

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

С.В. Анахов

ФАКТОРЫ АКУСТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ПРОЦЕССАХ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Широкомасштабное внедрение в различные сферы промышленного производства процессов плазменной обработки материалов наряду с требованием высокой производительности и качества обработки заставляет всё большее внимание обращать на необходимость защиты персонала от воздействия опасных и вредных производственных факторов, соблюдения санитарной и экологической безопасности в рабочей зоне. Широкий опыт внедрения плазменных технологий и многолетние авторские исследования в области акустической экологии и условий труда свидетельствуют о высоких уровнях шума в рабочей зоне и существенном негативном влиянии шумового фактора на обслуживающий персонал. В данной работе представлены научно - исследовательские и практические результаты, полученные в ходе изучения акустического фактора при использовании технологии плазменного воздействия на материалы.

Экспериментальные исследования были посвящены определению спектральных (уровня звукового давления L_m , уровня звука L_a , частоты f), энергетических (уровня звуковой мощности L_p и интегральной мощности P) и пространственных (показателей направленности излучения G) характеристик звукового поля, генерируемого плазмотроном. Был создан комплекс экспериментальных методов, включающий измерения точным методом в условиях диффузного звукового поля в реверберационной камере, ориентировочным - в режиме реального процесса работы плазмотрона и пространственные измерения в заглушенной камере. Измерения спектральных характеристик проводились в $1/3$ октавном диапазоне частот и нормировались по спектру в диапазонах слышимых (63 Гц – 8 кГц) и ультразвуковых (11,2 – 100 кГц) частот. Были получены шумовые карты участков плазменной резки, напыления, плазменно-механической обработки при их эксплуатации в условиях реального производственного процесса. Анализ создаваемых уровней шума и спектрограмм его направленности выявил среди возможных его источников (механизмы перемещения, источники питания, газовые и водяные коммуникации, насосные и ком-

прессорные установки) наиболее интенсивный – плазмотрон, дающий до 60-70% вклада в общий уровень звуковой мощности.

К характерным особенностям шумоизлучения самого плазмотрона можно отнести:

1) высокий общий уровень звукового давления (до 120-130 дБ), превышающий нормируемые значения на 4-7 дБ в области инфразвуковых и низких частот (до 1 кГц) и на 30-35 дБ на низких частотах ультразвукового диапазона (8-16 кГц);

2) наличие в звуковом спектре дискретных тонов, существенным образом определяющих общий уровень звуковой мощности и зависящих от геометрических параметров соплового узла и газозвукового тракта (ГВТ), а также параметров технологического процесса;

3) направленный характер излучения со средним превышением уровня звукового давления в диапазоне телесного угла от 38° до 54° (от направления плазменной струи) на 20-25 дБ.

С целью выявления основных факторов, влияющих на шумоизлучение струи были проведены экспериментальные исследования на рабочих «горячих» струях и на модельных «холодных» на плазмотронах прямого действия для резки типа ПВР. Для выделения из общего спектра шумоизлучения источников аэродинамического происхождения проводились измерения в режиме «холодного» истечения. Выяснилось, что при горячем истечении плазмообразующего газа (ПОГ) непосредственно плазмотроном генерируется 70-72% общей звуковой мощности и 60-62% - при холодном истечении. Непосредственно в зоне плазменной обработки шум образуется на нескольких участках:

1) непосредственно внутри плазмотрона;

2) турбулентным газодинамическим потоком плазменной струи при её до- и сверхзвуковом истечении из сопла плазмотрона;

3) в щели разрезаемого металла в процессах резки – за счет резонансных явлений в щели - волноводе;

4) в области за разрезаемым металлом – за счет процессов турбулентных пульсаций отходящих газов, аэрозолей и расплавленного металла.

Среди всего многообразия причин и явлений, влияющих на характер шумоизлучения, можно выделить следующие факторы, определяющие общий и пиковый уровень звуковой мощности:

1) Тип плазмотрона (для резки, напыления, электродуговой термообработки) и технология его применения. Задание технологии обработки существенно определяет роль большинства последующих факторов.

2) Параметры плазмообразующего газа и плазменной струи:

- Температура и давление – как факторы, влияющие на характер течения ПОГ в плазмотроне, на потери давления газа по ГВТ и приводящие к изменению скорости истечения струи и степени ионизации и неравновесности плазмы в струе. Газодинамический расчет параметров потока ПОГ показал, что течение газа по ГВТ носит турбулентный характер (значения числа Рейнольдса $Re = 2,3 \cdot 10^3 \div 5,2 \cdot 10^4$) с образованием областей интенсивных пульсаций газа. Рассмотрение механизмов генерации шума позволило учесть влияние температуры на повышение уровня звуковой мощности ΔL_p :

$$\Delta L_p = 10 \lg T_h / T_c \quad \text{при } M < 0,5;$$

$$\Delta L_p = 20 \lg T_h / T_c \quad \text{при } 0,5 < M < 1,5,$$

где T_h и T_c – температуры горячей и холодной струй, соответственно, M – значение числа Маха на срезе сопла плазмотрона.

При этом звуковая мощность струи $P \sim T^{1,5}$ при $0,5 < M < 1,5$ и $\sim T^{0,5}$ при сверхзвуковых скоростях истечения.

Учет аэродинамических потерь по ГВТ позволил определить зависимость смещения частоты резонансного пика $\Delta f_{\text{рез}}$ в спектре от изменения величины входного давления ΔP :

$$\Delta f_{\text{рез}} \sim \Delta P^{(\gamma-1)/\gamma},$$

где γ - показатель адиабаты газа.

Степень неравновесности плазмы в струе, рассчитанная на примере азотной плазмы составляет по температуре от 0,3 до 0,6.

- Расход газа, влияющий на степень турбулентности ПОГ в плазмотроне и струе (значения чисел Рейнольдса (Re) достигают 4200 при расходе ПОГ ~ 1 г/с и температуре $T \sim 12000$ К), на скорость истечения струи, плотность теплового потока струи, на величину тепловых и газодинамических потерь по ГВТ.

- Сорт применяемого ПОГ (Ar , N_2 , CO_2 и смеси газов). Необходим учет характера изменения плотности, энтальпии и химического потенциала газа, существенно влияющих на характер теплообмена ПОГ с элементами ГВТ плазмотрона и на параметры плазмы в струе.

- Подводимая электрическая мощность, ток и напряжение дуги, её полярность, род тока – факторы влияющие на параметры плазменной струи и величину тепловых потерь. Следует учитывать также эффекты, связанные с процессами шунтирования катодного пятна в сопловом узле и шум электромагнитной природы, возникающий на поверхности металла и в ванне его расплава.

3) Конструктивные особенности плазмотрона:

- Профиль ГВТ, существенно влияющий на величину газодинамических потерь и степень турбулизации ПОГ. В процессе анализа характерных профилей ГВТ плазмотронов было выявлено наличие камер-резонаторов, в которых возбуждаются звуковые колебания с частотами турбулентных пульсаций, близкими к собственным частотам резонаторов. В результате была предложена модель генерации дискретных пиков звуковой мощности колебательной системой – газоздушным трактом плазмотрона [1]. Расчет характерных частот и уровней пиковой мощности звука показал хорошее согласие с экспериментальными данными о наличии пиков мощности в звуковом диапазоне частот.

- Форма соплового узла плазмотрона, определяющая появление частот в ультразвуковой части спектра шумоизлучения. Предложенная физическая модель, рассматривающая сопловой канал как волновод, излучающий в открытое пространство, позволила объяснить образование нескольких пиков звуковой мощности в ультразвуковой части спектра.

- Используемые конструктивные материалы различных узлов плазмотрона, характер их обработки и степень эксплуатации. Существенными являются факторы, влияющие на теплообмен газа со стенками ГВТ и плазменной струи с материалами соплового узла и катода, а, соответственно, и на характер тепловых потерь, стойкость самих материалов, стабильность параметров дуги и характера истечения струи. Играет свою роль и характер обработки материалов, сказывающийся на степени турбулизации газового потока и характере его теплообмена со стенками.

- Характер охлаждения плазмотрона (водяной или воздушный), определяющий величину тепловых потерь и стойкость материалов.

4) Струя ПОГ, параметры которой существенным образом зависят от большинства вышеперечисленных факторов.

- Определяющим фактором является скорость истечения струи, требующая учета механизмов генерации высокочастотного шума при дозвуковом и сверх-

звуковом характере её истечения. Анализ шумоизлучения, согласно известной модели Лайтхилла, позволяет объяснить появление дискретных частот в ультразвуковой части спектра аэродинамическим шумом сверхзвукового ядра струи, связанным с механизмом обратной связи, создающим излучение дискретного тона.

Среди других факторов, влияющих на шумоизлучение, отметим:

- Форма и длина струи, определяющие влияние отдельных участков струи на шумоизлучение (основная мощность генерируется на начальном участке струи длиной ~ 5 калибров). Анализ спектрограмм шума с максимумом излучения в районе 46° телесного угла свидетельствует о сложном характере взаимодействия различных участков разогретого диссоциированного потока плазмы с потоком слабонагретого газа и окружающей средой.
- Характер перемещения струи по поверхности обрабатываемого материала, зависящий от типа обработки, и влияющий на распределение звуковой мощности в отраженном от поверхности материала звуке и на механизм резонансной генерации шума в щели металла при его резке.
- Механический шум, возникающий при взаимодействии частиц металла и грата с элементами конструкции.

Перечисляя и анализируя причины шумообразования, можно сделать вывод о том, что существенного снижения уровня шума можно достигнуть за счет оптимизации процессов технологической обработки. Ввиду сложности одновременного учета всех технологических факторов были проанализированы некоторые взаимосвязи между указанными параметрами и получены критериальные соотношения, позволяющие производить моделирование экспериментальных данных по числам Маха M , Рейнольдса Re , Кармана Ka , Струхала Sh и ряда других. При этом дальнейшая оптимизация этих процессов должна, по видимому, идти в плане большего учета теплофизических параметров с получением соответствующих критериальных зависимостей. Следует однако иметь в виду, что требования технологии лимитируют эффект снижения шума только за счет оптимизации параметров технологического процесса. В связи с этим, в опоре на данные теоретического и экспериментального анализа вышеуказанных факторов шумообразования, был сделан вывод о возможности существенного снижения уровня шума непосредственно в источнике его образования – в плазмотроне.

В качестве основного направления была выбрана борьба с резонансными явлениями внутри плазмотрона путем профилирования его ГВТ, формы катодного и соплового узла, выбора оптимальных параметров входного и выходного отверстий ГВТ, оптимизация распределения газового потока по тракту плазмотрона. Указанные рекомендации были использованы при проектировании и внедрении в производство серии малозумных плазмотронов, позволяющих снизить пиковые значения уровня шума на 10-12 дБ.

Для понижения общего уровня акустического излучения можно дополнительно использовать устройства и технологии по борьбе с шумом на пути его распространения. С учетом диаграмм направленности и спектрограмм шума, законов его распространения и поглощения разработаны и внедрены звукопоглощающие насадки и экраны различных типов: для напыления, для термо- и химико-технологической обработки, для резки металлов, позволяющие снизить как общий, так и пиковый уровень шума на 5-15 дБ, сгладив резонансный вид спектра шумоизлучения в области высоких и низких ультразвуковых частот. Широкое применение получил также звукоизолирующий экран с водяной завесой, позволяющий дополнительно к эффекту снижения шума сократить выброс в окружающую среду пыли, токсичных газов, ультрафиолетового и светового излучения.

Представленный обзор факторов акустической безопасности в электроплазменных процессах свидетельствует о сложном характере шумоизлучения и требует дальнейшего комплексного анализа для более полного выявления взаимосвязи указанных факторов с целью их последующей технологической оптимизации. При этом достигнутые на этом пути успехи в плане снижения шумовой нагрузки позволяют говорить о перспективности предлагаемых малозумных электроплазменных технологий (см. Пыкин Ю.А., Анахов С.В. Факторы снижения шумов при работе плазменного оборудования. – Технология машиностроения. 2008. №7, с.64-67).