

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ КОНСТРУКЦИЙ В АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, К. С. ХРИПКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Электронно-лучевая сварка является одним из ведущих технологических процессов, используемых при создании конструкций для авиакосмической промышленности. Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ в течении многих лет занимает ведущие позиции в разработке технологий специализированного оборудования для электронно-лучевой сварки. В работе описаны различные типы созданных установок, отличающихся габаритами сварочной камеры, а также вариациями камер и конфигурациями вакуумных систем, механизмов перемещения пушки или свариваемого изделия. Все установки оснащены современными системами управления оборудованием, входящим в их состав. Приведены образцы изделий авиакосмического назначения, изготовленных с помощью электронно-лучевой сварки. Библиогр. 6, рис. 16.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, изделия авиакосмической промышленности, установки, сварочные камеры, габариты камер, вакуумная система, механизмы перемещения, системы управления, сварные узлы

Авиационная и космическая промышленности занимают лидирующее место по использованию легких и прочных сплавов цветных металлов. Учитывая приоритетность этих направлений, в Институте уделялось большое внимание разработке технологических процессов сварки подобных материалов различными способами, в том числе и способом ЭЛС [1, 2].

Использование средств числового программного управления (ЧПУ) для технологического процесса ЭЛС вывело эту технологию в разряд лидирующих благодаря возможностям прецизионного управления как траекторией движения электронного пучка при сварке, так и его энергетикой, включая регулировку общей величины мощности и формы распределения этой мощности в пространстве [3, 4]. В итоге это привело к существенному расширению технологических возможностей ЭЛС и к улучшению повторяемости процесса сварки серийных деталей на запрограммированном режиме.

Основные характеристики разрабатываемых установок ИЭС [5]:

1. «Малые» (малогабаритные) установки имеют объем сварочной (вакуумной) камеры до 0,26 м³ (рис. 1).

Рабочее давление в электронно-лучевой пушке менее 5×10^{-5} Торр, в сварочной камере — не выше $(2,5...3) \times 10^{-4}$ Торр. Типичное время откачки сварочной камеры и пушки составляет при этом не более 5 мин (зависит от комплектации вакуумной системы).

Установки имеют сравнительно простую конструкцию со стационарно закрепленной наружной сварочной пушкой.

Сварочное движение реализуется миниатюрным ЧПУ-механизмом перемещения свариваемой детали: одно или двухкоординатный рабочий стол и сварочный манипулятор (вращатель), устанавливаемый в одном из двух положений — либо с вертикальной осью вращения планшайбы, или с горизонтальной. Кроме того, установка может оснащаться, например, миниатюрной задней бабкой (для горизонтальной ориентации оси вращения свариваемой детали), небольшим токарным патроном, дополнительным центром и т. п.

Установки этого типа комплектуются сравнительно маломощным высоковольтным сварочным энергоблоком мощностью 6...15 кВт (при фиксированном ускоряющем напряжении 60 кВ).

Это универсальные установки, типичное назначение которых — сварка мелких деталей с линейными и кольцевыми швами из различных конструкционных металлов, в том числе алюми-

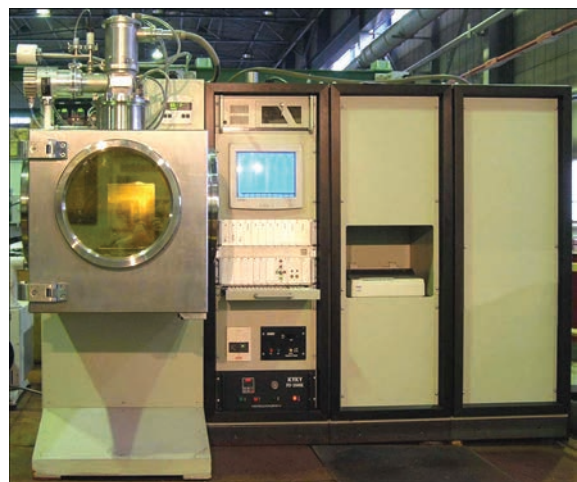


Рис. 1. Малогабаритная установка

Электронно-лучевая сварка

ниевых, магниевых и титановых сплавов, обычно максимальной толщиной менее 30 мм.

2. «Средние» (среднегабаритные) установки имеют объем сварочной (вакуумной) камеры $2,7...5,7 \text{ м}^3$.

Рабочее давление в электронно-лучевой пушке менее 5×10^{-5} Торр, а в сварочной камере, соответственно, не выше $(2,5...3) \times 10^{-4}$ Торр. Типичное время откачки сварочной камеры и пушки при этом — не более 12...15 мин.

Такие установки имеют наружную стационарно закрепленную (вертикально) сварочную пушку (рис. 2).

Перемещение во время сварки (ЧПУ) здесь реализовано прецизионным двухкоординатным рабочим столом и сварочным манипулятором (вращателем), устанавливаемым на столешницу рабочего стола либо в положении с вертикальной осью вращения планшайбы, или с горизонтальной (рис. 3). Дополнительно реализовано перемещение всего подвижного основания рабочего стола (по рельсовым направляющим) из вакуумной камеры на погрузочно-разгрузочную платформу и назад в камеру, причем с плавным подъездом к месту парковки в самой камере.

Установка может оснащаться задней бабкой с поворотным или неповоротным центром в паре с основным сварочным манипулятором (при горизонтальной ориентации его оси вращения), а также токарным патроном и дополнительным центром для этого сварочного манипулятора и т.п. Кроме того, обычно установки оснащаются парным комплектом специальных тумб-подставок для сварочного манипулятора и задней бабки, соответственно (рис. 3). Дополнительно могут поставляться и подставки под тот же манипулятор, но для случая вертикальной ориентации его оси вращения. В общем случае наличие, количество и высота подставок выбирается, исходя из максимальной допустимой величины рабочего расстояния от



Рис. 2. Среднегабаритная установка с неподвижной пушкой и двухкоординатным рабочим столом

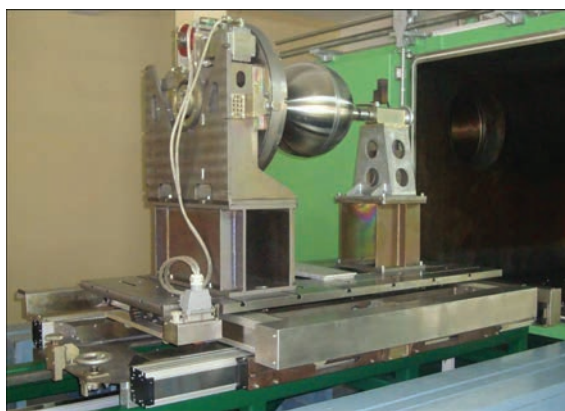


Рис. 3. Двухкоординатный рабочий стол среднегабаритной установки с установленными на специальные подставки сварочным манипулятором (вращателем) и задней бабкой

электронно-лучевой пушки до наружной поверхности деталей конкретного типоразмера.

В некоторых случаях, по желанию заказчика, в среднегабаритных установках используется комбинированная схема линейного сварочного перемещения (рис. 4): подвижный блок электронно-лучевой пушки, передвигающийся вдоль крыши сварочной камеры по одной оси (обычно ось Y) и однокоординатный рабочий стол, движущийся вдоль другой — поперечной оси (ось X , соответственно).

Вне зависимости от вышеупомянутой схемы сварочного перемещения, типичный рабочий линейный ход таких установок порядка 500 мм по обеим осям X и Y . Такой рабочий ход вдоль оси X обусловлен достаточно большой длиной столешницы рабочего стола, позволяющей разместить в длину сварочный манипулятор и заднюю бабку с закрепленным между ними свариваемым изделием.

Установки этого типа обычно комплектуются высоковольтным сварочным энергоблоком мощностью 15 или 30 кВт (при фиксированном ускоряющем напряжении 60 кВ).

Подобные установки, аналогично «малым» установкам, могут быть использованы для сварки всевозможных мелких деталей с линейными и кольцевыми швами из любых конструкционных



Рис. 4. Среднегабаритная установка с подвижной сварочной пушкой и однокоординатным рабочим столом



Рис. 5. Крупногабаритная установка с мобильной внутрикамерной сварочной пушкой и рабочим столом (выкатной тележкой)

металлов, в том числе и алюминиевых, магниевых, титановых сплавов, максимальной толщиной до 60 мм. Тем не менее, основное их назначение — это сварка цилиндрических и сферических деталей диаметром до 700 мм. Так, в частности, на таких установках осуществляется сварка заготовок полусфер шаробаллонов различного типоразмера из конструкционного титанового сплава А16–4V и их последующая финишная стыковка сквозным кольцевым швом (см. рис. 3).

3. «Большие» (крупногабаритные) установки (рис. 5) имеют объем сварочной (вакуумной) камеры 19...42 м³.

Рабочее давление в электронно-лучевой пушке менее 5×10^{-5} Торр, а в сварочной камере соответственно не выше $(2,5...4) \times 10^{-4}$ Торр. Время полной откачки (т.е. и сварочной камеры и пушки) при этом не более 20...40 мин в зависимости от комплектации вакуумной системы.

Конфигурация установки предусматривает подвижную внутрикамерную сварочную пушку, прецизионный ЧПУ-механизм перемещения которой обеспечивает линейное движение вдоль трех координатных осей (вдоль камеры — X, поперек камеры — Y и вертикально — Z), а также наклон пушки до 90° в плоскости Z-X (от «вертикальной» ориентации пушки до «горизонтальной»).

В отличие от описанных ранее меньших установок, рабочий стол «больших» установок не участвует в движении и представляет собой погрузочно-разгрузочную тележку, имеющую верхнюю монтажную плиту с Т-образными пазами, предназначенную для размещения и крепления различных типов сварочных манипуляторов и

дополнительных аксессуаров к ним, а также для всевозможной специализированной сварочной оснастки для неповоротных деталей и узлов. Естественно, имеется соответствующий механизм перемещения рабочего стола по рельсам из камеры на внешнюю погрузочно-разгрузочную платформу и назад в сварочную камеру с плавным подъездом к месту парковки.

Особенностью конструкции «больших» установок является то, что вышеупомянутый поворот пушки реализован за счет поворота основания консольной балки, несущей механизм перемещения по оси Y (рис. 6). При этом сам узел этого поворота может свободно двигаться в пределах большей части сварочной камеры в плоскости Z-X.

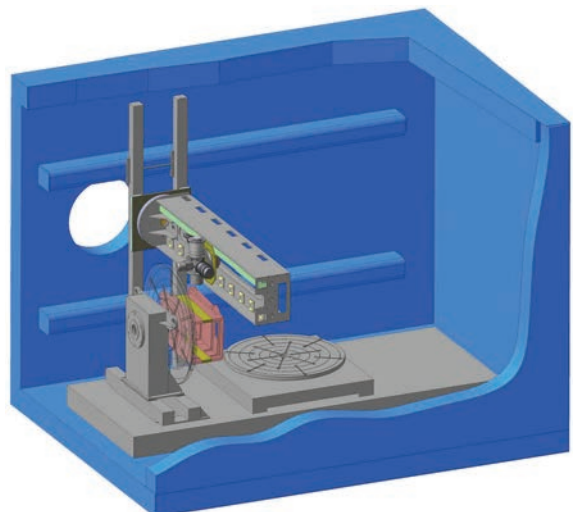


Рис. 6. Модель внутрикамерных механизмов типичной крупногабаритной установки

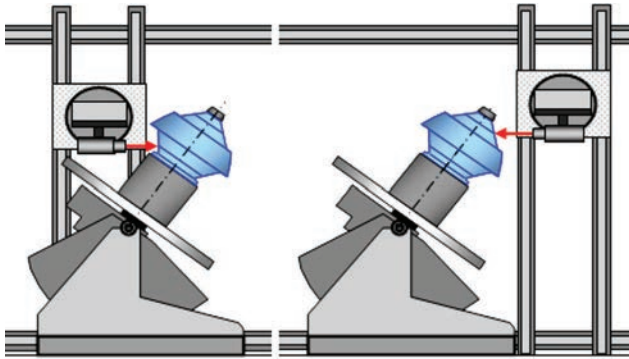


Рис. 7. Пример схемы сварки вращающихся деталей сложной формы с помощью сварочного манипулятора с наклонной осью вращения

В зависимости от назначения установки блок сварочной пушки может иметь дополнительную степень свободы: ЧПУ-ось поворота пушки на $\pm 45^\circ$ в плоскости, параллельной оси Y .

Вращение свариваемой детали обычно обеспечивается за счет одного из 3-х штатных сварочных манипуляторов: сварочного манипулятора с горизонтальной осью вращения (в комплект к нему обычно идет задняя бабка соответствующей высоты), сварочного манипулятора с вертикальной осью вращения (оба манипулятора может заменить один универсальный манипулятор, рассчитанный на обе ориентации, и горизонтальную и вертикальную) и сварочного манипулятора с наклонной осью вращения. Последний позволяет осуществлять наклон оси вращения планшайбы в диапазоне от -30° до $+90^\circ$ (от вертикали), что обеспечивает возможности оперирования, например, со сложными секциями авиационных двигателей (рис. 7), или с другими авиационными узлами, например, пилоном авиационного крыла (рис. 8).

Для расширения производственных возможностей сварочные камеры «больших» установок могут иметь не одну, а пару «скользящих» рабочих дверей и, соответственно, пару подвижных рабочих столов.

Установки этого типа комплектуются высоковольтным сварочным энергоблоком мощностью 15, 30 или 60 кВт (при фиксированном ускоря-



Рис. 8. Пилон авиационного крыла на сварочном манипуляторе с наклонной осью вращения



Рис. 9. Заготовка секции авиационного двигателя из титанового сплава

ющем напряжении 60 кВ) в зависимости от конкретных свариваемых материалов и их толщин.

Подобные установки можно назвать «условно универсальными», так как, в принципе, они могут быть использованы для сварки большинства узлов, вписывающихся во внутрикамерные габариты, свариваемые толщины которых находятся в пределах возможностей комплектуемого энергоблока. Но при этом типичное их назначение – это сварка узлов авиационных двигателей и прочих сравнительно компактных деталей и узлов [6] (рис. 9–12).

4. «Сверхбольшие» (особо крупногабаритные) установки имеют объем сварочной (вакуумной) камеры 80...100 м³.

Подобные установки (рис. 13) по назначению, в принципе, не отличаются от «больших» и также могут рассматриваться как «условно универсальные», но они рассчитаны, соответственно, на узлы



Рис. 10. Заготовка авиационного узла из титанового сплава, сваренная встык из нескольких секций



Рис. 11. Длинномерные авиационные конструкции, сваренные электронным пучком

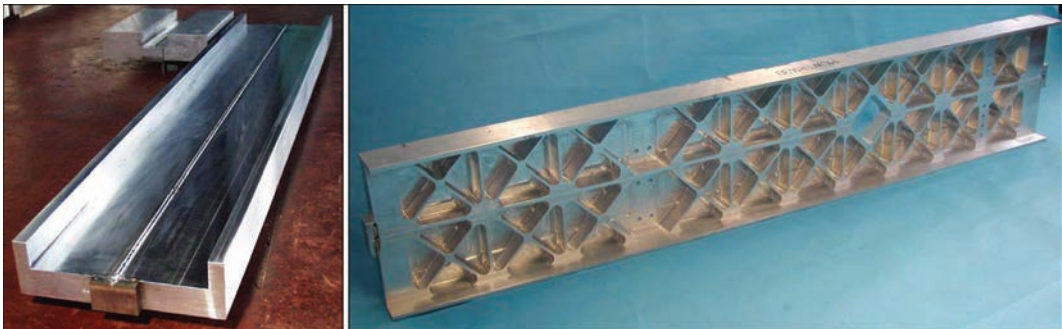


Рис. 12. Сваренная заготовка (слева) балки авиационного крыла (справа — после механической обработки) из высокопрочного алюминиевого сплава

значительно бoльших габаритов. При этом диапазон свариваемых толщин по-прежнему находится в пределах возможностей аналогичных сварочных энергоблоков мощностью 15, 30 или 60 кВт (при фиксированном ускоряющем напряжении 60 кВ).

Таким образом, назначение таких установок — сварка крупногабаритных узлов авиационных двигателей и прочих крупногабаритных и длинномерных деталей.

Рабочее давление в электронно-лучевой пушке менее 5×10^{-5} Торр, а в сварочной камере не выше $(2,5...4) \times 10^{-4}$ Торр. Время откачки сварочной камеры и пушки при этом не более 20...40 мин (также зависит от комплектации вакуумной системы и от требуемого рабочего вакуума).

Для обеспечения такого, сравнительно небольшого, времени откачки установки этого типа ком-



Рис. 13. Внешний вид сверхбольшой установки, укомплектованной мобильной внутрикамерной сварочной пушкой и двумя рабочими столами (погрузочно-разгрузочными тележками). Камера оборудована двумя дверями



Рис. 14. Вакуумная система сварочной камеры объемом 100 м³ комплектуются производительными вакуумными системами (рис. 14).

Конфигурация таких установок также предусматривает подвижную внутрикамерную сварочную пушку, прецизионный ЧПУ-механизм перемещения которой обеспечивает аналогичное линейное движение вдоль трех координатных осей (вдоль камеры — X , поперек камеры — Y и вертикально — Z), а также наклон пушки до 90° в плоскости $Z-X$. Этот наклон пушки также реализован за счет поворота всего механизма перемещения по оси Y . Но в отличие от «больших» установок в «сверхбольших» установках обычно вместо консольной схемы используется порталная схема. При этом части поворотного механизма балки оси Y (т. е. наклона пушки в плоскости $Z-X$) закреплены между двумя симметричными порталами, которые обеспечивают свободное движение пушки на большую часть сварочной камеры в координатной плоскости $Z-X$. В зависимости от назначения установки, она дополнительно может иметь и ЧПУ-ось поворота пушки на $\pm 45^\circ$ в плоскости, параллельной оси Y .

Аналогично «большим» установкам, вращение свариваемого узла обеспечивается одним из 3-х штатных сварочных манипуляторов: сварочным манипулятором с горизонтальной осью вращения (обычно работает в паре с соответствующей задней бабкой), сварочным манипулятором с вертикальной осью вращения и сварочным манипулятором с наклонной осью вращения.

Все типы установок комплектуются современными высоковольтными инверторными сварочными источниками соответствующей мощности (настроенными на фиксированное ускоряющее напряжение 60 кВ). Источник специально разработан для высокоэффективной и надежной ЭЛС — минимальное время отклика цепей управления ускоряющим напряжением и сварочным током (током электронного пучка) заметно повысило их стабильность.

В качестве источника ускоряющего напряжения 60 кВ используется высоковольтный инвер-

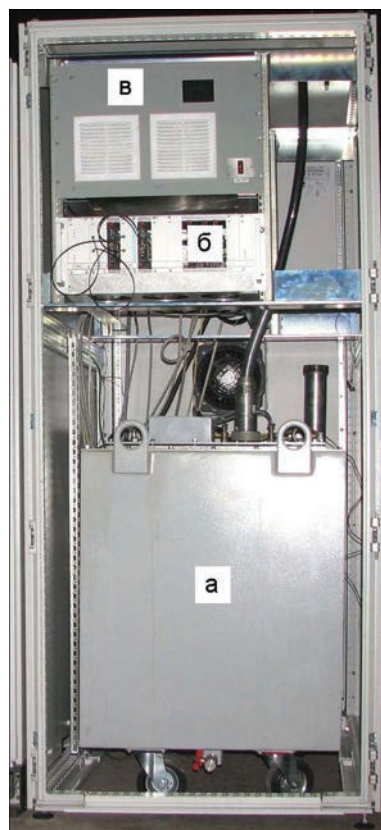


Рис. 15. Шкаф сварочного источника мощностью 15 кВт

торный энергоблок. Остальная часть сварочного источника, включая блок накала и смещения, а также крейт стабилизаторов, содержит все последние разработки ИЭС в области управления ЭЛС. В итоге, все ключевые каналы — канал ускоряющего напряжения, каналы накала и бомбардировки сварочного катода, имеют высокочастотное питание, формируемое на основании сигналов отдельного микроконтроллера, работающего по соответствующему алгоритму. Конструктивно все высоковольтные части источника расположены в специальном масляном баке (рис. 15, позиция а), а низковольтные платы — в крейте стабилизаторов (рис. 15, позиция б) и в блоке (блоках) управления высоким напряжением (рис. 15, позиция в). Отличающиеся «земляные» уровни гальванически изолированы и имеют отдельные источники питания. Связь различных уровней по заданию и по обратной связи осуществляется по оптоволоконным линиям.

Сварочный источник достаточно компактный по габаритам и при мощности до 30 кВт включительно обычно помещается в один силовой шкаф (рис. 15), к которому подведены питание и интерфейсный кабель, а из которого выходит (обычно через крышу) только силовой кабель, питающий пушку. В случае мощности 60 кВт сварочный источник обычно состоит из двух частей.

Сварочный источник представляет собой аппаратный комплекс, все взаимодействие с которым

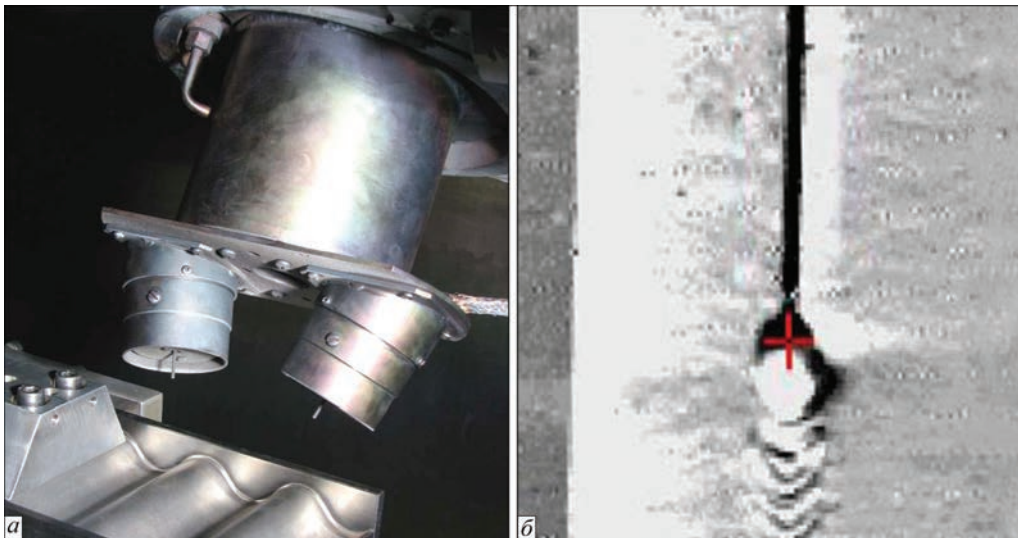


Рис. 16. Датчик вторичных электронов системы «РАСТР-6» (а) и формируемое ею изображение зоны сварки (б)

осуществляется через промышленный интерфейс (шина CAN). Исключением является, только подаваемый в исходном виде специальный модуляционный сигнал от системы РАСТР (см. далее). Это реализовано за счет того, что внешние связи осуществляют соответствующие микроконтроллерные блоки, подсоединенные к шине CAN и предназначенные для управления и диагностики всех каналов сварочного источника. Эти блоки, в свою очередь, непосредственно взаимодействуют с исполнительными элементами сварочного источника, в том числе и с промышленно изготавливаемым источником ускоряющего напряжения.

Вместе со сварочным источником все установки комплектуются интегрированной в этот источник системой вторично-эмиссионной электронной визуализации «РАСТР-6». Такая интеграция обусловлена тем, что функционирование этой системы непосредственно связано с формированием источника электронов. В результате такой интеграции на основании генерируемого системой «РАСТР-6» модуляционного сигнала сварочный источник кратковременно формирует на поверхности свариваемой детали электронный растр — маломощным («зондирующим») электронным пучком, управляемым микроконтроллером канала тока сварки по специальному закону.

При проходе вдоль строк растра «зондирующего» электронного пучка в месте точечной бомбардировки поверхности детали его электронами (первичными) эмитируются вторичные электроны. Эти электроны улавливаются специальным пассивным датчиком (рис. 16, а), обычно расположенным в торце сварочной пушки, который может иметь различное конструктивное исполнение (обычно зависит от области применения, т. е. может быть адаптирован под конфигурацию свариваемых деталей). Непосредственно вблизи от этого датчика расположен компактный блок пред-

варительного усилителя, который формирует и усиливает полезный сигнал, напряжение которого пропорционально снимаемой с датчика величине тока. Этот, уже усиленный, сигнал по экранированной линии выводится из сварочной камеры и поступает в основной видеоусилитель системы. В итоге сигнал оцифровывается специализированной компьютерной платой WLCA и выдается на интерфейс оператора в виде изображения (рис. 16, б), используемого как для визуального наблюдения и ручного наведения на свариваемый стык, так и для работы специальных программных алгоритмов, помогающих пользователю (оператору-сварщику) в составлении новых программ сварки и воспроизведении уже существующих программ при сварке повторяющихся типовых деталей. Система позволяет формировать достаточно устойчивое изображение зоны сварки, как перед началом сварки и после ее завершения, так и непосредственно во время выполнения самой сварки (рис. 16, б).

В систему «РАСТР-6» конструктивно включен микроконтроллерный блок формирования технологических разверток, управляемый, как и весь сварочный источник, по шине CAN. В результате генерируемые этим блоком сигналы развертки по обоим каналам (полюсам отклоняющей катушки) усиливаются штатными усилителями строчной и кадровой развертки системы «РАСТР-6».

Все установки для ЭЛС, разрабатываемые и выпускаемые ИЭС, имеют современную систему управления всем оборудованием, входящим в их состав. Причем основная часть оборудования, от которой непосредственно зависит процесс сварки, находится под непрерывным программным управлением, обеспечивающим как полностью автоматический, так и ручной режим функционирования этого оборудования. При этом используется концепция высокоуровневого программного

управления. Взаимодействие пользователя с оборудованием осуществляется исключительно через Windows-ориентированный графический интерфейс (GUI), работа с которым осуществляется с помощью стандартных средств: клавиатуры и манипулятора типа мышки. Интерфейс разработан таким образом, чтобы быть интуитивно понятным любому человеку, уже работавшему с ПО под ОС Windows, и абсолютно не требует специальной квалификации для работы с низкоуровневым машинным программированием (G-коды и т. п.). Каждая из подсистем оборудования имеет соответствующий оконный графический инструментарий с необходимыми проверками вводимых данных и блокировками, прежде всего, для обеспечения безопасности самого пользователя и обслуживаемого им оборудования. Программа имеет полный инструментарий для управления вакуумной системой, ручного перемещения сварочной пушки и детали, ручного управления сварочными параметрами, составления программ автоматической сварки (сварка по программе), их хранения и выполнения, а также средства сбора и хранения диагностической информации о работе ключевых подсистем установки, средства администрирования и т. д.

Иерархически система управления разбита на два программно-аппаратных уровня: верхний и нижний. К верхнему уровню относятся все средства общения с пользователем, включая графический интерфейс, средства составления и хранения программ сварки, сбора и хранения диагностических данных, администрирования и т. д. Нижний уровень занимается непосредственным исполнением всех процедур по командам с верхнего уровня.

В настоящее время в ИЭС используются две базовые конфигурации системы программного управления установками для ЭЛС. Первая предусматривает использование полной промышленной системы (CNC+PLC) Sinumerik 840D фирмы Siemens, а вторая — урезанной промышленной системы Synamics S120 той же фирмы Siemens.

В случае использования полной системы Sinumerik 840D основная программа взаимодействия с пользователем установлена на штатном промышленном компьютере верхнего уровня Sinumerik PCU-50, работающем под операционной системой Windows.

С помощью сети Profinet данные с его верхнего уровня передаются на нижний программно-аппаратный уровень, который включает: станочные пульта Sinumerik MCP, Sinumerik NCU, соединительный модуль Basic PN, к которому подключен мобильный ручной терминал Sinumerik HT 2 (используется как выносной пульт управления ручным перемещением пушки/детали). В свою

очередь NCU через сетевое соединение DRIVE-CLiQ взаимодействует с модулями сервомоторов осей сварочного переключения и модулями их энкодеров, а через шину ProfiBUS со станцией SIMATIC ET 200M аналоговых и цифровых входов/выходов.

Дополнительным элементом нижнего уровня является компьютер, обслуживающий систему «РАСТР-6». Программа управления этой системой находится в постоянном взаимодействии с основной программой верхнего уровня (на PCU-50), используя Ethernet-соединение. В результате программа верхнего уровня может в любой желаемый момент отображать вторично-эмиссионное изображение поверхности свариваемой детали, формируемое и транслируемое системой «РАСТР-6». Кроме того, при работе специальных автоматизированных алгоритмов «поиска» свариваемого стыка (при составлении программы траектории сварки новой детали и для коррекции существующей траектории при сварке типовых повторяющихся деталей) обе программы управления, и верхнего уровня, и системы «РАСТР» работают неразрывно.

Сварочное перемещение (пушки/детали) находится под контролем ЧПУ (Sinumerik NCU) как в режиме ручного перемещения, так и при автоматической сварке. В последнем случае текстовый скрипт подготовленной на верхнем уровне программы сварки транслируется в NCU, где ЧПУ по собственным алгоритмам производит полный расчет траектории, интерполяций, скоростей и ускорений по каждой из осей. При автоматической сварке ЧПУ обеспечивает полную синхронизацию всех осей, как механических, так и виртуальных, в качестве которых используются каналы токов сварки и фокусировки, а также технологической развертки электронного пучка. При этом управляющие задания этих виртуальных осей снимаются с DMP модуля быстродействующих выходов станции ET 200M и преобразуются в протокол шины CAN (от которой происходит управление сварочным высоковольтным источником).

Управление параметрами сварки в ручном режиме осуществляется с компьютера верхнего уровня, для чего он имеет соответствующий адаптер шины CAN.

Программируемый логический контроллер (PLC) NCU управляет вакуумной системой, используя аналоговые входы, а также цифровые входы и выходы станции ET 200M. В автоматическом режиме пользователь лишь выдает (с верхнего уровня) команды переключения соответствующего режима работы вакуумной системы («Откачка», «Напуск», «Ожидание» или «Стоп»), остальные решения принимает PLC в соответствии с зало-

женным в него алгоритмом. Наоборот, в ручном режиме пользователь может управлять каждым элементом вакуумной системы напрямую (через соответствующие функции все того же алгоритма PLC). Подобный режим предназначен исключительно для отладочных или ремонтных работ, т. к. все блокировки автоматического алгоритма отключены, пользователь принимает на себя полную ответственность за правильность работы системы, что всегда потенциально опасно.

Описанная система управления, фактически внедрена в стандартный современный машинный ЧПУ-комплекс, надежность работы которого обеспечена многолетней ступенчатой эволюцией всего комплекса. При этом следует отметить, что в качестве управляющего комплекса для сварочной установки с высокоуровневым управлением она несколько избыточна по функциональности (особенно это касается возможностей ЧПУ) и не совсем рациональна с точки зрения структуры. В последнем случае имеется в виду то, что станочный пульт Sinumerik MCP вообще не используется, а быстродействующие аналоговые выходы фактически используются не по назначению. Кроме того, необходим дополнительный компьютер для управления системой «РАСТР-6».

Вышеупомянутые соображения привели к тому, что система управления на базе «полного» комплекса Sinumeric 840D используется только в случае специального пожелания заказчика. Во всех остальных случаях в установках для ЭЛС (создаваемых ИЭС) применяется специализированная двухуровневая система управления, разработанная на базе двух простых стандартных одноплатных промышленных компьютеров с использованием «урезанного» комплекса Synamics S120 в качестве исполнительного механизма для управления многоосным сварочным перемещением и вакуумной системой. Один из компьютеров предназначен для функционирования Windows-программы управления верхнего уровня, с которой взаимодействует пользователь, а второй — работает в качестве нижнего уровня — как ЧПУ и PLC одновременно. Мощности современных компьютеров вполне достаточно для выполнения, как высокоприоритетных задач, свойственных ЧПУ, так и для низкоприоритетных задач, свойственных PLC. В итоге на компьютере под управлением операционной системы «реального времени» QNIX работает одна программа нижнего уровня, которая отвечает за управление многоосным сварочным перемещением и свароч-

ным источником (и за синхронизацию их совместной работы), а также за управление вакуумной системой и системой «РАСТР-6».

Оба промышленных компьютера имеют соответствующие Ethernet-адаптеры для обмена данными программ верхнего и нижнего уровней, а также соответствующие адаптеры шины CAN. Компьютер нижнего уровня, кроме того, имеет коммуникационную плату (адаптер) шины ProfiBUS.

В итоге взаимодействие между всеми элементами системы осуществляется практически полностью по промышленным шинам CAN и ProfiBUS. Программа нижнего уровня по шине ProfiBUS управляет вакуумной системой через станцию SIMATIC ET 200M, а сварочным перемещением через основную часть Synamics S120. Причем в случае автоматической сварки (по программе) она синхронизирует движение с изменением сварочных параметров по шине CAN. Задания ручного перемещения передаются на нижний уровень либо от программы верхнего уровня, либо от выносного пульта через шину CAN. В остальном же управление как сварочным источником, так и системой «РАСТР-6» аналогично первому рассмотренному варианту.

ИЭС им. Е. О. Патона находится в процессе непрерывного совершенствования системы управления оборудованием для ЭЛС, улучшения удобства и функциональности разрабатываемого оборудования с учетом неуклонной эволюции аппаратной и элементной базы, а также накопленного многолетнего опыта разработки технологии и оборудования для ЭЛС разнообразных материалов и их толщин.

1. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко [и др.]; под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наукова думка, 1987. — 256 с.
2. Ilyshenko R. Novel technique for joining of thick section difficult-to-weld aluminium alloys / R. Ilyshenko, V. Nesterenkov // Proceeding of the 10 th International conf. on aluminium alloys, Vancouver, Canada, July 9–13, 2006. — V. 519–521. — P. 1125–1130.
3. Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия / Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, В. М. Нестеренков [и др.] // Автоматическая сварка. — 2004. — № 5. — С. 3–7.
4. Акоюнц К. С. Электронно-лучевая сварка стали толщиной 60 мм с продольными пилообразными колебаниями пучка / К. С. Акоюнц, О. К. Назаренко, В. М. Нестеренков // Автоматическая сварка. — 2002. — № 9. — С. 1–3.
5. Назаренко О. К. Современное оборудование ИЭС им. Е. О. Патона для электронно-лучевой сварки / О. К. Назаренко // Автоматическая сварка. — 2008. — № 10. — С. 36–40.
6. Бондарев А. А. Исследование свариваемости магниевого сплава МА2 электронным лучом в вакууме / А. А. Бондарев, В. М. Нестеренков // Компрессорное машиностроение. — 2013. — № 2. — С. 21–28.

Поступила в редакцию 15.03.2016