V_i/V_j$ , определяющий равномерность распределения скорости течения ПОГ по сечению каналов ГВТ.

3. Сформулированы рекомендации для повышения эффективности системы газовихревой стабилизации металлорежущих плазмотронов, связанные с применением системы газодинамических фильтров на участке входа в завихритель ГВТ. Применение дополнительных фильтров на пути потока ПОГ привело к увеличению выравнивания скорости потока ПОГ на 20-25 %.

4. Разработана модель плазмотрона ПМВР-2М с усовершенствованной системой газовихревой стабилизации плазменной дуги. Анализ эффективности системы ГВТ плазмотрона ПМВР-2М показал снижение газодинамических потерь потока ПОГ в сравнении с базовой конструкцией плазмотрона более 2 %. Несмотря на небольшое уменьшение потерь давления ПОГ в каналах ГВТ технологические возможности плазмотрона ПМВР-2М значительно возросли.

5. Испытания плазмотрона ПМВР-2М показали улучшение качественных и технологических показателей при резке металла по сравнению с базовой конструкцией плазмотрона: повышение производительности процесса резки на 25-

30%, уменьшение отклонения от перпендикулярности кромки реза до первого класса качества по ГОСТ 14792-80.

6. Доказана возможность исключения операции механической обработки кромок заготовок, полученных после резки новым плазмотроном, в технологии производства сварных соединений.

7. При использовании плазмотрона ПМВР-2М достигается снижение уровня звука на 4-6 дБА в рабочей зоне оператора, что фактически означает увеличение допустимого времени работы плазморезчика на 2-3 часа в смену.

**Перспективы дальнейшей разработки темы** заключаются в следующем:

- применение разработанной методики при конструировании плазмотронов;
- разработка и совершенствование конструкций плазмотронов с более эффективной системой газовихревой стабилизации дугового разряда;
- проведение работ по оптимизации технологических процессов, использующих плазменную резку;
- комплексное обоснование применимости современных металлорежущих плазмотронов в технологии производства сварных соединений без дополнительной механической обработки поверхности реза.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:**

1. Матушкин А.В. Газодинамические особенности проектирования плазмотронов // С. В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, С.А. Шакуров / Сварочное производство. - 2011. - № 12. - С. 8-14. (0,41 п.л./0,1 п.л.).

2. Матушкин А.В. Плазменные электротехнологии: диагностика по критериям акустической безопасности / А.В. Матушкин, Ю.А. Пыкин, С.В. Анахов, И.Ю. Матушкина // Сварка и диагностика. - 2012. - № 1. - С. 40-45 (0,29 п.л./0,07 п.л.).

3. Матушкин А.В. Принципы безопасного проектирования газоздушных трактов плазмотронов // С. В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, С.А. Шакуров / Сварочное производство. – 2012. –№3 –С.39-43 (0,28 п.л./0,07 п.л.).

4. Matushkin A.V. Special features of design of the profile of gas–air circuits of low-noise plasma torches / S. V. Anakhov, A. V. Matushkin, Yu. A. Pykin // Welding International. - 2012. - Vol. 26. - Iss. 10. - P. 819-822 (0,23 п.л./0,08 п.л.).

5. Матушкин А.В. Новый плазмотрон для резки металла под сварку: сравнительный анализ / А.В. Матушкин, Ю.А. Пыкин, С.В. Анахов // Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия «Металлургия». Том 15. – 2015. - № 1. - С. 65-70 (0,29 п.л./0,1 п.л.).

6. Матушкин А.В. Исследование систем газовихревой стабилизации плазмотронов / С. В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин // Сварочное производство. – 2015. –№4 –С.20-24 (0,23 п.л./0,04 п.л.).

7. Матушкин А.В. Газовихревая система стабилизации в плазмотронах: новые решения / С. В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин // Сварочное производство. – 2015. –№5 –С.49-53 (0,23 п.л./0,04 п.л.).

8. Матушкин А.В. Анализ прочности и пластичности сварных соединений, полученных с применением металлорежущих плазменных технологий / А.В.

Матушкин, Ю.А. Пыкин, С.В. Анахов, Д.А. Голотвин // Сварка и диагностика. – 2016. - № 1. - С. 56-60 (0,23 п.л./0,06 п.л.).

9. Matushkin A.V. Gas vortex stabilization in plasma torches: new solutions/ S.V. Anakhov, Yu.A. Pykin, A.V. Matushkin // Welding International. - 2016. - Volume 30. - Issue 5. - p. 408-412 (0,23 п.л./0,08 п.л.).

**Другие публикации:**

10. Матушкин А.В. Анализ эффекта модернизации газоздушного тракта плазматронов для плазменной резки / М.П. Шалимов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин // Научные труды молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ: сборник статей. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. - 2006. - С. 146-150. (0,23 п.л./0,08 п.л.).

11. Матушкин А.В. Исследование поверхности реза при термической разделительной резке стали 09Г2С / С. В. Анахов, К. Сингер, Ю. А. Пыкин, С. А. Шакуров, А. В. Матушкин // Технология машиностроения. - 2007. - № 8. - С. 10-14. (0,23 п.л./0,04 п.л.).

12. Матушкин А.В. Об экономической эффективности применения узкоструйной плазменной технологии в разделке трубного проката / Анахов С. В., Пыкин Ю. А., Шакуров С. А., Елькин В. А., Русаков И. В. // «Найновите постижения на европейската наука – 2012»: материалы VIII междунар. конф. 17-25 июня 2012. - София, 2012. – Т. 19. Технологии. - С. 80-83 (0,18 п.л./0,04 п.л.).

13. Матушкин А.В. Влияние способа подготовки кромок металла на качество сварного шва / М.П. Шалимов, Ю.А. Пыкин, С.В. Анахов, А.В. Матушкин// «Сварка, диагностика и контроль». Сборник тезисов докладов. МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО». — Екатеринбург: УрФУ, 2015. — С. 195-199 (0,23 п.л./0,06 п.л.).

14. Матушкин А.В. О качестве сварных швов, полученных после плазменной резки / С. В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин // Технология и материалы. – 2016. – №1 – С.23-27 (0,23 п.л./0,08 п.л.).

15. Матушкин А.В. Микроструктурный анализ сварных соединений, полученных с применением плазменных технологий резки / С.В. Анахов, Н.Б. Пугачева, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, Быкова Т.М. // Физика и химия обработки материалов, 2016. – №2. – С. 17-22. (0,35 п.л./0,07 п.л.).

16. Матушкин А.В. Механические и технологические свойства сварных соединений, полученных с применением плазменной резки / С.В. Анахов, С.В. Гладковский, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, С.В. Лепихин, Д.А. Двойников // Сварочное производство, 2016. - №6. – С.8-13 (0,29 п.л./0,05 п.л.).

17. Matushkin A.V. Narrow Jet Plasma as the Energy Efficient and Safe Technology for Metal Cutting / S. V. Anakhov, A. V. Matushkin, Yu. A. Pykin // Solid State Phenomena (Material Science Forum). – 2016, – Volume 870, – p. 523-527 (0,23 п.л./0,08 п.л.).

18. Матушкин А.В. Эксплуатационные свойства сварных соединений, полученных с применением плазменной резки // М.П. Шалимов, Ю.А. Пыкин, С.В. Анахов, А.В. Матушкин / «Сварка, диагностика и контроль». – Сборник тезисов докладов. - МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО»: 2016. – С. 127-132 (0,29 п.л./0,07 п.л.).