

## 50 ЛЕТ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ В ИЭС им. Е. О. ПАТОНА

Чл.-кор. НАН Украины **О. К. НАЗАРЕНКО** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описан 50-летний опыт работ Института электросварки им. Е. О. Патона по созданию технологий электронно-лучевой сварки материалов и изделий с толщиной кромок до 200 мм, совершенствованию энергетических блоков и изготовлению серии промышленных установок с программным обеспечением.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, технологические разработки, энергетические блоки, промышленные установки, программное обеспечение

Изучение принципов построения оборудования и возможностей электронно-лучевой сварки (ЭЛС) началось в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины еще в 1958 г. по инициативе и при непосредственном участии академика Б. Е. Патона. Тогда же была создана первая лабораторная установка с вакуумной камерой небольших размеров, оснащенная диодной пушкой с прямонакальным катодом, и выполнена сварка различных небольших изделий. Уже через год результаты работ ИЭС им. Е. О. Патона оказались востребованными промышленностью и в первую очередь при производстве жидкостных реактивных двигателей. Возникла необходимость создания вакуумных камер, транспортировка которых к месту их эксплуатации была затруднена из-за их больших габаритов. В то же время потребители имели возможность изготовить вакуумную камеру собственными силами. Для этого требовалось лишь оснастить изготовленную камеру энергетическим блоком ЭЛС — сварочной пушкой, высоковольтным источником питания и системой управления. ИЭС им. Е. О. Патона в 1970-х годах на базе специализированного предприятия — Сумского завода электронных микроскопов и электроавтоматики (СЭЛМИ) — было организовано серийное производство разработанных институтом энергетических блоков для ЭЛС металлов преимущественно средней и большой толщины. На основании исходной технической документации ИЭС им. Е. О. Патона объединение СЭЛМИ разработало производственную документацию и изготовило в разное время 72 комплекта энергетических блоков СП-30 (25 кВ, 500 мА), 330 комплектов У-250А (30 кВ, 450 мА), 320 комплектов ЭЛА-60 (60 кВ, 250, 500 и 100 мА) и ЭЛА-120 (120 кВ, 100 мА).

ИЭС им. Е. О. Патона сохранил и развил свои научные и производственные возможности в области ЭЛС после распада Советского Союза и

привлек зарубежные заказы на изготовление промышленного оборудования «под ключ». Сейчас можно выделить четыре основных направления в деятельности отдела и инженерного центра ЭЛС ИЭС им. Е. О. Патона:

- разработка технологии и технологических приемов ЭЛС материалов и изделий с толщиной свариваемых кромок до 200 мм;
- совершенствование энергетических блоков;
- проектирование и изготовление в кооперации с партнерами промышленных установок для ЭЛС;
- разработка программного обеспечения установок для ЭЛС.

Рассмотрим наиболее значимые результаты работ по указанным направлениям за последние десять лет.

**Технологические разработки.** Ввиду все расширяющегося применения толстостенных конструкций из трудносвариваемых алюминиевых сплавов 7000-й серии выполнен цикл исследований свариваемости этих сплавов толщиной до 150 мм. Установлено, что в этом случае основным дефектом сварных соединений является сетка мелких горячих трещин в околошовной зоне. Для предотвращения появления этих трещин необходимо добиваться получения мелкозернистой структуры основного металла хотя бы в зоне термического влияния, например, за счет обработки свариваемых кромок на глубину 8...10 мм с помощью сварки трением с перемешиванием. Весьма эффективно также уменьшение ширины литой зоны и повышение стабильности формы шва, что обеспечивается за счет сварки наклонным пучком и его осцилляции. Высокая стабильность поддержания ускоряющего напряжения и подавление электрических пробоев позволили обеспечить бездефектное формирование шва на участке перекрытия кольцевого шва.

Применительно к изготовлению конструкций из алюминий-магниевого сплава отработана техника и технология ЭЛС металла толщиной 200 мм, которая успешно освоена двумя фирмами Южной Кореи.



Весьма эффективной оказалась разработанная технология одновременной ЭЛС трехпродольных швов на буровых долотах с использованием трех сварочных пушек. Эта технология позволяет существенно снизить остаточные сварочные деформации корпуса бурового долота и повысить производительность сварочного процесса, что подтверждено результатами промышленной эксплуатацией изготовленных нами установок в США и России.

Разработана техника и технология ЭЛС, а также косметического заглаживания корневой части швов в труднодоступных местах с поворотной (90°) электромагнитной системой. Эта технология представляется особенно эффективной, в частности, при изготовлении высокочастотных ниобиевых резонаторов и авиационных пилонов.

**Энергетические блоки.** До недавнего времени ИЭС им. Е. О. Патона использовал в своих сварочных электронных пушках катоды из гексаборида лантана  $\text{LaB}_6$ , относящиеся к классу высокоэффективных термокатодов с низким уровнем работы выхода электронов и соответственно низкими рабочими температурами (1800...1900 °С) и энергопотреблением.

Пока объемы применения ЭЛС при изготовлении изделий из титановых и жаропрочных никелевых сплавов были относительно небольшими, на производстве «мирились» со спадом эмиссионной способности гексаборидных катодов вследствие металлизации их эмитирующей поверхности парами тугоплавких составляющих свариваемых металлов.

Однако в последнее время проблема замены катодов из гексаборида лантана катодами с рабочей температурой не менее 2800 °С стала актуальной. Основная трудность применения высокотемпературных катодов состоит в обеспечении надежного закрепления катода в его держателе с минимальным отводом тепла. Использование штырей, которые введены в боковые отверстия массивных шайбовых катодов плавильных пушек, не могло быть реализовано для катодов диаметром несколько миллиметров, а приварка задней торцевой поверхности катода к держателю в виде шайбы (конструкция фирмы «Техмета») требовала значительной (до 300 В) мощности для нагрева катода.

Благодаря применению лазерной технологии нам удалось создать конструкцию крепления вольфрамового катода, при которой необходима значительно меньшая мощность нагрева. Так, для нагрева катода диаметром 3 мм, обеспечивающего формирование пучка с током до 500 мА, требуется мощность около 70 Вт, а при диаметре катода 4,2 мм, обеспечивающего формирование пучка с током до 1000 мА, — около 100 Вт. Такие катоды уже используются в нескольких промышленных установках.

На протяжении 40 лет в качестве линейного проходного элемента ИЭС им. Е. О. Патона применял в своих электронно-лучевых источниках питания электронную лампу. Это решение остается эффективным до настоящего времени и для источников питания мощностью 30...120 кВт. Источники питания мощностью до 18 кВт в последнее время создаются нами на базе высокочастотных резонансных генераторов, использующих мощные биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT-транзисторы). Благодаря малой (до 1...2 Дж/кВт) запасающей энергии существенно затруднен переход искровых разрядов в ускоряющем промежутке в дуговые, что предотвращает срабатывание токовой защиты источника питания. Удельная объемная мощность (отношение общей мощности источника питания к единице его объема) превышает аналогичный показатель традиционных источников в 5...10 раз. К сожалению, мягкость внешней характеристики высокочастотных резонансных источников питания в зависимости от нагрузки не позволяет применять их в режиме импульсной модуляции тока пучка.

Необходимость в автономных энергетических блоках для ЭЛС с целью замены устаревших или изношенных энергоблоков, а также для комплектации самостоятельно изготовленных заказчиками вакуумных камер возникает достаточно часто. Стойки управления источника питания, где располагаются промышленный компьютер и система «РАСТР», для визуализации зоны сварки с помощью вторичных электронов выполняются либо как стойка прямого управления (оператор непосредственно с этой стойки создает и редактирует программы сварки), либо с удаленным управлением (задание и редактирование программ сварки осуществляется с пульта CNC установки для ЭЛС).

За последние десять лет нами введены в промышленную эксплуатацию 19 энергетических блоков мощностью от 1,2 до 60 кВт при ускоряющем напряжении 60 кВ и от 6 до 120 кВ при ускоряющем напряжении 120 кВ.

**Промышленные установки.** Отличительной особенностью разработанных ИЭС им. Е. О. Патона установок для ЭЛС крупногабаритных изделий, безусловно, является применение внутрикамерных электронных пушек, которые можно перемещать на расстояние до 12 м, что позволяет максимально повысить коэффициент использования внутреннего объема вакуумной камеры.

Благодаря наличию производственного помещения площадью 2000 м<sup>2</sup>, оснащенного порталным краном грузоподъемностью 30 т, у нас есть возможность осуществлять сборку и отладку установок для ЭЛС с объемом вакуумных камер до 100 м<sup>3</sup>. Если габариты или масса вневакуумной камеры выходят за допустимые для транспортировки пределы, то вакуумную камеру разделяют



на несколько частей. Камеры изготавливают в виде двух вакуумноплотных, сравнительно тонкостенных оболочек (толщина каждой 8...12 мм), соединенных между собой ребрами жесткости — шпангоутами. По такому же принципу выполнены и двери камеры. Применение такой коробчатой конструкции стенок и дверей вместо обычной тавровой позволяет получить в 2 раза больший момент инерции и, как следствие, меньший прогиб стенки при откачке камеры.

В течение 1998–2008 гг. нами введены в промышленную эксплуатацию 27 комплектных установок для ЭЛС.

**Программное обеспечение.** Основным достижением в области программного управления процессом ЭЛС можно считать развитие так называемого визуального метода проектирования программ ЭЛС сложных конструкций.

Для управления электронно-лучевыми установками, как правило, используют распределенные компьютерные системы, которые включают связанные между собой интерфейсными шинами, но отдельно функционирующие устройства типа CNC и PLC. Обычно программы записываются в CNC в G-кодах и представляют собой последовательность блоков. В них для каждого отрезка пути задаются координаты точки, в которую необходимо переместиться, способ и параметры интерполяции при выполнении данного перемещения, значения тока сварки, фокусировки, технологической развертки и отклонения, а также скорость перемещения на данном отрезке.

В случае одновременного использования нескольких координат, когда итоговая траектория представляет собой сложную пространственную кривую, длительность подготовки программы может составлять в зависимости от сложности тра-

ектории от нескольких часов до нескольких дней или даже недель.

Поэтому, сохраняя мировую ориентацию систем, ИЭС им. Е. О. Патона совместно с Институтом проблем математических машин и систем НАН Украины были разработаны встраиваемые в CNC-системы инструментальные программные средства, которые позволяют оператору пользоваться так называемым визуальным методом проектирования программ ЭЛС сложных конструкций. Дополнительно к традиционно применяемому вычислительному комплексу, объединяющему в своем составе CNC и PLC, введены более высокий уровень интерфейса оператора для визуального проектирования рабочих программ и контроля процесса сварки, а также дополнительный компьютер, который независимо от других процессорных узлов решает задачи распознавания стыка по получаемому от аппаратуры наблюдения «РАСТР» изображению поверхности изделия и совместно с главным компьютером обеспечивает выполнение функций автоматического обучения, корректировки и слежения за стыком. Спроектированная визуально программа ЭЛС при запуске на выполнение автоматически (без участия оператора) конвертируется в последовательность G-кодов, исполняемую CNC. В 2006 г. результаты этой работы отмечены Государственной премией Украины в области науки и техники.

Отдел и инженерный центр ЭЛС поддерживают постоянные контакты с промышленными предприятиями и фирмами в Украине и за рубежом, участвуют в работе международных сварочных выставок, предоставляют консультации и аргументированные заключения, проводят обучение и стажировку специалистов, поддерживают свой сайт в Интернете.

The 50-years experience of the E. O. Paton Electric Welding Institute in development of the technologies for EBW of materials and parts with an edge thickness of up to 200 mm, upgrading of power units and manufacture of a series of commercial software-based machines is described.

Поступила в редакцию 28.01.2009