



ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПУШЕК С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

В. И. ВАСИЛЬКОВ, А. А. КИСЛИЦКИЙ, Н. В. ОНУЧИН, Р. Д. ПЧЕЛКИН, В. В. РОЖКОВ, А. В. УШАКОВ, А. В. СТРУКОВ, инженеры (ОАО «Новосибир. 3-д химконцентратов», РФ),
Н. Г. РЕМПЕ, И. В. ОСИПОВ, кандидаты физ.-мат. наук (Том. ун-т систем управления и радиоэлектроники, РФ)

Приведены данные об использовании в поточном производстве электронно-лучевых пушек с плазменным катодом для сварки сплавов циркония или алюминия. Рассмотрены конструктивные особенности плазменных источников электронов и их преимущества. Многолетний опыт работы по герметизации твэлов атомных станций способом электронно-лучевой сварки показывает перспективность применения для этих целей электронных пушек с плазменным катодом, простых в обслуживании и надежно работающих в сложных вакуумных условиях.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, пушка с плазменным катодом, тепловыделяющий элемент

В тепловыделяющих элементах (твэлах) атомных станций ядерное топливо помещается в герметичную тонкостенную металлическую оболочку, герметичность которой является основным показателем работоспособности твэла при его эксплуатации в реакторе. Целостность оболочки твэла должна сохраняться в течение всего срока работы, который в зависимости от типа и условий работы твэла может достигать нескольких лет.

Оболочки твэлов в основном изготавливают из сплавов циркония или алюминия, а их герметичность обеспечивают способом сварки. Цирконий и его сплавы при повышенных температурах проявляют высокую активность по отношению к кислороду, азоту, водороду. В связи с этим при герметизации твэла важно обеспечить хорошую защиту зоны сварки посредством сварки циркония в вакууме при давлении не выше $1 \cdot 10^{-3}$ Па. Сварку сплавов алюминия можно выполнять при более высоком давлении остаточного газа в вакуумной камере, определяемом в основном требованиями существующей технологии изготовления изделий и возможностями оборудования для электронно-лучевой сварки.

Сварной шов оболочки твэла, как правило, имеет относительно небольшую длину. Однако из-за значительных объемов их производства суммарная длина сварных швов, выполняемых в течение года, может составлять несколько десятков километров. Выпуск большого объема однотипных изделий достигается лишь в условиях автоматизированного поточного производства, к оборудованию которого предъявляются повышенные требования относительно надежности и стабильности работы. Сварочные линии, как правило, включают специализированные установки с непрерывной подачей изделий в зону сварки и использованием шлюзовых камер и устройств. Высокий уровень производи-

тельности и ритмичности работы таких линий допускает остановку отдельного оборудования лишь на короткое время. Ремонт, наладка, замена отдельных узлов сварочного оборудования влекут за собой дополнительные простои из-за необходимости поддержания работоспособности установки и обеспечения соответствия качества сварных соединений установленным требованиям (путем сварки образцов-свидетелей и последующего их контроля).

Электронные пушки с термокатодными узлами, некоторое время использовавшиеся в сварочных установках для герметизации твэлов, по ряду причин не могли в полной мере удовлетворить требования поточного производства. В связи с этим нашли применение электронные пушки с плазменным катодом [1–3].

В последнее время на основе имеющегося опыта эксплуатации на ОАО «Новосибирском заводе химконцентратов» (НЗХК) проведены работы по созданию новой конструкции разрядной камеры

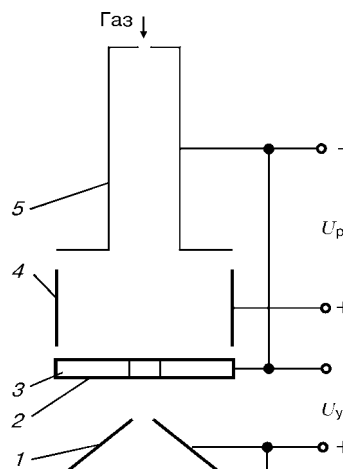


Рис. 1. Электродная система разрядной камеры: 1 — ускоряющий электрод; 2 — эмиссионный канал; 3 — эмиттерный катод; 4 — анод; 5 — полный катод

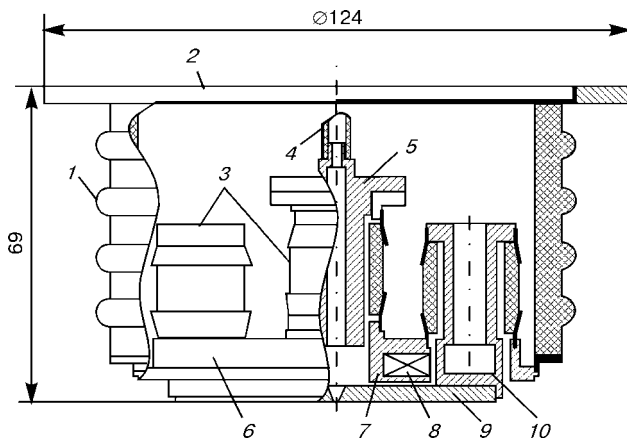


Рис. 2. Конструкция разрядной камеры. Обозначения поз. 1–10 см. в тексте

пушки с плазменным катодом. Разработана простая и надежная конструкция пушки мощностью до 5 кВт. В ее конструкции использованы металло-керамические узлы, герметичность и механическая прочность которых обеспечена электронно-лучевой сваркой.

Электронная пушка с плазменным катодом содержит газоразрядное устройство, в котором генерируется плазма и созданы условия для выхода электронов в вакуум или атмосферу низкого давления [1]. Для генерации плазмы использован низковольтный отражательный разряд с полым катодом [4]. Этот разряд возбуждается в электродной системе, содержащей три «холодных» электрода: полый катод (рис. 1), анод и дополнительный электрод, в большинстве случаев имеющий потенциал полого катода. Полый катод и анод имеют цилиндрическую форму, дополнительный катод, размещаемый напротив полого катода, — плоскую. В разрядной камере создается аксиальное магнитное поле. Разряд существует при давлении газа в разрядной камере около 1...5 Па и напряжении 350...450 В. В дополнительном электроде (эмиттерном катоде) выполняется эмиссионный канал, через который происходит отбор электронов. Эмиссионный канал располагается на оси разрядной камеры в области максимальной концентрации плазмы. Высокая концентрация плазмы позволяет получать необходимый ток электронной пушки при малых размерах эмиссионного канала, диаметр которого не превышает 1,8 мм.

Для осуществления эмиссии и ускорения электронов между эмиттерным катодом и ускоряющим электродом прикладывается напряжение до 50 кВ. Выходящие из плазмы электроны формируются в пучок и фокусируются магнитным полем фокусирующей системы.

Конструкция разрядной камеры представлена на рис. 2. Основой разрядной камеры и пушки в целом является сварной металлокерамический узел, состоящий из высоковольтного керамического изолятора 1 и приваренных к его манжетам кольца 2 и анодного блока 6. Последний содержит опорные металлокерамические изоляторы 3, приваренные к аноду разрядной камеры 7. На центральном опорном изоляторе устанавливается съемный по-

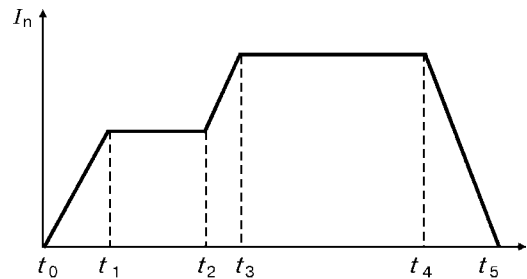


Рис. 3. Закон изменения тока сварки

лый катод 5. Остальные изоляторы предназначены для крепления съемного радиатора охлаждения 10 катода с эмиссионным отверстием и электрической изоляцией катода.

Съемный эмиттерный катод 9 содержит канал для выхода электронов из разрядной камеры в вакуум. Он устанавливается на радиатор, кольцевой объем которого соединяется с объемом источника, заполненным маслом.

В анодном блоке размещен съемный магнит 8, создающий в разрядной камере магнитное поле с индукцией примерно 0,01 Тл. Разрядная камера с высоковольтным изолятором устанавливается в корпусе пушки. В ограниченный корпусом и высоковольтным изолятором объем заливается трансформаторное масло. Для дополнительного охлаждения электродов разрядной камеры в масло погружен радиатор, представляющий собой медную трубку, через которую прокачивается проточная вода.

В пушке имеется система дозированного напуска газа. Рабочий газ через натекатель, регулирующийся напуск, поступает в разрядную камеру по диэлектрической трубке 4 через канал в полым катоде.

На ОАО НЗХК электронные пушки с плазменным катодом эксплуатируются в составе модернизированных энергокомплексов типа У-250, ЭЛА-50/5, ЭЛА-15. Для совмещения электронной пушки с аппаратурой, разработанной под термокатодную пушку, проведена ее модернизация. Вместо блока накала и смещения в аппаратуру введен блок питания разряда, дополнительно разработан и согласован с аппаратурой специальный программатор сварочного цикла, предназначенный для автоматического запуска электронной пушки от внешнего сигнала, изменения тока пучка по заданному закону и управления режимами фокусировки и развертки электронного пучка.

Типичный закон изменения тока пучка, задаваемый программатором, показан на рис. 3. Цикл сварки разбит на пять последовательно выполняемых этапов: ввод тока пучка $t_0 - t_1$, прогрев образца $t_1 - t_2$, ввод тока до заданной режимом сварки амплитуды $t_2 - t_3$, сварка $t_3 - t_4$, вывод тока $t_4 - t_5$. Длительность каждого этапа может регулироваться по времени от 0,1 до 10,0 с с дискретностью 0,1 с. Амплитудные значения токов на участках прогрева и сварки устанавливаются с дискретностью 1 мА. После завершения цикла сварки выдается команда на поворот манипулятора и осуществляется сварка следующего образца. На отдельных этапах цикла сварки программатор может



выдавать команды на переключение тока фокусировки, изменение формы, радиуса и частоты развертки электронного луча.

Ресурс работы пушки ограничивается эрозией электродов в разряде, приводящей к изменению их геометрических размеров и запылению разрядной камеры катодным материалом. Существенную роль может играть также разрушение узкого эмиссионного канала быстрыми ионами из ускоряющего промежутка и частицами из разряда. Однако эрозийные процессы идут относительно медленно, а напыление периодически удаляется посредством чистки электродов во время планово-предупредительных ремонтов установок, что обеспечивает работоспособность пушки в течение длительного времени. Для восстановления работоспособности пушки достаточно заменить изношенные детали, которые представляют собой тела вращения и могут быть изготовлены на универсальном токарном оборудовании. В качестве материала электродов, как правило, используются обычные широко применяемые стали. В то же время ресурс работы пушки увеличивается примерно в 1,5 раза, если в конструкции электродов применять материалы, стойкие к ионной бомбардировке. В итоге после оптимизации конструкции разрядной камеры и применения легкого плазмообразующего газа (гелий) ресурс электродов пушки доведен до 16 тыс. сварок для твэлов с оболочками из сплава циркония и до 80 тыс. сварок для твэлов из алюминиевых сплавов. Это дает возможность эффективно осуществлять системный предупредительный ремонт,

включающий периодическое проведение в межремонтном цикле профилактических осмотров и удаление из разрядной камеры продуктов эрозии.

Таким образом, опыт эксплуатации пушек с плазменным катодом в условиях поточных автоматизированных линий сварки показал их следующие основные преимущества:

отсутствие нагрева до высоких температур деталей;

низкую критичность к уровню вакуума и его колебаниям;

высокие надежность и ресурс работы, в том числе в условиях интенсивного испарения из сварочной ванны;

оперативность и простота обслуживания.

Эти достоинства определяют перспективность использования пушек с плазменным катодом в поточном производстве твэлов атомных электростанций.

1. *Плазменные процессы в технологических электронных пушках* / М. А. Завьялов, Ю. Е. Крейнфельд, А. А. Новиков, Л. П. Шантурин. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 256 с.
2. *Электроннолучевая сварочная пушка с плазменным катодом* / В. Г. Мартюшев, И. В. Осипов, Н. Г. Ремпе и др. // Автомат. сварка. — 1992. — № 11/12. — С. 52–53.
3. *Волков А. А., Пичелкин К. Д., Ремпе Н. Г.* Оптимизация параметров источников электронов на основе плазменных эмиттеров в режиме многократных проплавлений металлов // Свароч. пр-во. — 2001. — № 1. — С. 23–28.
4. *Источники электронов с плазменным эмиттером на основе отражательного разряда с полым катодом* / В. Л. Галанский, В. А. Груздев, И. В. Осипов, Н. Г. Ремпе // Изв. вузов. Физика. — 1992. — № 5. — С. 28–33.

Data are given on commercial application of electron beam guns with plasma cathode for welding zirconium and aluminium alloys. Design peculiarities of plasma electron sources and their advantages are considered. Many-year experience accumulated in the field of sealing of fuel cells of nuclear power stations by electron beam welding shows a promising future of the electron guns with plasma cathodes, being simple in maintenance and reliable in operation under complicated vacuum conditions.

Поступила в редакцию 16.07.2001,
в окончательном варианте 27.08.2001