

УДК 537.525,537.533,621.791.72

СИСТЕМА С ВЫВОДОМ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В АТМОСФЕРУ НА ОСНОВЕ ПУШКИ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ

© 2019 г. С. Ю. Корнилов¹, Н. Г. Ремпе¹, *

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники”, Томск, Россия

*E-mail: remnik77@gmail.com

Поступила в редакцию 20.05.2019 г.

После доработки 20.06.2019 г.

Принята к публикации 27.07.2019 г.

Описаны основные характеристики и конструкция устройства вывода сфокусированного электронного пучка в атмосферу для пушки с плазменным эмиттером. Показано, что пушки с плазменным эмиттером могут использоваться для получения порошков оксида цинка в атмосфере с размером частиц около 100 нм. Представлены результаты вневакуумного электронно-лучевого нанесения покрытий на основе карбидов тугоплавких металлов. Показана возможность электронно-лучевой сварки деталей из алюминия и меди при атмосферном давлении.

DOI: 10.1134/S0367676519110139

ВВЕДЕНИЕ

Плазменная эмиссионная электроника является одним из научных направлений Томского университета систем управления и радиоэлектроники. В рамках этого направления многие годы проводятся исследования по созданию электронных источников (электронных пушек) с плазменным эмиттером. В настоящее время изучены и нашли практическое применение пушки с плазменным эмиттером для получения непрерывных и импульсных, узких и широких электронных пучков с различными параметрами, с разной формой поперечного сечения, с заданным распределением плотности тока по сечению. Такое многообразие генерируемых плазменными пушками электронных пучков позволяет применять пушки практически во всех современных электронно-лучевых технологиях, таких как сварка, наплавка, модификация материалов и др. [1]. Пушки постоянно совершенствуются, появляются новые сведения об особенностях и возможностях их практического применения.

Использование плазмы как источника электронов позволяет во многом снизить требования к остаточной атмосфере в области первичного формирования и ускорения электронного пучка. Генерация электронного пучка пушкой с плазменным эмиттером может осуществляться при давлениях, на 2–3 порядка превышающих рабочее давление пушек с термокатодом. Как показано в работе [2], наличие более высокого давления в ускоряющей промежуток пушки не является негативным фак-

тором для формирования электронного пучка, а в большинстве случаев способствует достижению его высокого качества. Кроме того, в пушках с плазменным эмиттером при изменении тока пучка сохраняется стабильное положение области с минимальным диаметром сфокусированного пучка (положение кроссовера). Указанные особенности позволяют утверждать, что при использовании пушек с плазменным эмиттером в составе вневакуумной электронно-лучевой системы возможно существенное упрощение устройства вывода, предназначенного для транспортировки сфокусированного электронного пучка в атмосферу. Одним из этапов дальнейшего совершенствования пушек с плазменным эмиттером и стали исследования [3] особенностей построения устройства вывода сфокусированного электронного пучка в газ повышенного давления, до атмосферного.

ВНЕВАКУУМНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ПУШКИ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ

Исследования устройства вывода проводили методом компьютерного моделирования в программе Ansys. Модель включала систему газодинамических окон (ГДО), позволяющих ступенчато повышать давление газа при транспортировке пучка до атмосферного.

На рис. 1 показана геометрическая схема рассматриваемого в задаче устройства вывода электронного пучка в атмосферу, состоящего из двух

ГДО. Схема была построена с помощью пакета твердотельного параметрического моделирования SolidWorks. ГДО содержит по две диафрагмы, объем между которыми откачивается вакуумными насосами. Устройство вывода построено таким образом, что ускоряющий промежуток пушки (область между поверхностью эмиттерного катода 1 и экстрактором 2) и лучепровод 3 образуют вторую ступень (второе ГДО) устройства вывода. Отсчет ступеней ведется от атмосферы.

Первая ступень имеет осевой канал 5 диаметром 2 мм, через который электронный пучок выводится непосредственно в область с атмосферным давлением. На входе в первую ступень для расчетов задавали давление в одну атмосферу, и температуру газа 25°C. Первую ступень откачивали со скоростью $500 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ через патрубок 7 (граница, на которой задавались условия откачки). Лучепровод, входящий в состав элементов второй ступени, представляет собой канал транспортировки электронного пучка. В канале создается магнитное поле для фокусировки пучка. Откачка второй ступени происходит через патрубок 6 (граница, на которой задавались условия откачки) со скоростью $800 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$. Ускоряющий промежуток и лучепровод разделены экстрактором с каналом длиной 40 мм и диаметром 3 мм. На выходе лучепровод имеет сужение в виде конуса, меньшее основание которого обращено к первой ступени и переходящий в протяженный цилиндрический канал 4 длиной 10 мм и диаметром 2 мм. В канале 8 (рис. 1) задавали условия для потока газа, напускаемого в разрядную камеру пушки. Величина напуска — $10 \text{ см}^3 \cdot \text{атм/ч}$.

С помощью модуля CFX Mesh программы Ansys на расчетную область накладывали неоднородную сетку конечных элементов. Характерные размеры ячеек сетки варьировали в пределах 10^{-5} – 10^{-2} м. Неоднородное задание размеров ячеек сетки позволяет регулировать точность и время выполнения модельных расчетов.

В условиях рассматриваемой задачи моделирование устройства вывода в целом достаточно времяемкий процесс. Для снижения времени счета использовался следующий подход:

- выполняли расчет некоторой начальной, базовой конструкции двухступенчатого устройства вывода;
- выделяли одну из ступеней системы дифференциальной откачки;
- из результатов, полученных в базовой геометрической схеме, определяли условия на границах выбранной ступени;
- выполняли модельные расчеты выбранной ступени;

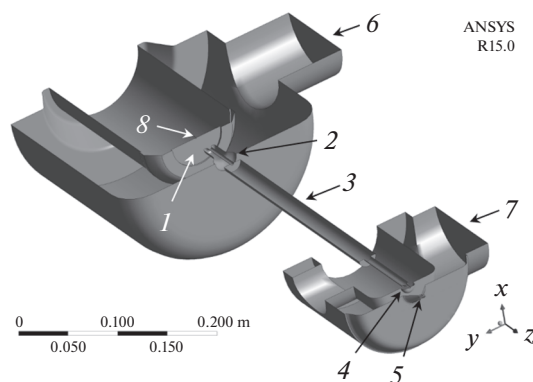


Рис. 1. Геометрическая схема устройства вывода электронного пучка в атмосферу: 1 – эмиттерный катод; 2 – экстрактор; 3 – лучепровод; 4 – выходная диафрагма второй ступени; 5 – выходная диафрагма первой ступени; 6 – патрубок откачки второй ступени; 7 – патрубок откачки первой ступени; 8 – канал в эмиттерном катоде.

– выполняли уточненный расчет полной схемы устройства вывода с учетом принятых решений по геометрической схеме каждой ступени.

Такой подход позволил существенно снизить затраты машинного времени на проведение вычислительных экспериментов. Результаты расчетов по описанному подходу совпали с результатами, полученными при моделировании всей расчетной области.

На рис. 2 представлены поля скоростей газовых потоков в первой ступени (левая часть рисунков) и части второй ступени, в лучепроводе пушки, полученные в результате модельных расчетов. Представленные на рис. 2 результаты демонстрируют влияние поперечной струи [4], направленной перпендикулярно осевому газовому потоку (cross-jet).

Рисунки 2а и 2б получены для двух давлений на входе в cross-jet. Для сравнения на рис. 2в показано поле скоростей газового потока в устройстве без поперечной струи. Повышение давления на входе cross-jet до 1.5 атмосфер приводит к тому, что значительная часть поперечного потока поступает во вторую ступень. В случае, когда cross-jet отсутствует, поступающая из атмосферы струя газа равномерно расширяется в объеме первой ступени, повышая давление на оси ступени и в лучепроводе. При этом наблюдается область уплотнения вблизи входа во вторую ступень.

Анализ расчетных данных показывает, что наиболее предпочтительным вариантом является использование поперечной струи, образованной при давлении на входе cross-jet в одну атмосферу. Удастся понизить давление по всей длине лучепровода примерно в три раза относительно давления в отсутствие cross-jet. При этом существенно уменьша-

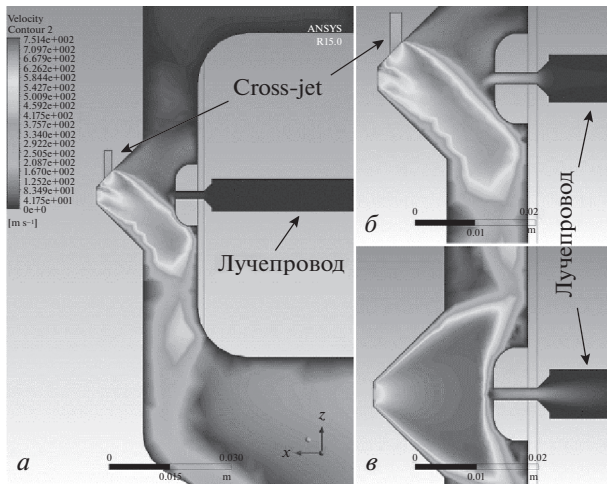


Рис. 2. Поля скоростей потоков газа в первой ступени и части второй ступени (лучепровод) устройства вывода: *a* – с cross-jet, 1 атм; *б* – с cross-jet, 1,5 атм; *в* – без cross-jet.

ются неоднородности в распределении давления на оси первой ступени. Отсутствует слой уплотнения вблизи входа во вторую ступень. Давление снижается плавно от атмосферного до давления в лучепроводе. Связано это с уменьшением скорости осевого потока и, как следствие, со снижением вероятности возникновения ударных волн при встрече сверхзвуковой струи с конструктивом входной диафрагмы второй ступени.

Дальнейшие исследования касались влияния ориентации cross-jet относительно оси системы на скорость потока на входе во вторую ступень и распределение давления, соответствующего разным углам входа поперечной струи. Если ввод поперечной струи происходит под углом, меньшим 90° к оси системы, то наблюдается увеличение осевого потока, поступающего во вторую ступень. Связано это с тем, что область обдува осевого потока смещается ко входу во вторую ступень. Создаются условия для проникновения рассеянной поперечной струи в лучепровод. Кроме того, распределение давления на оси первой ступени имеет ярко выраженные переходные области с локальными скачками уплотнения и разрежения газовой среды. По-видимому, это связано с отражением потока от входной диафрагмы ГДО. Поперечный поток в этих условиях негативным образом влияет на работу системы.

Иные распределения наблюдаются в случае, если угол между осью поперечного потока и осью системы составляет 90° и более. Сдвиг осевого потока происходит уже вблизи входной диафрагмы первой ступени. Направления движения рассеянной части поперечного потока вместе с осевым потоком образуют струю, обтекающую диафрагму второй ступени на достаточном удалении

от ее осевой части. Тем самым обеспечивается существенное снижение величины потока газа, входящего во вторую ступень устройства вывода пучка в атмосферу.

Из результатов моделирования также следует, что нежелательно использовать встречный поток газа, направленный под углом 135° и более градусов. Давление в лучепроводе несколько снижается, однако наблюдается неоднородность в распределении давления в первой ступени с ярко выраженными скачками уплотнения газовой среды. Таким образом, ориентация поперечного потока в диапазоне 90° – 105° к оси системы обеспечивает наилучшее распределение давления между атмосферой и входом во вторую ступень устройства вывода.

Как было отмечено выше, пушки с плазменным эмиттером работают при непрерывном напуске газа в разрядную камеру с откачкой через ускоряющий промежуток. Наличие двух встречных потоков в ускоряющем промежутке создает область разрежения с давлением на два порядка ниже, чем давление в ускоряющем промежутке и в канале ускоряющего электрода. Длина области разрежения практически совпадает с длиной ускоряющего промежутка.

Как показали расчеты, откачка газа из второй ступени устройства вывода лишь через осевой канал в экстракторе не обеспечивает нужное для работы пушки давление в ускоряющем промежутке. Для снижения давления необходимо отводить часть потока непосредственно из лучепровода. Приемлемый результат получен при использовании дополнительных каналов откачки газа из второй ступени, общая площадь поперечного сечения которых примерно в 6 раз превосходит площадь осевого отверстия в ускоряющем электроде.

На рис. 3 показан внешний вид разработанного устройства вывода электронного пучка в атмосферу с двумя ступенями откачки. Устройство вывода построено таким образом, что ускоряющий промежуток пушки (область между поверхностью эмиттерного катода и экстрактором) и лучепровод, разделенные экстрактором, образуют вторую ступень. Отсчет ступеней ведется от атмосферы.

Канал транспортировки электронного пучка *1* (лучепровод) входит в состав элементов второй ступени откачки. На выходе лучепровод имеет сужение в виде конуса геометрические размеры которого соответствуют принятым в расчетной модели. В канале транспортировки магнитным полем фокусирующей линзы создаются условия для фокусировки электронного пучка в плоскости выходной диафрагмы 4 первой ступени. Конструкция фокусирующей линзы позволяет изменять коэффициент увеличения, от которого зависит минимальный диаметр электронного пучка в

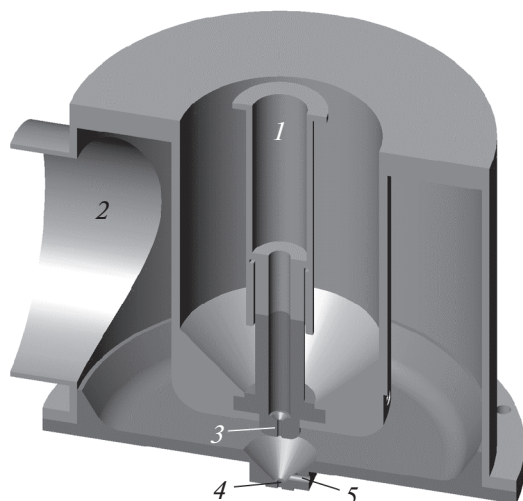


Рис. 3. 3D-модель устройства вывода электронного пучка в атмосферу: 1 – лучепровод; 2 – откачной патрубок первой ступени; 3 – диафрагма второй ступени; 4 – диафрагма первой ступени, 5 – cross-jet.

плоскости фокусировки. Вторая ступень откачивается турбомолекулярным насосом, скорость которого составляет $800 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ по азоту.

Первая ступень имеет выходную диафрагму диаметром 2 мм, через которую электронный пучок выводится непосредственно в область с атмосферным давлением. Ступень откачивается со скоростью $500 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ через патрубок 2 насосом Рутса, работающим в паре с безмасляным винтовым насосом. В первой ступени выполнен канал 5 для создания поперечной струи (cross-jet), расположенной перпендикулярно оси выходной диафрагмы.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований формирования и фокусировки электронного пучка в электронно-оптической системе с плазменным эмиттером, а также модельные расчеты устройства вывода электронного пучка в атмосферу позволили создать вневакуумную электронно-лучевую систему на основе пушки с плазменным эмиттером (рис. 4) [5], обеспечивающую генерацию сфокусированного электронного пучка, и его последующую транспортировку в область с атмосферным давлением. Пушка с устройством вывода располагается на роботе-манипуляторе, позволяющем легко перемещать их по заданной траектории и тем самым обеспечивать реализацию таких технологических процессов в атмосфере, как сварка, резка, наплавка, в том числе, послыонная. Характеристики разработанного оборудования отражены в табл. 1. Особенностью разработанного оборудования является то, что перепад давления между областью генерации электронного пучка и атмосферой обеспечивается двумя ступенями откачки. Устройство вывода

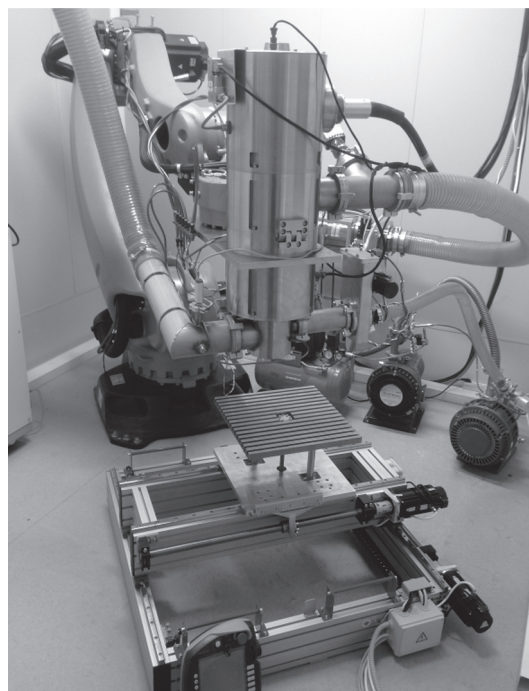


Рис. 4. Внешний вид пушки и устройства вывода, установленных на роботе.

обеспечивает транспортировку электронного пучка в область с атмосферным давлением без существенной потери мощности электронного пучка на выводных диафрагмах. Кроме того, решения, заложенные в конструкцию, позволяют использовать высоковольтную пушку отдельно от устройства вывода, например, для выполнения прикладных исследований и технологических операций в вакуумной камере.

НЕКОТОРЫЕ ВНЕВАКУУМНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

С использованием разработанного устройства вывода электронного пучка в атмосферу был проведен ряд технологических экспериментов по получению защитных покрытий на конструкционной стали, нанопорошков оксидов металлов методом электронно-лучевого испарения, а также сварке алюминиевых и медных деталей.

В экспериментах по вневакуумной электронно-лучевой наплавке использовали реакционные обмазки, в состав которых входили стехиометрические смеси оксида TiO_2 , оксида Cr_2O_3 , углерод и органическое связующее. Состав реакционных обмазок получен в результате термодинамического моделирования в программе TERRA [6, 7]. Наплавку производили на подложки из нержавеющей стали в среде гелия. Электронным пучком запускали реакцию самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [6]. Затем

Таблица 1. Характеристики вневакуумной электронно-лучевой системы

Параметр	Значение
Ускоряющее напряжение, кВ	120
Ток электронного пучка, мА	1–200
Количество ступеней откачки	2
Перепад давления, Торр	от $5 \cdot 10^{-4}$ до 760
Коэффициент токопрохождения, не менее, %	86
Рабочее расстояние в атмосфере, мм	5–15

сканирующим пучком производили наплавку. В итоге на поверхности подложки формировался слой карбида титана или (и) хрома толщиной 120–200 мкм. Исследования показали, что полученные в результате вневакуумной электронно-лучевой наплавки покрытия обладают высокой микротвердостью (в среднем величина микротвердости составила 12 ГПа) и хорошей жаростойкостью до температуры 900°C включительно.

Электронно-лучевым испарением в атмосфере были получены образцы нанопорошков ZnO. В порошках присутствуют частицы в виде наностержней, нанодисков, частицы неправильной формы, а также сферы, имеющие различную морфологию и размер. Характерный размер наночастиц по данным микроскопии составил около 80 нм по результатам более 40 измерений.

Электронным пучком, выведенным в атмосферу, были сварены алюминиевые и медные выводы аккумуляторных батарей. Свариваемая конструкция представляла собой две пластины (медные или алюминиевые) толщиной 6 мм, между которыми расположены 80 фольг толщиной в среднем по 15 мкм каждая. Сварку одного такого соединения электронным пучком с энергией 120 кэВ и мощностью 4 кВт для медного вывода и 2 кВт для алюминиевого осуществляли за время порядка 30 с. Длина сварного шва составила около 280 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе электронной пушки с плазменным эмиттером создано устройство с выводом электронного пучка в атмосферу, которое содержит лишь два газодинамических окна. Технологические эксперименты показали возможность использования пушки для получения наноразмерных порошков, покрытий с заданными свойствами на металлы, а также осуществлять сварку сложных соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Osipov I.V., Rempe N.G.* // Rev. Sci. Instr. 2000. V. 71. № 4. P. 1638.
2. *Grishkov A.A., Kornilov S.Yu., Rempe N.G. et al.* // Plasma Phys. Rep. 2016. V. 42. № 7. P. 713.
3. *Корнилов С.Ю., Ремпе Н.Г., Шидловский С.В.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 6. С. 42; *Kornilov S.Yu., Rempe N.G., Shidlovskii S.V.* // Techn. Phys. 2016. V. 61. № 6. P. 841.
4. *Гуршович Т.А.* Турбулентные струи в поперечном потоке. М.: Машиностроение, 1993, 256 с.
5. *Аксенов А.И., Корнилов С.Ю., Моторин М.П. и др.* // ПТЭ. 2017. № 2. С. 84.
6. *Kornilov S., Rempe N., Smirnyagina N. et al.* // MATEC Web Conf. 2016. V. 79. Art. № 01033.
7. *Ilinykh N.I., Vassiliev V.P.* // MATEC Web Conf. 2013. V. 3. Art. № 01074.