



СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

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

Рассмотрены основные результаты работ Института электросварки им. Е. О. Патона по созданию оборудования для электронно-лучевой сварки за последние 15 лет. Приведены технические характеристики созданной гаммы энергетических блоков (пушка–источник питания–система управления), а также некоторых установок для электронно-лучевой сварки.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, электронная пушка, источник ускоряющего напряжения, установка, компьютерное управление

С начала 1990-х годов на постсоветском пространстве прекратился серийный выпуск оборудования для электронно-лучевой сварки заводом «Электромеханика» (г. Ржев), заводом научно-исследовательского института «Исток» (г. Калининград), Сумским заводом электронных микроскопов и электроавтоматики. Распались многие творческие коллективы, основные усилия которых были направлены на создание и совершенствование оборудования, разработку и промышленное освоение технологии электронно-лучевой сварки. Лишь ИЭС им. Е. О. Патона и НИКИМТ, головной организации РФ по сварке в атомной энергетике и промышленности [1], удалось не только сохранить, но и развить научно-производственные возможности, а также привлечь заказы от российских предприятий и из дальнего зарубежья.

ИЭС им. Е. О. Патона в последние 15 лет наряду с различными технологическими исследованиями разработал и изготовил промышленное оборудование нового поколения. Речь идет о новых энергетических блоках в составе сварочная пушка–источник питания высоковольтных и низковольтных цепей–система управления параметрами пучка электронов и установках для электронно-лучевой сварки.

Совершенствование сварочных электронных пушек и источников питания. Сварочные пушки ИЭС им. Е. О. Патона предназначены для работы с двумя уровнями ускоряющих напряжений — 60 и 120 кВ. Особенностью их конструкции является возможность использования пушки как снаружи, так и внутри вакуумной камеры (рис. 1).

Эмиссионная система пушки отсекается от пролетного канала затвором и откачивается автономным турбомолекулярным насосом, выхлоп которого осуществляется в объем вакуумной ка-

меры через систему затворов. Благодаря этому вакуум в области эмиссионной системы практически не ухудшается в процессе сварки, что способствует предотвращению разрядов в пушке. Внутри камеры пушка перемещается по трем линейным и двум угловым координатам, что обуславливает необходимость достаточно протяженных (до 40 м) кабельных и водяных коммуникаций, уложенных в гибкие каналы — кабелеукладчики.

Электрический пробой вакуумной изоляции в пушке приводит к драматическим последствиям в случае высокой стоимости свариваемого изделия и невозможности ремонта сварного шва после нарушения его формирования. Рациональное построение электронно-оптической системы и конструкции сварочной электронной пушки повысило электрическую прочность вакуумной изоляции ускоряющего промежутка. Применение массивных дисковых катодов, нагреваемых электронной бомбардировкой, позволило избежать присущих прямокальным катодам нарушений геометрии эмитирующей поверхности, связанных с ними пробоев и блуждания пятна по поверхности из-

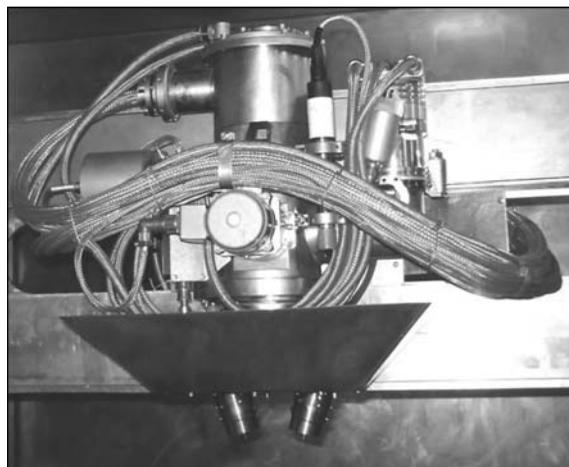


Рис. 1. Общий вид внутрикамерной сварочной электронной пушки с ускоряющим напряжением 60 кВ и мощностью пучка 60 кВт

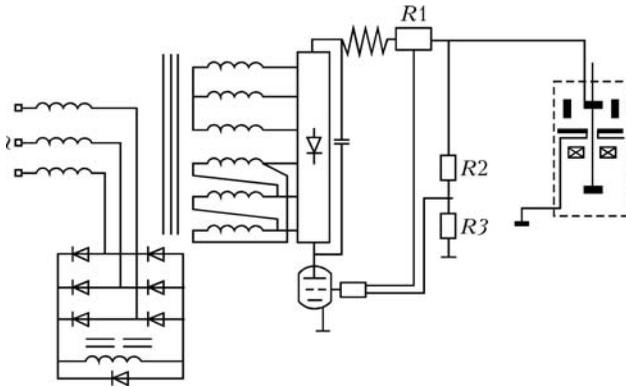


Рис. 2. Упрощенная блок-схема пушки и источника ускоряющего напряжения ЭЛА-60, снабженного проходной лампой ПП-2 (емкость фильтра $15 \cdot 10^{-9}$ Ф)

деля. Однако возможность появления пробоя при этом остается, а поэтому важно дальнейшее совершенствование источников ускоряющего напряжения.

Электронная лампа, включенная как линейный проходной элемент (рис. 2), уже на начальной стадии аномального нестационарного процесса «перехватывает» на себя ускоряющее напряжение [2]. В течение нескольких миллисекунд полностью восстанавливается электрическая прочность эмиссионной системы и ускоряющее напряжение на пушке.

Отключения источника питания электрической защитой не происходит даже при имитации вакуумного пробоя коротким замыканием на землю высоковольтного вывода (рис. 3).

Разряд сглаживающего фильтра эффективно прерывается проходной лампой и высвобождаемая при пробое энергия соизмерима с таковой в случаях применения высокочастотных источников питания одинаковой мощности [3]. Высокая стабильность поддержания ускоряющего напряжения и возможность предотвращения электрических пробоев позволяют обеспечить бездефектное формирование шва на наиболее критическом участке перекрытия кольцевого шва, выполненного на стальных толстостенных конструкциях (рис. 4).



Рис. 3. Проверка функционирования системы автоматического повторного включения источника питания путем его нагружения заземленной штангой

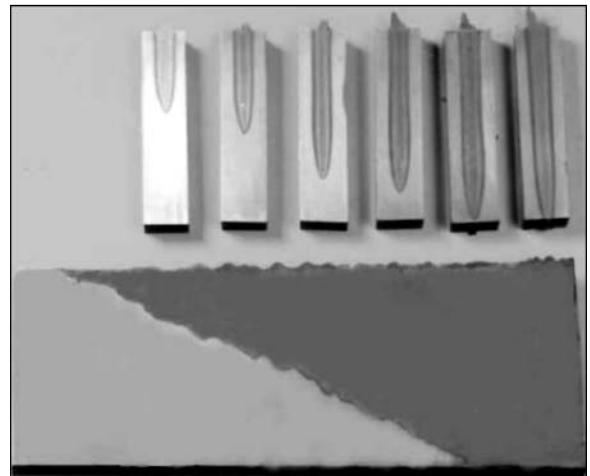


Рис. 4. Макрошлифы поперечных (вверху) и продольных (внизу) сечений литой зоны, полученной при замыкании кольцевого шва на теплоустойчивой стали толщиной 130 мм [4]

Высокочастотные источники питания выгодно отличаются от традиционных, работающих на промышленной частоте 50 Гц, со своими значительно меньшими габаритами, широким диапазо-

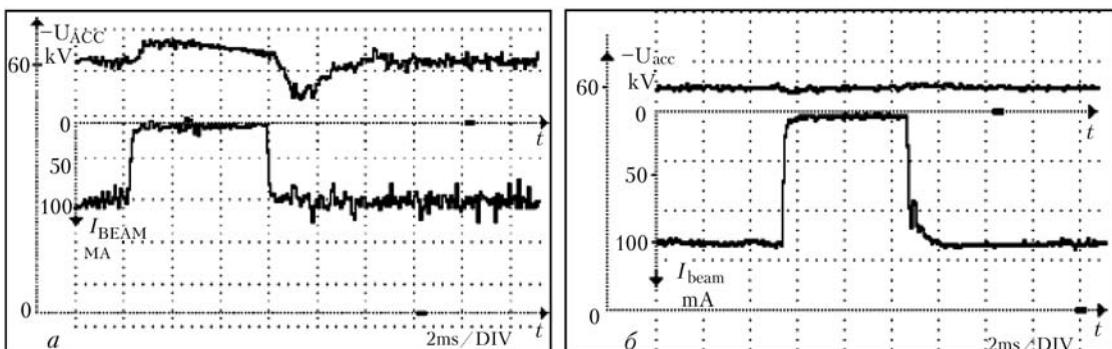


Рис. 5. Зависимость ускоряющего напряжения от импульсного изменения тока пучка в высокочастотном резонансном источнике питания (а) и источнике питания с проходной лампой (б)

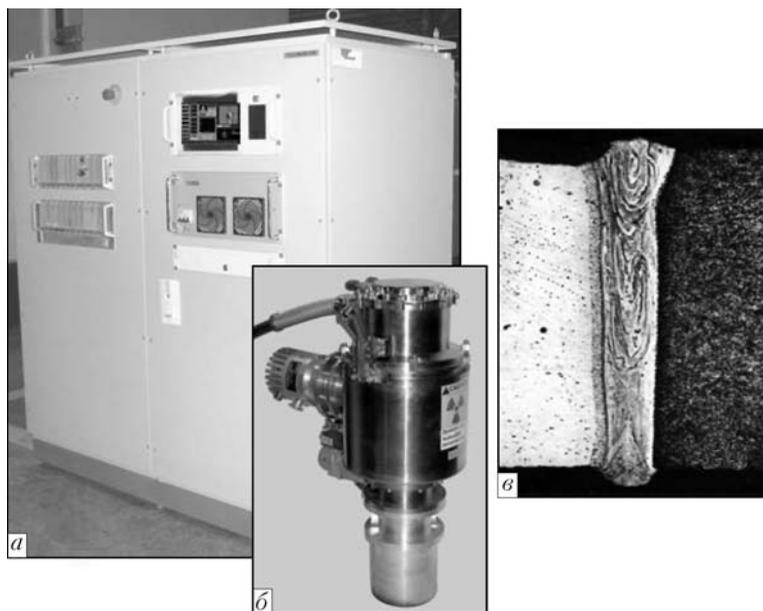


Рис. 6. Источник питания ЭЛА-120/6 (а), сварочная пушка со снятой рентгеновской защитой (б) и макроструктура сварного соединения сталей Р6М5 + 50ХФА толщиной 1,35 мм (в) при скорости сварки 7,8 м/мин; ускоряющем напряжении 120 кВ; токе пучка 12,5 мА; ширине литой зоны в верхней и корневой части шва соответственно 0,35 и 0,25 мм

ном регулирования ускоряющего напряжения. Они не требуют применения защитных линейных элементов, поскольку имеют малый запас энергии.

Однако высокочастотные источники питания отличаются значительно более мягкой нагрузочной характеристикой и не предназначены для работы в режиме импульсной модуляции тока пучка, поскольку не могут обеспечить требуемую стабильность ускоряющего напряжения (рис. 5). Между тем, импульсная модуляция тока пучка является эффективным технологическим приемом

и широко применяется при электронно-лучевой сварке не только тонколистовых материалов, но и металлов больших толщин.

На практике подтверждена эффективность применения высокочастотных источников питания при мощности пучка до 18 кВт и отсутствии жестких требований к импульсному изменению его тока. Примером тому является электронно-лучевая сварка непрерывных ленточных заготовок, в том числе из таких разнородных металлов, как инструментальная + углеродистая стали. Для соответствующих установок созданы и введены в промышленную эксплуатацию 10 комплектов энергетических блоков мощностью 120 и 6 кВт с компьютерным управлением (рис. 6). Ниже приведены основные технические характеристики промышленных энергоблоков.

Промышленные установки. Благодаря наличию в ИЭС им. Е. О. Патона установки с вакуумной камерой вместимостью 400 м³ есть возможность применения электронно-лучевой сварки для изготовления вакуумных камер промышленных установок. При этом нет необходимости в завершающей механической обработке сопрягаемых поверхностей.

Наиболее востребованными являются промышленные установки трех типов.

Первый тип — это установки с вакуумными камерами относительно небольшой (от 0,2 до

Основные технические характеристики энергоблоков

Основные параметры	На основе высокочастотных генераторов				На основе проходной лампы				
	ЭЛА-60/1,2	ЭЛА-60/6	ЭЛА-120/6	ЭЛА-120/18	ЭЛА-60/15	ЭЛА-60/30	ЭЛА-60/60	ЭЛА-120/60	ЭЛА-120/120
Мощность пучка максимальная, кВт	1,2	6	6	18	15	30	60	60	120
Ускоряющее напряжение, кВ	60	60	120	120	60	60	60	120	120
Масса, кг:									
электронной пушки	55	55	60	60	55	55	55	60	60
радиационной защиты пушки	—	—	130	130	—	—	—	—	130
источника питания	185	460	735	735	2500	2750	3000	5000	6000
Режим работы системы «Растр»:									
до и после сварки	+	+	+	+	+	+	+	+	+
в реальном времени	-	-	-	-	+	+	+	+	+
Глубина проплавления, мм:									
сталей	3	12	15	60	50	75	100	130	250
титановых сплавов	3,5	15	20	100	80	110	150	220	400
алюминиевых сплавов	5	30	35	140	120	150	200	240	450



Рис. 7. Установка СВ-112 для сварки малогабаритных изделий (в промышленной эксплуатации находится семь таких установок)

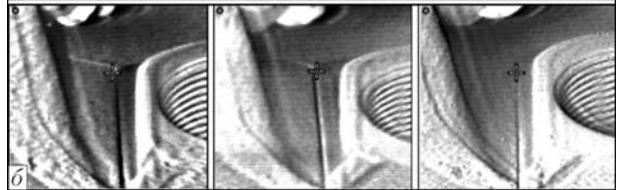
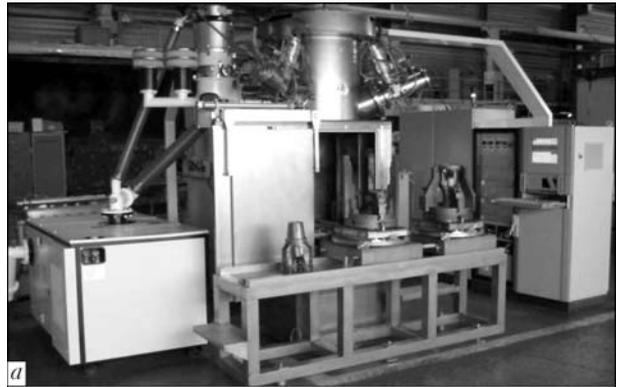


Рис. 10. Трехпещенная установка для сварки буровых долот (а), отображение стыков (б), полученное с помощью вторичных электронов на мониторе, и общий вид сваренных долот трех типоразмеров (в) (установки работают в объединении «Волгабурмаш», Самара, РФ; «Смит Тулз», Понка-Сити, США)



Рис. 8. Установка УЛ-178М для сварки узлов теплообменных аппаратов (ОКБМ им. И. И. Африкантова, г. Нижний Новгород)



Рис. 11. Установка КЛ-132 с семикоординатной системой сварочных перемещений для изготовления изделий аэрокосмической промышленности



Рис. 9. Тактовая установка УЛ-157 для сварки блоков шестерен (завод АВТО-ЗАЗ, г. Мелитополь)

3,5 м³) вместимости, снабженные стационарной или скользящей вдоль одной из стенок сварочной пушкой (рис. 7, 8).

Установки второго, так называемого тактового типа используются, в частности, для сварки блоков шестерен коробок передач (рис. 9). К этому же типу установок можно отнести и высокопроизводительную установку для сварки корпусов бу-



ровых долот (рис. 10), которая оснащается тремя сварочными пушками, запитываемыми от одного источника ускоряющего напряжения. Одновременно осуществляется сварка трех продольных швов, что сводит к минимуму сварочные деформации и повышает производительность сварки. Процесс сварки отображается на мониторе в режиме реального времени, причем пучок каждой из трех пушек автоматически совмещается с соответствующим стыком с помощью системы вторично-электронного отображения поверхности «Растр» [5]. Процесс сварки длится менее одной минуты. Поэтому до погружения сваренного долота в охлаждающую жидкость подшарошечные области со смазкой и уплотнительными манжетами не успевают прогреться до опасных температур. Тактовое время выхода сваренного долота составляет менее 5 мин. Габариты вакуумной камеры позволяют осуществлять сварку долот всех типоразмеров, при этом меняется только сварочно-сборочный узел.

Третий тип — крупногабаритные универсальные установки, отличительной особенностью которых является применение внутрикамерных электронных пушек, перемещаемых в пределах до 12 м с максимальной скоростью 120 м/ч при точности позиционирования $\pm 0,05$ мм. Такое решение позволяет максимально повысить коэффициент использования внутреннего объема вакуумной камеры. Направляющие, вдоль которых перемещается сварочная пушка, закреплены непосредственно на стенках вакуумной камеры. Поэтому для минимальных деформаций стенок в процессе откочки камера выполнена в виде двух вакуумплотных, сравнительно тонкостенных (толщина каждой 8...12 мм) оболочек, соединенных между собой ребрами жесткости — шпангоутами [6].

Применение такой коробчатой конструкции стенок и дверей вместо обычной тавровой позволяет получить в 2 раза больший момент инерции и, как следствие, меньший прогиб при откочке камеры. Отказ от внешних ребер жесткости дал возможность улучшить внешний вид камеры (рис. 11) и устранить накопители пыли на ее внешних стенках, что особенно важно в условиях цеха.

Применительно к пространственно сложным конструкциям реализована семикоординатная система сварочных перемещений: пушки по трем линейным и двум угловым координатам, а свариваемого изделия — по двум угловым (вращение и наклон). Для синхронного управления сварочными перемещениями и параметрами сварочного пучка используется промышленная система с развитым интерфейсом CNC+PLC [7].

1. *Оборудование НИКИМТа для электронно-лучевой сварки* / В. А. Хаванов, С. Д. Братчук, В. А. Серьезнов, А. В. Казаков // Свароч. пр-во. — 2006. — № 9. — С. 25–31.
2. *Электронно-лучевая сварка* / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
3. *Назаренко О. К., Локишин В. Е.* Динамические характеристики высоковольтных источников питания для электронно-лучевой сварки // Автомат. сварка. — 2005. — № 1. — С. 36–39.
4. *Nesterenkov V. M.* Technology and equipment for electron beam welding of power engineering components // Power beam technology, Stratford-upon-Avon, UK, Sept. 23–26, 1990. — Abington, Cambridge: The Welding Institute, 1990. — P. 171–179.
5. *Наблюдение процесса электронно-лучевой сварки и автоматическое слежение за стыком* / О. К. Назаренко, В. И. Шаповал, Г. А. Лоскутов и др. // Автомат. сварка. — 1993. — № 5. — С. 35–38.
6. *Назаренко О. К., Нестеренков В. М., Непорожний Ю. В.* Конструирование и электронно-лучевая сварка вакуумных камер // Там же. — 2001. — № 6. — С. 50–53.
7. *Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия* / Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, В. М. Нестеренков и др. // Там же. — 2004. — № 5. — С. 3–7.

The paper presents the main results of E.O.Paton Electric Welding Institute activities on development of electron beam welding equipment over the last 15 years. Technical data of the developed range of power units (gun–power source–control system), as well as of some of the electron beam welding machines, are given.

Поступила в редакцию 10.04.2008