



## О РАСШИРЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ПУШЕК

**В.И. Мельник, И.В. Мельник, Б.А. Тугай, Д.В. Ковальчук**

ПрАТ «НВО «Червона Хвиля».

03680, г. Киев, ул. Боженко, 15. E-mail: dv\_kovalchuk@chervonahvilya.com

Благодаря длительному опыту эксплуатации газоразрядных электронно-лучевых пушек в различных технологических условиях стало возможным исследование особенностей их поведения, определение способов дальнейшего совершенствования их конструкции с целью повышения надежности и расширения областей применения в новых технологических процессах. Для этого в течение последних лет проведены соответствующие теоретические исследования и экспериментальные работы, в результате которых усовершенствована конструкция газоразрядных электронно-лучевых пушек серии ВТР мощностью от 60 до 450 кВт, что позволило добиться еще большей стабильности и надежности их эксплуатации в расширенном диапазоне рабочих условий. Также впервые разработана газоразрядная электронно-лучевая пушка ВТР-600/40 номинальной мощностью 600 кВт. Библиогр. 4, табл. 1, ил. 4.

**Ключевые слова:** электронные пушки; электронно-лучевые технологии; вакуумная металлургия; газоразрядные электронно-лучевые пушки; электронные пушки высоковольтного тлеющего разряда

Газоразрядные электронно-лучевые пушки находят все большее применение в различных отраслях промышленности, главным образом благодаря их способности стабильно работать в тяжелых вакуумных условиях, характерных для ряда технологических процессов. Опыт эксплуатации газоразрядных электронно-лучевых пушек мощностью от 60 до 450 кВт подтвердил не только возможность, но и целесообразность их промышленного применения в таких процессах, как электронно-лучевая плавка титана, ниобия, тантала, молибдена, электронно-лучевого рафинирования кремния, определенных видов сварки, напыления покрытий и др. [1–3].

Газоразрядные электронно-лучевые пушки серии ВТР, разработанные ПрАТ «НВО «Червона Хвиля», представлены на рис. 1.

Современное промышленное оборудование, созданное на базе газоразрядных электронно-лучевых пушек, отличается относительной конструктивной простотой, стабильностью работы, удобством обслуживания, высокой производственной и экономической эффективностью. Некоторые особые рабочие характеристики газоразрядных электронно-лучевых пушек открывают возможности реализации новых технологических режимов и даже процессов.

Опыт эксплуатации газоразрядных электронно-лучевых пушек типа ВТР в реальных промышленных условиях позволил исследовать их

характеристики в различных рабочих условиях и определить пути дальнейшего совершенствования газоразрядных электронно-лучевых пушек с целью повышения их технологической и коммерческой привлекательности.

Основными направлениями исследовательских и конструкторских работ стало улучшение стабильности работы газоразрядных электронно-лучевых пушек в условиях динамического изменения остаточного давления в рабочей камере, повышение общей надежности, увеличение срока службы пушек и их отдельных частей, сокращение простоев оборудования за счет снижения особых требований к регламентному обслуживанию.

С целью дальнейшего улучшения эксплуатационных качеств газоразрядных электронно-лу-



Рис. 1. Газоразрядные электронно-лучевые пушки ВТР-100 (100 кВт), ВТР-300 (300 кВт) и ВТР-450 (450 кВт)



чевых пушек типа ВТР в различных рабочих условиях проведены следующие теоретические и экспериментальные исследования:

анализ работы холодного катода при различных характеристиках высоковольтного тлеющего разряда в широком диапазоне давлений и состава газовой среды;

расчеты и экспериментальная проверка предельных энергетических параметров электродных систем;

оптимизация геометрических характеристик электродной системы и ее электронно-оптических параметров;

разработка системы транспортирования луча от разрядной камеры пушки до рабочей камеры с большим углом схождения.

Как правило, для изготовления холодных катодов газоразрядных электронно-лучевых пушек типа ВТР используются низколегированные сплавы алюминия, преимущественно благодаря относительно высокому коэффициенту ионно-электронной эмиссии (плотность тока более  $0,1 \text{ A/cm}^2$ ) и хорошей теплопроводности. Оптимизация конструкции катодного узла, все части которого находятся под высоким отрицательным напряжением, обеспечила равномерное распределение электрического поля в изолирующем вакуумном промежутке, тем самым существенно уменьшив вероятность возникновения пробоев.

В усовершенствованной конструкции катод крепится непосредственно на нижнем торце высоковольтного изолятора, что исключает потребность в применении уплотняющей прокладки между вакуумным пространством пушки и внутренней полостью катода для водяного охлаждения и вероятность проникновения паров воды в разрядное пространство пушки.

Оптимизация геометрии анодного диска обеспечила намного лучшую стабильность фокусного расстояния электронного луча при различных значениях тока разряда. Это свойство улучшает транспортировку луча через анодное отверстие без существенных потерь энергии и соответственно упрощает охлаждение этого узла.

Необходимые предельные энергетические параметры электродных систем обеспечиваются в результате правильного выбора материалов и геометрии холодного катода и полого анода газоразрядных электронно-лучевых пушек типа ВТР с учетом максимально допустимого выделения энергии в разрядной камере пушки. Требуемая плотность мощности зависит от предельной мощности электродов при их рабочей температуре, а предельная плотность тока — от эмиссионных свойств катода

и количества энергии, которая может быть отведена от катода во время ионной бомбардировки. Оптимизацию основных параметров электронно-лучевых пушек выполнили в зависимости от указанных физических свойств и условий эксплуатации.

Ограничение внутреннего просвета лучевода, поперечное сечение которого соответствует форме проводимого луча, обеспечивает разницу давлений разрядной камеры пушки и рабочей камеры установки (до двух порядков) при условии достаточной мощности откачной системы. Это позволяет откачивать внутреннее пространство газоразрядной электронно-лучевой пушки вместе с рабочей камерой общей вакуумной системой электронно-лучевой установки и расширять диапазоны рабочего вакуума во время технологического процесса.

Транспортировка электронного луча от разрядной камеры пушки до рабочей камеры установки через лучевод с ограниченным просветом обеспечивается в случае надлежащего размещения двух фокусных линз.

Для сканирования электронного луча на выходе из лучевода применяется отклоняющая система, состоящая из определенного количества тороидальных линз, монтируемых на кольцевом магните. Лучевод прикрепляется к базовому фланцу пушки, при помощи которого последняя устанавливается на рабочей камере установки.

В результате проведенных работ достигнуты существенные улучшения основных эксплуатационных показателей газоразрядных электронно-лучевых пушек типа ВТР, а также продемонстрирована возможность работы таких пушек в более широком диапазоне рабочих параметров и их применения в новых перспективных технологиях.

Например, исследованы характеристики электронного луча, генерируемого в газоразрядных электронно-лучевых пушках типа ВТР при различных значениях ускоряющего напряжения в диапазоне от 10 до 40 кВ, установлены параметры его воздействия на обрабатываемый материал (мишень).

Как правило, газоразрядные электронно-лучевые пушки типа ВТР мощностью от десятков до сотен киловатт функционируют при ускоряющем напряжении в пределах 25...30 кВ, которое в целом удовлетворяет требованиям условий эксплуатации пушек в составе различного технологического оборудования. К тому же такой уровень напряжения упрощает защиту персонала от навязанного жесткого излучения.

Пример использования газоразрядной электронно-лучевой пушки ВТР-300, работающей при

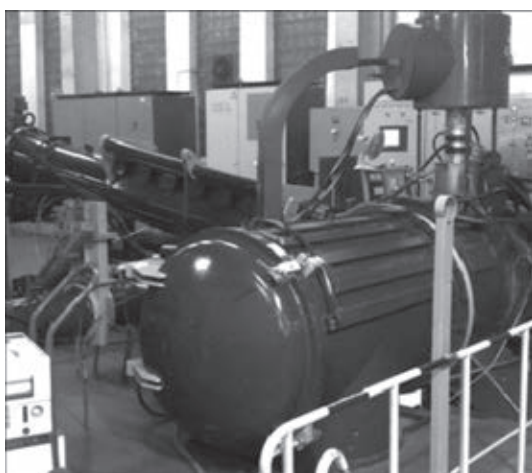


Рис. 2. Газоразрядная электронно-лучевая пушка ВТР-300 в составе печи ЭЛП

номинальном ускоряющем напряжении 30 кВ в составе электронно-лучевой плавильной печи, представлен на рис. 2.

Анализ работы пушек в определенных технологических процессах показал, что иногда варьируя значениями ускоряющего напряжения, можно обеспечить более гибкие и/или подходящие условия для нагрева обрабатываемой мишени.

Для использования газоразрядных электронно-лучевых пушек в составе крупных промышленных электронно-лучевых плавильных печей требуется повышенное ускоряющее напряжение, поскольку в этом случае создаются лучшие условия для транспортировки электронного луча на большее расстояние в плохом вакууме, например, в случае технологических процессов, сопровождаемых интенсивным газовыделением и/или испарением. В этом случае повышенное ускоряющее напряжение обеспечивает большую удельную



Рис. 3. Газоразрядная электронно-лучевая пушка ВТР-600/40 мощностью, что способствует большей эффективности использования энергии нагрева.

Разработана новая газоразрядная электронно-лучевая пушка ВТР-600/40 мощностью 600 кВт с ускоряющим напряжением 40 кВ. Увеличение ускоряющего напряжения до 40 кВ обеспечило повышение коэффициента ионно-электронной эмиссии холодного катода, что позволило снизить энергетические потери на электродах и улучшить энергетические и геометрические параметры электронного луча. Однако возрастание ускоряющего напряжения может вызывать более интенсивное образование дуг между катодом и анодом и снижение стабильности работы пушки. С целью уменьшения влияния этих факторов на стабильность работы пушки и всей установки разработана специальная конструкция катодного

Мощность, кВт	Ускоряющее напряжение, кВ	Ток луча, А	Диаметр луча на мишени, мм	Диапазон рабочих давлений в рабочей камере, Па	Рабочие газы	Технологии применения
1...10	10...40	0,1...1,0	0,5...4,0	$10...10^{-2}$	Воздух Кислород Аргон Гелий	Сварка тонкостенных деталей, пайка, поверхностная термообработка, аддитивное производство
30...100	25...30	1...4	5...8	$10...10^{-3}$	Водород Кислород	Сварка прессованных материалов, напыление покрытий, выращивание монокристаллов
100...450	30	3,3...15,0	8...20	$5...10^{-2}$	Водород с добавками кислорода	Плавка и рафинирование тугоплавких и активных металлов и сплавов
600	40	15	15...20	$5...10^{-2}$	То же	То же

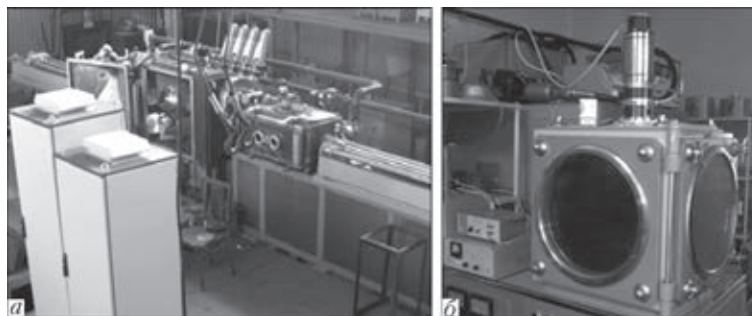


Рис. 4. Газоразрядные электронно-лучевые пушки ВТР-100 в составе установки напыления (а) и ВТР-30 в составе лабораторной установки (б)

узла. Кроме того, конструкция лучевода пушки ВТР-600/40 обеспечивает больший предельный угол отклонения электронного луча от оси (не менее  $30^\circ$ ) и большую частоту сканирования, чем применяемые ранее стандартные газоразрядные электронно-лучевые пушки большой мощности. Указанные характеристики обеспечивают существенное повышение КПД пушек, а также технологических установок, позволяют проектировать высокопроизводительные установки с меньшим количеством пушек, что упрощает обслуживание и сокращает эксплуатационные затраты.

Газоразрядная электронно-лучевая пушка ВТР-600/40 представлена на рис. 3.

Существует ряд более тонких металлургических процессов, требующих очень мягкого или плавного нагрева мишеней, например, тонких деталей или малых зон обработки. Это может быть сварка тонкостенных элементов, пайка, поверхностная обработка, аддитивное производство и т.п. В таких случаях ускоряющее напряжение (10...20 кВ) обеспечивает высокую эффективность работы газоразрядной электронно-лучевой пушки, при этом комплектное оборудование становится более простым, дешевым и безопасным.

Разработан широкий ряд газоразрядных электронно-лучевых пушек различной конструкции и

мощности [4]. Основные технические характеристики доступных газоразрядных электронно-лучевых пушек различного назначения представлены в таблице.

Примеры использования газоразрядных электронно-лучевых пушек серии ВТР в составе различных электронно-лучевых установок представлены на рис. 4.

В настоящее время можно утверждать, что газоразрядные электронно-лучевые пушки стали надежным инструментом промышленного производства с растущими перспективами освоения новых технологий и процессов.

1. *Электронно-лучевая плавка губчатого титана с использованием пушек высоковольтного тлеющего разряда* / А.Л. Тихоновский, Н.К. Лашук, А.А. Тур и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1993. — № 10. — С. 66–70.
2. *Denbnovetskiy S.V., Melnyk V.I., Melnyk I.V. High-Voltage Glow-Discharge Electron Sources and Possibilities of Its Application in Industry for Realizing of Different Technological Operations* // IEEE transactions on plasma science. — 2003. — 31, № 5. — P. 987–993.
3. *Pat. US 2007/0077191 A1 США. Method and apparatus for refining silicon using an electron beam* / Norichika Yamauchi, Takehiko Shimada, Minoru Mori. — Publ. 05.04.2007.
4. *Технологические возможности электронных пушек высоковольтного тлеющего разряда* / С.В. Денбновецкий, В.И. Мельник, И.В. Мельник, Б.А. Тугай // Электротехника и электроника. — 2009. — № 5–6. — С. 189–192.

Long-term experience of gas-discharge electron beam gun operation under different process conditions enabled studying the peculiarities of their behaviour, determining the methods for further improvement of their design to increase their reliability and expand their application in new technological processes. For this purpose appropriate theoretical investigations and experimental studies have been performed over the recent years, which resulted in improvement of design of gas-discharge electron beam guns of BTP series of 60 to 450 kW power, that allowed guaranteeing even higher stability and reliability of their operation in a broader range of operating conditions. Gas-discharge electron beam gun BTP-600/40 of 600 kW nominal power was also developed for the first time. 4 References, 1 Table, 4 Figures.

**Key words:** *electron guns; electron beam technologies; vacuum metallurgy; gas-discharge electron beam guns; high-voltage glowing discharge electron guns*

Поступила 02.02.2015