

## ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук Потехина Бориса Алексеевича  
на диссертацию Анахова Сергея Вадимовича

«Развитие научных принципов и методов проектирования плазмотронов для повышения эффективности и безопасности электроплазменных технологий», представленную на соискание ученой степени

доктора технических наук по специальности  
05.02.10 - Сварка, родственные процессы и технологии

Выполненная работа посвящена обоснованию, формированию и совершенствованию (развитию) принципов проектирования плазмотронов, предназначенных для резки металлов, их тепловой обработки, что должно обеспечивать в современных плазмотронах эффективное сочетание функциональных характеристик (производительность, надежность, качество) при минимизации таких неблагоприятных факторов, проявляющихся при работе плазмотронов, как электромагнитное и световое излучение, газовое выделение и шумовое воздействие на окружающую среду и рабочий персонал.

Выполненная работа изложена в 5 главах на 291 странице, иллюстрирована 156 рисунками и 52 таблицами, включает введение, выводы, заключение, приложения, список цитированной литературы, включающий 167 наименований, из которых 12% (19 наименований) на иностранном языке.

**Первая глава** посвящена обзору современных представлений об областях целесообразного применения плазменного оборудования для разделительной резки металлов и сплавов в разных отраслях промышленности. Плазменные технологии в некоторых аспектах имеют некоторые преимущества в сравнении с другими способами (газовая, механическая резка, см. стр.21-22), так как ни твердость обрабатываемых материалов, ни температура их плавления, не являются препятствиями для плазменной обработки. С другой стороны, плазмотроны выглядят относительно простыми и компактными изделиями (см. стр.26, рис.1.2) в сравнении, например, с металлорежущим оборудованием, однако их проектирование и конструирование требует глубоких экспериментальных исследований десятков различных параметров (см. рис.1.16, стр.49), а также моделирования целой группы физических процессов: газодинамических, магнитных, электрических, диффузионных и др. (см. рис.1.13, стр.72).

В данной главе показана важная роль перехода от концептуальных представлений к аналитическим моделям. Как правило, в этом случае используются системы дифференциальных уравнений, описывающих газодинамические, теплофизические процессы, уточненные соответствующими экспериментальными исследованиями.

В разделе 1.4 главы рассмотрены критерии оценки качества обработанных поверхностей, которые являются, по существу, и критериями проектирования как конструкций плазмотронов, так и соответствующих технологий.

В разделе 1.5 внимание уделено проблемам безопасности применения плазмотронов, выявлены основные вредные факторы, которые обусловлены высокой плотностью энергии в плазменной дуге. Подробно рассмотрен процесс шумовыделения, защита от которого регламентирована нормативными

документами, российскими и международными стандартами, а средства защиты – наушники и беруши, в одной стороны, и рекомендации по автоматизации процессов плазменной обработки. Из данного обзора следует, что шумобезопасность «не принимается в расчет при проектировании плазмотронов».

Выполненный обширный и достаточно глубокий литературный анализ позволил сформулировать цель работы, включающую, в частности, «развитие принципов и методов проектирования электродуговых плазмотронов». Далее сформулированы задачи (их 7), одна из которых – «Анализ возможности производства конструкций без дополнительной обработки кромки реза» – в реальности заслуживает особого внимания.

В целом, работа направлена на решение актуальных проблем плазменной обработки путем совершенствования проектирования и конструирования плазмотронов. Принимая во внимание тот факт, что в российской промышленности сегодня используется, в основном, импортное оборудование, данная работа может и должна внести существенный вклад в *импортозамещение*, что делает её без сомнения, *актуальной*.

**Во второй главе** показано решение одной из поставленных задач, связанной с разработкой принципов и методов проектирования металлорежущих плазмотронов по газодинамическим и теплофизическим критериям. Представлены результаты газодинамического анализа базовых конструкций газовоздушных тактов (ГВТ) известных плазмотронов для резки ПМВР-М, ВПР-410, ПЗ-400ВА (рис.2.2, 2.6 и 2.22, табл.2.6), позволившие сделать вывод о конструктивных недостатках большинства отечественных дуговых плазмотронов и сформулировать принципы и методы конструкторской деятельности, способствующие повышению эффективности плазморезательного оборудования. Разработанные принципы и методы имеют различную степень значимости и универсальности применения, однако разработанные на их основе плазмотроны типа ПМВР-2М и -3М демонстрируют справедливость сделанных теоретических выводов и практических предложений. Особого внимания заслуживают разработки плазмотронов серии ПМВР-5, работающих по технологии «узкоструйной» или «сжатой» плазмы, поскольку внедрение подобных плазмотронов, как показывает последующий анализ, решает большое количество проблем с эффективностью и безопасностью применения электроплазменных технологий а также отмеченную выше проблему импортозамещения.

Ряд результатов, полученных во второй главе, имеют особую научную и техническую новизну – критерии и методика проектирования по газодинамическим параметрам, влияние плазменно-дугового нагрева на эффективность газовыхревой стабилизации газа, запатентованные решения по изменению конструкций газовоздушного тракта плазмотронов.

**В третьей главе** рассмотрена проблема проектирования плазмотронов с учетом факторов производственной безопасности. Отмечена многофакторность проблемы безопасности плазменных технологий. Для отдельного исследования выбраны факторы акустического и оптического излучения, для анализа которых разработан и применен широкий ряд различных экспериментальных методик. В частности, для выявления источников излучения определены спектральные параметры звукового поля, звуковое давление в разных

частотных диапазонах, уровень звука и звуковой мощности (стр.133) на современных плазмотронах ПМВР-М, РПВ-401 (отечественных) и на плазмотронах РВ S-45W (производства Германии) (стр.139).

В ходе экспериментов выявлены и классифицированы источники излучения, получены данные, свидетельствующие об особенностях шумовой и оптической генерации плазмотронов. Установлено, что общий уровень шума в большой степени определяется конструкцией плазмотрона (рис.21, описание стр.145) и может превышать 100 дБ. Изучены также технические факторы излучения плазмотронов, важнейшими из которых является температура и давление плазмообразующего газа, который является турбулентным потоком с интенсивной пульсацией давления (см. рис.3.19, 3.23).

На базе данных результатов дано теоретическое объяснение различных механизмов акустического и оптического излучения, учитывающее конструктивные и технологические параметры металлорежущих плазменных технологий. Можно заключить, что конструктивные и технологические параметры влияют на акустическое излучение взаимоисключаяще, что делает задачу его уменьшения достаточно сложной.

Выводы по данной главе содержательны (стр.185-186) по существу и носят, в основном, характер рекомендаций для дальнейшего проектирования.

**В четвертой главе** показано одно из решений проблемы безопасности плазменных технологий путем совершенствования конструкций плазмотронов с учетом факторов акустической и оптической безопасности. На основе сделанных в третьей главе выводов разработаны принципы и методы проектирования плазменного оборудования, направленные на снижение различных видов шума и оптического излучения. Это реализовано на базе исследования газодинамических параметров ряда плазмотронов (рис.4.1, 4.2), изучения спектра их звуковой мощности. Основной акцент сделан на профилирование ГВТ плазмотронов в целях снижения вклада тональных составляющих спектра акустического излучения в общий уровень шума. В качестве практических решений предлагаются различные конструкции сопловых узлов, спроектированных с учетом критериев акустической безопасности. Проектирование плазмотронов осуществлялось по профилю сопла (рис.4.11) и конструкции катодов (рис.4.12) различных форм (рис.4.16-4.18). Для плазмотрона ПМВР-М выполнялась исследование профиля завихрителя по газодинамическим и акустическим критериям. Для снижения аэродинамического струйного излучения предложено использовать двухпоточную технологию узкоструйной плазменной резки, позволяющую также снизить уровень опасного воздействия и ряда других негативных факторов.

Выводы по данной главе (стр.212-213) также носят характер рекомендаций с отсылкой к конкретным решениям, изложенным в материале данного раздела диссертации.

**В пятой главе** представлены теоретические и экспериментальные оценки результатов, достигнутых в ходе проектирования и изготовления модернизированных плазмотронов типа ПМВР-2М, ПМВР-3М, ПМВР-5.2. Показаны теоретически обоснованные преимущества новых плазмотронов по газодинамическим критериям, экспериментально определенные преимущества по производительности, энергопотреблению и качеству реза. Представлены

также результаты, демонстрирующие снижение акустического воздействия при использовании новых плазмотронов. Исследования проведены на базе большого числа плазмотронов с применением широкого спектра методов экспериментального анализа. Можно отдельно отметить разработанный для интегрального сравнительного анализа метод квалиметрической оценки результатов проектирования, применение которого подтверждает выполнение поставленных в начале работы исследовательских и технологических задач. Среди поставленных ранее задач следует выделить и демонстрацию возможности применения так называемой «чистой» плазменной резки металлов под сварку. Очевидно, что полноценное обоснование подобной технологии требует гораздо более масштабных исследований, однако, представленные результаты достаточно аргументированно позволяют дать подобное обоснование для конструкционных низколегированных сталей средних толщин.

Кроме этого, в данном разделе показано влияние новых конструкций плазмотронов и технологии резки на свойства обрабатываемых металлов (раздел 5.1.3) – шероховатость поверхности плазменного реза (табл.5.8), микротвердость, особенности структуры в зависимости от тепловых взаимодействий, величину зоны термического влияния, ударную вязкость и фрактографию изломов,  $\sigma_{02}$ ,  $\sigma_B$ ,  $\delta_5$ , %. Из представленных результатов следует, что эти показатели, в целом, выше при использовании модернизированных в данной работе плазмотронов.

*Научная новизна и теоретическая значимость исследования несомненны.* Выполненная работа направлена на преодоление в отставании качества отечественных плазмотронов, так как импортные превосходят отечественные по основным технико-экономическим параметрам. Следует также учесть, что есть и другие способы металлообработки (лазерные, электронно-лучевые, гидроабразивные), которые создают конкуренцию плазменным технологиям. В связи с этим цель работы, состоящая в совершенствовании методов и принципов проектирования *своевременна и актуальна.*

Ряд разделов работы выполнялось при поддержке грантов, заданий Министерства образования и науки РФ и др. (всего 9), из которых в 6 заданиях диссертант являлся или является руководителем. В связи с вышеизложенным выполненную работу следует оценить как самостоятельное полноценное исследование.

Экспериментальные и теоретические исследования выполнены тщательно и скрупулёзно на современном исследовательском оборудовании и полученные результаты являются *достоверными и надёжными.*

На заключительном этапе работы проведены промышленные испытания партии плазмотронов ПМВР-2М производства ООО НПО «Полигон» (г. Екатеринбург), которые показали в 2 раза более высокую производительность чем у лучшего отечественного плазмотрона ПВР-401 (Ростов-на Дону) (Акт испытаний, стр. 284, 285). Кроме того, запатентована новая конструкция плазмотрона (Патент РФ 2584367 С1). С учетом этих результатов, *практическая значимость*, направленная на *импортозамещение* плазмотронов, также *не вызывает сомнения.*

По работе можно сделать замечания и поставить вопросы.

1. Построение работы не стандартно, а именно, задачи и цель изложены во введении, а не после литературного обзора, из которого они вытекают. Нет отдельного раздела «Методы исследования».

2. Приложения В, Г (стр. 282, 283) включают титульные листы, а содержательная часть отсутствует. Как познакомиться с этими документами?

3. В работе отмечено, что лишь часть шумоизлучения формируется в плазмотроне и обусловлена давлением и пульсацией плазмообразующего газа, параметрами конструкции плазмотронов (25-30%). Почему другим источникам (70-75%) излучения не уделено внимание?

4. Выводы по некоторым главам диссертации и заключения зачастую носят характер рекомендаций и не всегда содержат конкретную информацию, которую оппонент может извлекать из соответствующих разделов, а формулировать по своему усмотрению.

5. Можно ли построить на базе выполненного исследования модель проектирования плазмотронов? Если нет, то чего для этого не хватает?

Несмотря на указанные замечания и суждения, которые во многом носят дискуссионный характер, рассматриваемая работа является **законченным научным исследованием**, получены весьма **значимые научные результаты**, как в **теоретическом**, так и в **прикладном аспектах**. Работа хорошо оформлена, автореферат отражает содержание диссертации.

Рассматриваемая работа **соответствует паспорту** специальности 05.02.10 – «Сварка, родственные процессы и технологии», соответствует всем требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013, а ее автор Анахов Сергей Вадимович в полной мере **заслуживает** присуждения ученой степени доктора технических наук.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры «Технологии металлов»  
ФГАОУ ВО «Уральского государственного  
лесотехнического университета»,  
доктор технических наук, профессор



Потехин Борис Алексеевич

20 мая 2019 г.

Федеральное государственное бюджетное  
высшее профессиональное образование  
Уральский государственный лесотехнический  
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37,  
тел.: 8 (343) 262-96-58, e-mail: pba-nn@yandex.ru;

Федеральное государственное бюджетное  
высшее профессиональное образование  
Уральский государственный лесотехнический  
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37,  
тел.: 8 (343) 262-96-58, e-mail: pba-nn@yandex.ru;

