Система с выводом электронного пучка в атмосферу на основе пушки с плазменным эмиттером

С. Корнилов, Н. Ремпе

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

634050 Россия, Томск

e-mail: kornilovsky@gmail.com, remnik77@gmail.com

DOI 10.31554/978-5-7925-0524-7-2018-98-105

Представлены результаты исследований, направленных на создание устройства вывода электронного пучка в атмосферу для пушки с плазменным эмиттером. Показано, что перепад давления до атмосферного в устройстве вывода электронного пучка может быть обеспечен двумя газодинамическими ступенями. Приведено описание конструкции устройства, представлены основные характеристики. Показано, что пушки с плазменным эмиттером могут эффективно использоваться для получения нанопорошков оксида цинка в атмосфере. Размер наночастиц в полученных порошках не превышает 100 nm. Представлены результаты вневакуумного электронно-лучевого нанесения карбидных покрытий с хорошими показателями жаростойкости, износостойкости и коррозионной стойкости. Особенность способа создания покрытий заключается в использовании СВС-процесса с последующей электронно-лучевой наплавкой. Показана возможность применения оборудования для электронно-лучевой сварки соединений различной сложности. Представлены результаты образцов сварки деталей из алюминия и меди. Продемонстрирована возможность электронно-лучевой сварки в атмосфере электродов промышленных аккумуляторных батарей.

Введение

Одно из научных направлений Томского университета систем управления и радиоэлектроники – плазменная эмиссионная электроника. 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 ускоряющем промежутке пушки не является негативным фактором 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 проводились 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.

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

Первая ступень имеет осевой канал **5** диаметром 2 mm, через который электронный пучок выводится

непосредственно в область с атмосферным давлением. На входе в первую ступень для расчетов задавалось давление в одну атмосферу, и температура газа 25 °С. Первая ступень откачивалась со скоростью 500 l/s через патрубок **7** (граница, на которой задавались условия откачки) бустерным насосом Рутса, работающим в паре с безмасляным винтовым насосом. 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) турбомолекулярным насосом со скоростью 800 l/s. Ускоряющий промежуток и лучепровод разделены экстрактором с каналом длиной 40 mm и диаметром 3 mm. На выходе лучепровод имеет сужение в виде конуса, меньшее основание которого обращено к первой ступени и переходящий в протяженный цилиндрический канал **4** длиной 10 mm и диаметром 2 mm.

В канале **8** (рис. 1) задавались условия для потока газа, напускаемого в разрядную камеру пушки. Величина напуска задавалась 10 sm³atm/h.

С помощью модуля CFX Mesh программы Ansys на расчетную область накладывалась неоднородная сетка конечных элементов. Характерные размеры ячеек сетки варьировались в пределах 10⁻⁵–10⁻² m. 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:

- выполнялся расчет некоторой начальной, базовой конструкции двухступенчатого устройства вывода;
- выделялась одна из ступеней системы дифференциальной откачки;
- из результатов, полученных в базовой геометрической схеме, определялись условия на границах выбранной ступени;

- выполнялись модельные расчеты выбранной ступени;
- выполнялся 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. Для этих же областей на рис. 3 представлены распределения давления на оси.

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

Представленные на рис. 2 и 3 результаты демонстрируют влияние поперечной струи, направленной перпендикулярно осевому газовому потоку (cross-jet).

Рисунки 2, *а* и 2, *б* и соответствующие им распределения 1 и 2 на рис. 3 получены для двух давлений на входе в cross-jet. Для сравнения на рис. 2, *в* и 3 (кривая 3) показаны поле скоростей газового потока и осевое распределение давления 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.

Рис.3. Распределение давления на оси лучепровода пушки и первой ступени устройства вывода: 1 – соответствует рис. 2, *а*; 2 – рис. 2, *б*; 3 – рис. 2, *в*

При этом наблюдается область уплотнения вблизи входа во вторую ступень.

Из представленных на рис. 3 распределений давления видно, 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 уменьшаются 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 снижением вероятности возникновения ударных волн, образующихся при встрече сверхзвуковой струи с конструктивом входной диафрагмы второй ступени.

На рис. 4 и 5 представлены результаты, демонстрирующие влияние ориентации поперечной струи относительно оси системы на скорость потока на входе во вторую ступень и распределение давления, соответствующее разным углам входа поперечной струи.

Если ввод поперечной струи происходит под углом, меньшим 90° к оси системы, 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.

Рис.4. Поля скоростей потоков газа в первой ступени и части второй ступени (лучепровод) устройства вывода при давлении на входе патрубка cross-jet одна атмосфера и угле между осью поперечной струи и осью системы: а – 90° ; б – 105° ; в – 60° ; г – 135°

По-видимому, это связано с отражением потока от входной диафрагмы ГДО. Поперечный поток в этих условиях негативным образом влияет на работу системы.

Рис.5. Распределение давления на оси лучепровода пушки и первой ступени устройства вывода при давлении на входе патрубка cross-jet одна атмосфера и угле между осью патрубка и осью системы: 1 – соответствует рис. 4, а; 2 – рис. 4, б; 3 – рис. 4, в; 4 – рис. 4, г

Иные распределения наблюдаются, если угол между осью поперечного потока и осью системы составляет 90° и более. Сдувание 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.

На рис. 6 и 7 представлены распределения давления и скорости потоков в ускоряющем промежутке пушки при различных вариантах откачки осевого потока.

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 видно из рис. 7, 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.

Рис.6. Распределение скорости потока газа во второй ступени устройства вывода: *а* – откачка через осевой канал в экстракторе и два периферийных канала диаметром 3 mm; *б* – откачка через осевой канал в экстракторе и шесть периферийных каналов диаметром 3 mm; *в* – откачка через осевой канал в экстракторе и шесть периферийных каналов диаметром 5 mm; *г* – откачка через осевой канал в экстракторе и один периферийный канал диаметром 10 mm

Рис.7. Распределение давления во второй ступени устройства вывода: 1 – откачка через осевой канал в экстракторе; 2 – соответствует рис. 6, *а*; 3 – рис. 6, *б*; 4 – рис. 6, *в*; 5 – рис 6, *г*

В связи с этим были выполнены расчеты течения газа через различное количество дополнительных откачных каналов в лучепроводе. Расчеты показали, что важным является не количество каналов, а общая площадь их поперечных сечений и ориентация. Приемлемый результат получен при использовании каналов, ориентированных в сторону откачного патрубка, с площадью поперечного сечения примерно в 6 раз превосходящей площадь осевого отверстия в ускоряющем электроде.

На рис. 8 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.

Рис.8. 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

Канал транспортировки электронного пучка 1 (лучепровод) входит в состав элементов второй ступени откачки. На выходе лучепровод имеет сужение в виде конуса, меньшее основание которого обращено к первой ступени, переходящее в протяженный цилиндрический канал 3 длиной 10 mm и диаметром 2.5 mm.

В канале транспортировки магнитным полем фокусирующей линзы создаются условия для фокусировки электронного пучка в плоскости выходной диафрагмы 4 первой ступени. Фокусирующая линза имеет скользящую посадку, которая позволяет настраивать коэффициент увеличения, от которого зависит минимальный диаметр электронного пучка в плоскости фокусировки. Вторая ступень откачивается турбомолекулярным насосом, скорость которого составляет 800 l/s по азоту.

Первая ступень имеет выходную диафрагму диаметром 2 mm, через которую электронный пучок выводится непосредственно в область с атмосферным давлением. Ступень откачивается со скоростью 500 l/s через патрубок 2 насосом Рутса, работающим в паре с безмасляным винтовым насосом. В первой ступени

выполнен канал 5 для создания поперечной струи (cross-jet), расположенный 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. 9) [4], 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, послойная.

Характеристики 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 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.

Таблица 1

Характеристики вневакуумной электронно-лучевой системы

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

Рис.9. Внешний вид пушки и устройства вывода, установленных на роботе

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 сварки 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 [5]. Наплавка производилась на подложки из нержавеющей стали в среде гелия. Для вывода электронного пучка в атмосферу использовалась вневакуумная электронно-лучевая система на основе пушки с плазменным эмиттером, представленная на рис. 9. Электронным пучком запускалась реакция самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Затем сканирующим пучком производилась наплавка. В итоге на поверхности подложки

формировался слой карбида титана или (и) хрома толщиной 120–200 μm . Строение слоя TiC на 12X18H10T из реакционной обматки $\text{TiO}_2+2.1\text{C}$ показано на рис. 10.

Рис.10. Строение слоя карбида титана (масштаб 100 μm)

Полученные в результате вневакуумной электронно-лучевой наплавки покрытия обладают высокой микротвердостью (в среднем величина микротвердости составила 12 GPa) и хорошей жаростойкостью до температуры 900 °C включительно.

На рис. 11. представлен образец нанопорошка оксида цинка (ZnO).

Рис.11. Фотография образца нанопорошка ZnO, полученная на просвечивающем электронном микроскопе Philips CM 12

Полученные методом электронно-лучевого испарения в атмосфере образцы нанопорошка ZnO представляют собой порошки с широким распределением частиц как по размеру, так и по морфологии. В образце присутствуют частицы в виде наностержней, нанодисков, частицы неправильной формы, а также

сферические наночастицы. Характерный размер наночастиц по микроскопии составил 82.2 nm по результатам 40 измерений.

На рис. 12. представлены фотографии, иллюстрирующие результат вневакуумной электронно-лучевой сварки алюминиевых и медных выводов аккумуляторных батарей.

Сварное соединение представляет собой две пластины (медные или алюминиевые) толщиной 6 mm, между которыми расположены 80 фольг толщиной в среднем по 15 μm каждая.

Сварка одного такого соединения электронным пучком с энергией 120 keV и мощностью 4 kW для медного вывода и 2 kW для алюминиевого осуществлялась за время порядка 30 секунд. Длина сварного шва порядка 280 mm.

a

б

Рис.12. Фотографии алюминиевого (а) и медного (б) шинных выводов аккумуляторных батарей с пакетным набором электродов, сваренных электронным пучком в атмосфере

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.

Литература

[1] Osipov I.V. A plasma-cathode electron source designed for industrial use / I.V. Osipov, N.G. Rempe // Review of Scientific Instruments. – 2000. – Vol. 71, № 4. – P. 1638–1641.

[2] Simulation of electron beam formation and transport in a gas-filled electron-optical system with a plasma emitter / A.A. Grishkov, S.Yu. Kornilov, N.G. Rempe,

S.V. Shidlovskiy и др. // Plasma Physics Reports. – 2016. – Vol. 42, № 7. – P. 713–717.

[3] Корнилов С.Ю. Система транспортировки электронного пучка в атмосферу для пушки с плазменным эмиттером / С.Ю. Корнилов, Н.Г. Ремпе, С.В. Шидловский // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86, вып. 6. – С. 42–49.

[4] Устройство вывода электронного пучка в атмосферу на основе плазменного эмиттера / А.И. Аксенов, С.Ю. Корнилов, М.П. Моторин, Н.Г. Ремпе // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – № 2. – С. 84–88.

[5] Thermodynamic Modelling of High-temperature Synthesis of the Titan and Chrome Carbides on an Alloyed Steel for Electron-Beam Melting of Modifying Coatings / S. Kornilov, N. Rempe, N. Smirnyagina, V. Khaltanova et al. // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 79. – Article number 01033.