

АСПЕКТЫ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

SAFETY ASPECTS OF ELECTROPLASMA TECHNOLOGIES

Аннотация. Рассмотрен комплекс факторов, относящихся к сфере безопасного применения электроплазменных технологий. Представлены результаты исследования плазматронов по ряду факторов безопасности – акустическому, видимому и ультрафиолетовому излучению. Показано, что профилирование газовоздушных трактов плазматронов может снизить уровень их негативного воздействия на рабочий персонал.

Abstract. The complex of factors related to the safe application of electroplasma technologies is considered. The results of the plasma torches study on a number of safety factors – acoustic, visible and ultraviolet radiation are presented. It is shown that profiling of gas-air paths of plasma torches can reduce the level of their negative impact on working personnel.

Ключевые слова: плазматрон, газовоздушный тракт, шум, излучение, акустика, профилирование, безопасность.

Keywords: plasmatron, gas-air path, noise, radiation, acoustics, profiling

В широком ряду электроплазменных технологий (ЭПТ) [1] наибольшее применение имеют системы плазменной резки, внедрение которых зачастую сдерживается необходимостью соблюдения норм по достаточно обширному числу факторов безопасности. Для понимания роли каждого из факторов безопасности необходимо проведение комплекса исследований конструктивных и технологических параметров процесса, определяющих степень негативного воздействия на рабочий персонал. Как известно, процесс плазменной резки характеризуется целым комплексом негативных факторов, определяющих степень безопасности технологии – большие токи и напряжения (в источнике питания и плазменной дуге), высокая интенсивность оптического и акустического излучения в различных диапазонах электромагнитного воздействия, выделение газов, металлических аэрозолей, пыли, брызг металла, опасность механического воздействия, психофизиологическая нагрузка и т.д. В результате работа оператора плазменной резки при отсутствии современных средств защиты и автоматизации процесса становится весьма опасной и напряженной [2].

Поскольку основным элементом любой ЭПТ является плазмотрон, улучшение технологии по критериям безопасности должно начинаться с исследования его конструктивных особенностей и параметров работы, с последующей разработкой принципов и методов проектной деятельности, направленной на создание более безопасных конструкций при сохранении высокой эффективности технологии (по функциональным характеристикам – производительности, качества и надежности, а также показателям энергоэффективности). Очевидно, что при этом зачастую возникает мультипараметрическая взаимно противоречивая задача, требующая нахождения оптимальных решений.

В процессе исследований [3] производились измерения спектральных и энергетических характеристик звукового поля (уровня звукового давления (УЗД) L_m [дБ]; уровня звука (УЗ) L_A [дБА], уровня звуковой мощности (УЗМ) L_p [дБ]) в нормируемом 1/1-октавном диапазоне слышимых частот 63-8000 Гц, а также в 1/3 октавных полосах в пределах 1,6 Гц-40 кГц в соответствии с ГОСТ 12.1.003-83, ГОСТ 12.4.077-79 и СанПиН 2.2.4/2.1.8.583-96. В качестве основного измерительного прибора в исследованиях использовался цифровой анализатор шума и вибрации «АССИСТЕНТ-SIU» 1 класса точности. Определение акустических характеристик плазмотронов было выполнено в соответствии с ГОСТ 12.1.028-80 по шести- или пятиточечной схеме, в зависимости от условий эксперимента (на «холодной» или «горячей» струе) при резке стали 09Г2С толщиной 10 мм в технологически сопоставимых режимах. В качестве объекта изучения были выбраны отечественные дуговые плазмотроны типа ПМВР-М, ВПР-410, ПЗ-400ВА, РПВ-401 и ПВР-402У4. Для сравнения был взят плазмотрон РВ S-45W производства Kjellberg (Германия). Несмотря на конструктивное сходство, каждая из моделей плазмотронов имеет свои специфические особенности (длины отдельных участков газоздушного тракта (ГВТ), диаметры и площади проходных сечений, профили сопловых узлов, конструкции завихрителя и т.д.), которые влияют на характер течения плазмообразующего газа (ПОГ), а, следовательно, и уровень аэродинамического шума. Помимо конструктивных особенностей было исследовано влияние температуры, давления, расхода, состава применяемого ПОГ, подводимой электрической мощности, силы тока и напряжения дуги, её полярности, рода тока.

Учет механизмов генерации высокочастотного шума при до- и сверхкритическом характере её истечения и особенностей газодинамического протекания ПОГ по ГВТ плазмотрона позволил среди других факторов, влияющих на шумоизлучение, выделить скорость, форму и длину струи (основная мощность генерируется на начальном участке струи длиной до 5 калибров), которые, в свою очередь зависят от большинства

вышеперечисленных факторов. По результатам исследований были предложены и проанализированы несколько моделей генерации шума. Например, появление дискретных тонов в спектре шума можно объяснить с помощью теоретической модели, связанной с механизмом резонансного самовозбуждения турбулентных пульсаций потока ПОГ на собственных частотах газоздушного тракта плазмотрона с последующей передачей энергии звуковых колебаний и их излучением из сопла плазмотрона. Анализ модели показал, что в зависимости от геометрии ГВТ в спектре излучения возможно появление 1-го или 2-х резонансных пиков или их отсутствие. Предложенная модель позволяет определить частоты появления тональных составляющих в спектре шума и звуковую мощность, генерируемую плазмотроном в нормируемом диапазоне слышимых частот [4].

На основе анализа результатов, полученных в результате газодинамических и акустических исследований, были сформулированы основные принципы проектирования по критериям акустической безопасности:

1. Устранение условий для резонансного возбуждения тональных составляющих акустического спектра шумоизлучения плазмотрона за счет профилирования ГВТ.

2. Уменьшение уровня аэродинамического шума за счет снижения градиента средних и интенсивности турбулентных пульсаций скорости при смешении газо-плазменного потока с окружающей средой (принцип «двойного сопла»), а также за счет формирования условий докритического истечения плазменной струи ($V < C_{зв}$).

Были предложены методы акустического («безопасного») проектирования плазмотронов для резки и сварки, позволяющие избежать резких перепадов площади проходного сечения ГВТ, и, следовательно, снизить вероятность появления тональных шумов в акустическом спектре плазмотрона:

1. Оптимизация геометрии завихрителя, обеспечивающего минимальный размер акустического ядра плазменной струи.

2. Технологически возможное уменьшение диаметра сопла плазмотрона и скорости истечения струи до значений, определенных на основе критериев эффективности газовой вихревой стабилизации плазменной дуги.

3. Профилирование ГВТ плазмотрона в целях снижения степени турбулентности потока ПОГ, а также оптимизация геометрии соплового узла в целях предотвращения генерации тональных составляющих шума.

4. Использование двухконтурной технологии «узкоструйной плазмы», обеспечивающей минимизацию акустического ядра струи и снижение градиента турбулентных пульсаций скорости потока за счет дополнительного обжатия газо-плазменного потока потоком стабилизирующим газа.

С учетом влияния профиля ГВТ на характер шумоизлучения было разработано несколько конструкций плазмотронов с улучшенной (по шумовым характеристикам) газодинамикой течения плазмообразующего газа. Были предложены конструкции сопловых узлов плазмотронов, спроектированные на основе профилей сопла Витошинского, а также известные в звукопередающих и вещательных системах сопла экспоненциальной и катеноидальной форм, в которых за счет характерного изменения площади проходного сечения может существенно изменяться активная составляющая акустической мощности (вконфузорах экспоненциальной формы уменьшается энергия высокочастотного излучения, в катеноидальных – звукового диапазона) [3].

Помимо акустических измерений определялись параметры электромагнитного излучения – освещенность (E , лк) в видимой области спектра (380-760 нм) и энергетическая освещенность (E_e , мВт/м²) в спектральном диапазоне УФ-излучения (280-400 нм, зоны А+В) с помощью люксметра-УФ-радиометра ТКА-ПКМ (06) в соответствии с рекомендациями ГОСТ 24940-96, СНиП 23-05-95 и СН 4557-88.

На основе анализа физических моделей оптической генерации плазменных струй было показано, что интенсивность излучения плазмотронов в оптическом диапазоне зависит от геометрии плазменной дуги (струи) и может быть снижена за счет её обжатия и стабилизации. Исходя из этого вывода, а также на основе анализа известных моделей шумоизлучения для струйного истечения, характерного для двойных сопел [5], был сделан вывод, что внедрение плазмотронов с двухконтурным способом подачи газа (формирующим и стабилизирующим плазменную струю ГВТ) способно снизить уровень оптического и акустического излучения, повысив тем самым безопасность их применения. При одинаковых внешних размерах двойного сопла и максимальных газодинамических параметрах потоков меньшая акустическая мощность генерируется соосными струями со скоростями истечения из внешнего сопла большими, чем из основного. Для соосных струй с противоположным соотношением скоростей пониженные уровни шумоизлучения (особенно в области высоких частот) наблюдаются для сопел с относительно широким внешним диаметром, что связано с существенным снижением градиента средних скоростей при смешении внутреннего потока с окружающей средой и, следовательно, снижением интенсивности турбулентных пульсаций скорости.

По результатам исследований с применением разработанных принципов проектирования были сконструировано нескольких оригинальных конструкций плазмотронов для резки металлов (рис. 1):

1. Новый плазмотрон ПМВР-5.1, имеющий оригинальную систему равномерного распределения потока плазмообразующего газа на входе в завихряющий элемент его газоздушного тракта [56];

2. Плазмотрон ПМВР-9.1 [7] – проектная модель генератора плазмы, работающего по технологии «узкоструйной» или «сжатой» плазмы (аналога технологий HiFocus (Kjellberg) и EASYTHERM (Messer Greisheim) – Германия, а также HyPerformance (Hypertherm, США);



Рис. 1. Новые плазмотроны для резки металлов: а) ПМВР-5.1, б) ПМВР-9.1

Для сравнительного анализа эффективности проектирования помимо 2-х упомянутых новых конструкций были взяты ещё 2 плазмотрона: 1. Базовый плазмотрон ПМВР-М, разработанный в конце 90-х годов ООО НПО «Полигон» (г. Екатеринбург) и широко используемый до настоящего времени в технологиях автоматической резки металлов на предприятиях машиностроительного и металлургического комплекса Уральского региона и имеющий ряд преимуществ по сравнению с другими отечественными плазмотронами по показателям функциональной эффективности и акустической безопасности [3];

2. Плазмотрон Kjellberg PB S-45W (Германия) – один из наиболее востребованных на отечественном рынке продуктов зарубежных производителей, имеющий улучшенные показатели энергоэффективности при резке металлов малых толщин.

Анализ результатов проектирования по принципам безопасности засвидетельствовал ряд преимуществ, достигнутых в борьбе с шумовым фактором. У профилированного плазмотрона ПМВР-5.1 отсутствуют тональные составляющие в спектре излучения, а узкоструйный плазмотрон ПМВР-9.1 показывает максимальное снижение уровня звукового давления на 10–12 дБ в диапазоне 125–500 Гц, что позволяет уменьшить область сверхнормативного излучения на 1/3 октавы. Суммарный уровень звуковой мощности плазмотронов ПМВР-5.1 и ПМВР-9.1 на 4-6 дБА меньше, чем у ПМВР-М и сопоставим с одним из наиболее эффективных зарубежных плазмотронов Kjellberg PB S-45W (рис. 2). Средняя интенсивность излучения в оптическом диапазоне у плазмотрона ПМВР-9.1 меньше, чем у базовых плазмотронов и сопоставима с Kjellberg PB S-45W. На 50 лк меньше уровень излучения в оптическом диапазоне и у плазмотрона ПМВР-5.1 (в сравнении с базовым плазмотроном).

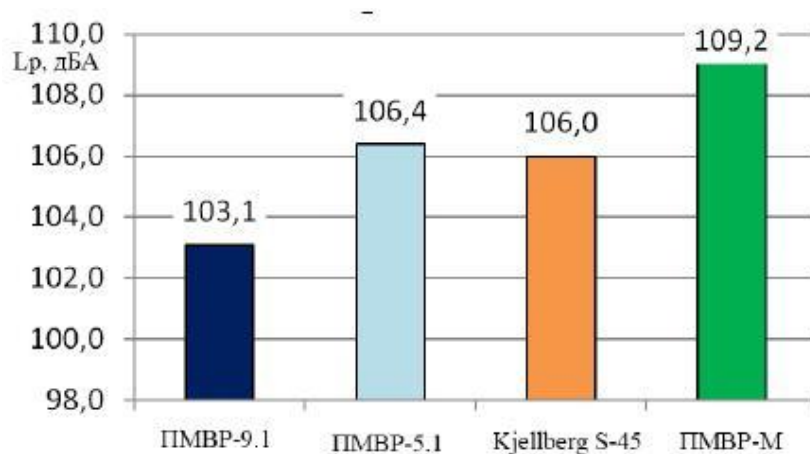


Рис. 2. Уровень звуковой мощности плазмоторнов для резки в звуковой области

В качестве механизма, ответственного за пониженный уровень излучения, следует отметить фактическое исчезновение дискретных составляющих акустического спектра, появляющихся в диапазоне сверхнормативного излучения в результате резонансного усиления турбулентных пульсаций потока плазмообразующего газа в ГВТ плазмоторна. По сравнению с плазмоторна ПМВР-М, у которого наблюдается дискретный характер излучения на частоте 3,15 кГц, в акустическом спектре плазмоторна ПМВР-5.1, дискретный уровень излучения оказывается гораздо менее выраженным, либо исчезает вовсе, что позволило снизить уровень звука на 5–7 дБ.

В связи с вышесказанным, авторы советуют обратить внимание на плазмоторна ПМВР-9.1, использующий двухконтурную схему подачи и стабилизации газа в плазменной струе. Подобная технология «узкоструйной плазмы» позволяет разделять металлы небольших толщин струей меньшего диаметра при существенно меньшем энергопотреблении, что в целом, положительно сказывается и на характере негативного воздействия вредных факторов плазменной резки на рабочий персонал. Проектная модель такого плазмоторна была исследована авторами в режиме «холодного» (аэродинамического) истечения и показала существенно лучшие показатели по шумоизлучению.

Как видно из рис. 3, струя, формируемая при истечении из сопла главного (плазмообразующего) контура, во всем диапазоне акустического спектра генерирует шум ниже нормируемых уровней звукового давления. При максимальной газодинамической нагрузке вторичного (формирующего) контура акустическое излучение практически во всех диапазонах спектра оказывается ниже, чем у базового плазмоторна ПМВР-М. При этом в спектре нового плазмоторна отсутствуют появляющиеся при различной геометрии соплового узла базового плазмоторна дискретные составляющие, существенно меньше оказывается излучение и в ультразвуковом диапазоне спектра (за счет меньшей скорости истечения из широкого сопла вторичного контура). Учитывая известные результаты исследований

шумоизлучения, характерного для двухконтурных реактивных двигателей [5], данный плазмотрон может быть оптимизирован по акустическим показателям путем выравнивания расходов газа в обоих контурах и подбора характерных диаметров сопел главного D1 и вторичного контуров D2 ($D2/D1 \sim 2$).

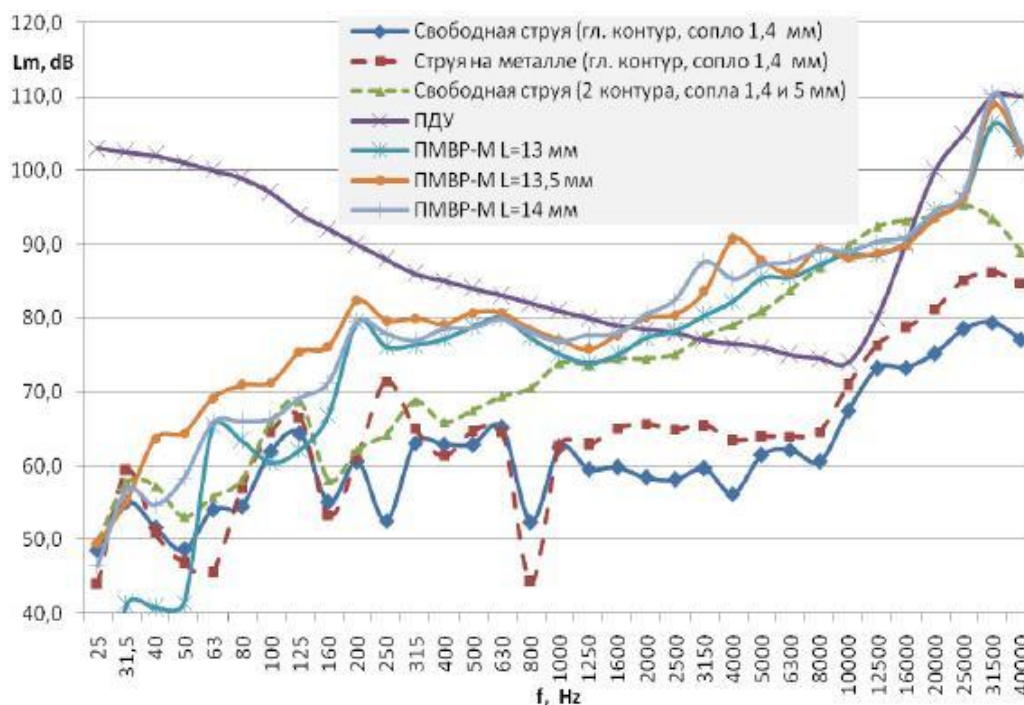


Рис. 3. УЗД в 1/3-октавных диапазонах слышимого и низкочастотного ультразвукового спектров акустического излучения плазмотронов (режим «холодной» струи, L – расстояние от катода до среза сопла).

Проведённые исследования факторов освещенности рабочей зоны помимо упомянутых выше особенностей выявили существенный динамический характер излучения как в видимом, так и в ультрафиолетовом диапазоне электромагнитного спектра, влияние объема открытой части плазменной дуги и площади её излучающей поверхности. Например, фиксируемое импульсное воздействие в начальный момент врезки плазменной дуги в металл в 4–5 раз превосходило средние значения освещенности в процессе резки, когда зазор сопло-металл составлял минимальное значение (~5 мм). Существенно (в разы) возрастал уровень освещенности и при увеличении диаметра сопла, а, следовательно, объема и поверхности излучения. Отметим в этой связи, что излучение плазменной дуги, в среднем, оказалось по упомянутым причинам приблизительно в 2 раза менее интенсивным, чем при сварке плавящимся электродом.

В целом, измерения освещенности в видимом диапазоне спектра показали значения от 200 до 1000 лк на расстоянии 0,4 м от плазменной дуги. При этом наименьшая освещенность (менее 250 лк) была зафиксирована при резке на соплах диаметром 2 мм плазмотроном ПМВР-5.1, что оказалось даже меньше уровня, регистрируемого при работе Kjellberg PB S-

45W и ПМВР-М (около 300 лк) на соплах с сопоставимыми диаметрами. Освещенность при работе на соплах диаметром 3 мм составила порядка 500-600 лк, диаметром 4 мм – 800–1000 лк.

В ультрафиолетовом диапазоне минимальные уровни излучения были зафиксированы также при резке на соплах диаметром 2–2,5 мм (300-400 мВт/м²) с общей тенденцией к увеличению при возрастании диаметра сопла (400-600 мВт/м² для сопел диаметром 3 мм и 600–1500 мВт/м² для сопел 4 мм).

Таким образом, можно сделать выводы, что использование разработанных автором принципов и методов проектирования металлорежущих плазмотронов позволяет существенно повысить степень безопасности применения электроплазменных технологий по критериям акустического и оптического излучения. Отдельного внимания в этой связи заслуживает технологии узкоструйной плазменной резки, по результатам исследований которой подтверждено, что применение технологии «узкоструйной плазмы» на соплах меньшей длины и диаметра позволяет снизить общий уровень звуковой мощности в ультразвуковой области, а также интенсивность оптического излучения в видимом и ультрафиолетовом диапазоне.

Список литературы

1. Плазменные технологии на рубеже веков 3 // Автоматическая сварка. 2000. № 12. URL: <https://patonpublishinghouse.com/rus/journals/as/2000/12?ysclid=ljrlga7enw299961163>.
2. Гигиеническая оценка условий труда при плазменно-механической обработке / А. В. Ильницкая, И. С. Алексеева, Ю. Н. Норкин и др. // Гигиена труда и профессиональные заболевания. 1981. № 9. С. 12–15.
3. Анахов С. В., Пыкин Ю. А. Плазмотроны: проблема акустической безопасности. Теплофизические и газодинамические принципы профилирования газоздушных трактов малозумных плазмотронов. Екатеринбург : УрО РАН, 2012. 223 с.
4. Анахов С. В. Программа расчета спектра излучения плазмотрона в звуковом диапазоне частот / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин, М. Ю. Черноскутов. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2018661226 от 04.09.2018.
5. Кузнецов В. М. Основы теории шума турбулентных струй. М. : Физматлит, 2008. 239 с.
6. Пыкин Ю. А. Плазмотрон / Ю. А. Пыкин, С. В. Анахов, А. В. Матушкин. Патент на изобретение № 2754817 от 07.09.2021.
7. Пыкин Ю. А. Плазмотрон / Ю. А. Пыкин, А. Ю. Мороз, С. В. Анахов, А. В. Матушкин. Патент на изобретение «» № 2780330 от 21.09.2022.