



УДК 621.791.72.039

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРОЧНОЙ УСТАНОВКИ ЭЛУ-20

Л. А. КРАВЧУК, А. В. КУШНЕРЕВ, В. И. КОЖУКАЛО

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Электронно-лучевая сварочная установка универсального типа ЭЛУ-20, разработанная НИАТ (Россия), в большинстве случаев не обеспечивает выполнение современных требований, предъявляемых к технологии и оборудованию. По заказу пользователей в ИЭС им. Е. О. Патона на базе установки ЭЛУ-20 был разработан и создан специализированный комплекс для электронно-лучевой сварки с автоматическими системами управления и использованием распределенных компьютерных систем. Такой подход позволил реализовать ряд технологических возможностей по автоматическому управлению параметрами сварочного электронного пучка, программному перемещению и наклону электронно-лучевой пушки, визуальному программированию траектории стыка в режиме реального времени, работе вакуумной системы откачки. Windows — ориентированный интерфейс пользователя обеспечил графическое составление и редактирование программ сварки, трехмерное отображение образцов изделия и траекторий стыка в процессе сварки. Библиогр. 2, рис. 3.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая установка, вакуумная камера, электронно-лучевая пушка, система откачки, координатные оси перемещения, наклона и вращения, компьютерное управление, интерфейс, видеонаблюдение, фокусировка, программирование траектории стыка, мастер-программа, напряжение записания

Как показал опыт применения универсальной установки типа ЭЛУ-20, разработанной НИАТ, в большинстве случаев для выполнения современных требований ведущих отраслей промышленности назрела необходимость ее модернизации. В первую очередь это относится к вакуумной системе откачки, высоковольтному источнику питания, электронно-лучевой сварочной пушке, системе управления параметрами сварочного электронного пучка, системе слежения за стыком и визуального наблюдения за процессом сварки, а также механизмам перемещения и наклона пушки, загрузочной тележке и вращателям изделия.

По заказу пользователя (ОАО «Мотор-Січ», г. Запорожье) в ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ на базе установки ЭЛУ-20 был разработан и создан специализированный комплекс для электронно-лучевой сварки (ЭЛС) с автоматическими системами управления (АСУ) и использованием распределенных компьютерных систем [1]. Такой подход обеспечил реализацию следующих технологических возможностей:

перемещение по пяти осям (три координаты  $X, Y, Z$  для перемещения электронно-лучевой пушки (ЭЛП), координата наклона пушки  $VG$ , ось вращения вращателя);

одновременное синхронное перемещение по любым трем координатным осям с линейной интерполяцией;

синхронное с перемещениями управление параметрами сварочного электронного пучка;

проведение сварки в двух режимах: автоматическая и ручная сварка;

Windows — ориентированный интерфейс пользователя, обеспечивающий графическое составление и редактирование программ сварки, трехмерное отображение образов и траекторий стыка в процессе сварки;

объединение нескольких подпрограмм в одну программу;

визуальное программирование траектории стыка в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах;

автоматическое управление вакуумной системой и высоковольтным источником питания;

протоколирование всех команд управления и параметров сварочного процесса в графическом и табличном виде;

диагностику отдельных подсистем (вакуумная система, высоковольтный источник питания, система перемещений, параметры сварочного процесса).

Вакуумная камера прямоугольной формы с внутренними размерами  $3000 \times 2000 \times 2000$  мм (длина  $\times$  ширина  $\times$  высота) и объемом  $12 \text{ м}^3$  снабжена одной откатной дверью, шарнирно подвешенной на балке подвески двери (рис. 1). Дверь с помощью электропривода имеет возможность перемещаться вдоль балки, открывая проем для подачи загрузочной тележки на позицию сварки. Передняя стенка вакуумной камеры (со стороны оператора-сварщика) снабжена смотровыми иллюминаторами, а также лампами освещения и видеокамерой наблюдения. На задней стенке рас-



Рис. 1. Внешний вид электронно-лучевой установки ЭЛУ-20 после модернизации

положены механизмы перемещения сварочной ЭЛП по координатам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и наклона пушки  $VG$ , а также вакуумная система откачки.

Блок доработанной сварочной ЭЛП из состава аппаратуры ЭЛА-60Б с коллектором вторично-эмиссионного сигнала системы видеонаблюдения РАСТР [1, 2], турбомолекулярным насосом, вакуумными датчиками и экраном тепловой защиты пушки установлен на поворотной балке для наклона пушки в плоскости  $XZ$  (координата  $VG$ ) (рис. 2). Перемещение сварочной ЭЛП по координатам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  осуществляется с помощью линейных модулей. Управление перемещениями осуществляется от привода SINAMICS S120 (фирма «Siemens»), обеспечивая точность позиционирования не хуже  $\pm 0,05$  мм. Применение в ЭЛП керамического высоковольтного изолятора и металлического вольфрамового катода диаметром 3 мм позволило получить при ускоряющем напряжении  $U_{\text{вск}} = 60$  кВ ток электронного пучка в диапазоне  $I_{\text{п}} = 0 \dots 500$  мА и наработку катода не менее 40 ч.

Вакуумная система откачки установки, разработанная и созданная на базе современного вакуумного оборудования, обеспечивает необходимое разрежение в сварочной камере и электронно-лу-



Рис. 2. Блок доработанной сварочной ЭЛП с механизмами перемещения по координатам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и наклоном по координате  $VG$

чевой пушке в автоматическом режиме при компьютерном управлении (рис. 3). Время достижения рабочего давления в камере ( $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт.ст.) и пушке ( $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст.) составило не более 30 мин. Windows — ориентированный интерфейс при управлении по командам оператора-сварщика позволил реализовать следующие режимы работы вакуумной системы:

«Откачка» — режим откачки воздуха из вакуумной камеры и пушки как во время подготовки к сварке, так и непосредственно в процессе ее выполнения;

«Ожидание» — дежурный режим, позволяющий сохранить безопасное состояние установки под вакуумом при включенных диффузионных насосах;

«Напуск» — режим вентиляции вакуумной камеры и пушки до состояния готовности к открытию дверей вакуумной камеры;

«Стоп» — режим остановки работы вакуумной системы с отключением диффузионных насосов;

«Ручной» — режим ручного управления оборудованием вакуумной системы при поиске и устранении неисправностей;

«Холодная откачка» — включение режима «Откачка» без включения диффузионных насосов.

Программа автоматического управления вакуумной системой отслеживает и отображает состояние оборудования на экране монитора АСУ, используя обозначения состояния клапанов, затворов и вакуумных насосов.

Для получения изображения места сварки на мониторе АСУ в режиме реального времени применена аппаратура видеонаблюдения РАСТР. Изображение поверхности свариваемого изделия формируется по сигналам от датчика вторично-эмиссионных электронов, установленного на ЭЛП в непосредственной близости от места сварки (рис. 2). Четкая картина сварочного процесса с образованием лицевого валика шва отображается



Рис. 3. Вакуумная система откачки установки ЭЛУ-20 с автономным водяным охлаждением вакуумных насосов, ЭЛП и источника питания (чиллер типа BL365-16, фирма «Lahntechnik», Германия)



на мониторе АСУ и, в отличие от традиционных оптических систем наблюдения, не подвергается влиянию паров свариваемого металла. Применение дополнительного компьютера, который решает задачи распознавания стыка по получаемому от аппаратуры видеонаблюдения РАСТР изображению поверхности изделия, а также интерфейса НМІ (Human Machine Interface) обеспечило выполнение функций автоматического визуального проектирования траектории стыка, корректировки ухода стыка и слежение за стыком.

Windows — ориентированный интерфейс пользователя позволяет составлять в виде графиков и таблиц мастер-программы сварочного процесса для различных конфигураций изделий. Мастер-программа может включать до пяти подпрограмм — «Чистка», «Частичная прихватка», «Сплошная прихватка», «Сварка», «Косметика». В таблицах задаются значения тока сварки, тока фокусировки, скорости сварки, величины рабочего расстояния от торца ЭЛП до изделия, тип и амплитуда технологической развертки, амплитуда и направление отклонения электронного пучка. При выполнении процесса ЭЛС в автоматическом режиме предусмотрена возможность ручной корректировки параметров: ток сварки в пределах  $\pm 10\%$ , ток фокусировки в пределах  $\pm 5\%$  режима программы. Сварка по программе может быть выполнена в режиме импульсной модуляции тока сварки с заданием частоты следования импульсов и длительности импульса.

Подпрограмма «Чистка» применяется для очистки поверхностей стыкуемых кромок изделия от загрязнений и оксидов остросфокусированным маломощным электронным пучком. Значение тока фокусировки для расположения фокуса электронного пучка на поверхности изделия определяется с помощью системы видеонаблюдения РАСТР. Режим очистки электронным пучком обычно выполняется на скорости перемещения 10 мм/с, с разверткой пучка по кругу диаметром 10 мм и током сварки 15 мА.

Интерфейс оператора-сварщика обеспечивает возможность задания двух типов вращателей: горизонтальный вращатель  $W_x$  (горизонтальная ось вращения) и вертикальный вращатель  $W_z$  (вертикальная ось вращения). При составлении и корректировке сварочных программ с использованием вращателей в таблице указывается скорость вращения и направление вращения.

Переход на программное ведение процесса ЭЛС в заводских условиях предъявляет более жест-

кие требования как к оборудованию, так и к технологическому процессу. Для обеспечения воспроизводимости геометрии сварных швов может быть применена следующая методика тестирования сварочной ЭЛП. На мониторе АСУ кроме информации о параметрах электронно-оптической системы (ускоряющее напряжение, ток пучка, ток фокусировки, ток бомбардировки, ток накала) приведено значение напряжения запирающего на управляющем электроде пушки. Отслеживая изменение напряжения запирающего на определенную величину при номинальном токе пучка, оператор-сварщик может прогнозировать работоспособность вольфрамового термокатода и вовремя определить необходимость его замены.

#### Технические характеристики электронно-лучевой установки ЭЛУ-20 после модернизации:

Габаритные размеры установки, мм:	
длина .....	9000
ширина .....	7700
высота .....	3100
Внутренние размеры вакуумной камеры, мм:	
длина .....	3000
ширина .....	2000
высота .....	2000
Рабочее давление в вакуумной камере, мм рт.ст., не выше .....	
1-10 <sup>-4</sup>	
Рабочее давление в ЭЛП, мм рт.ст., не выше .....	
5-10 <sup>-5</sup>	
Время достижения рабочего давления в вакуумной камере и ЭЛП, мин, не более .....	
30	
Время напуска воздуха в вакуумную камеру, мин .....	
2	
Перемещение ЭЛП по координатам, мм, не менее	
X-X .....	2000
Y-Y .....	900
Z-Z .....	800
Скорость перемещения ЭЛП по координатам X-X, Y-Y, Z-Z, мм/с .....	
1,66...25	
Точность позиционирования ЭЛП по координатам X-X, Y-Y, Z-Z, мм .....	
$\pm 0,05$	
Угол поворота ЭЛП в плоскости XOZ, град .....	
0...90	
Количество вращателей для свариваемых изделий, шт.:	
с горизонтальной осью вращения .....	1
с вертикальной осью вращения .....	1
Скорость вращения планшайб вращателей, об/мин .....	
0,06...12	
ЭЛП и аппаратура ЭЛА-60Б:	
ускоряющее напряжение, кВ .....	60
диапазон регулирования сварочного тока, мА .....	0...500
рабочее расстояние электронного пучка, мм .....	100...400
частота технологических разверток пучка, Гц, не более .....	1000
угол отклонения пучка, град .....	$\pm 3,5$
ресурс работы катода, ч .....	40
сварка в импульсном режиме с частотой, Гц .....	5...600
Система наблюдения и слежения за стыком РАСТР:	
точность совмещения электронного пучка со стыком, мм .....	$\pm 0,1$
увеличение объекта наблюдения .....	5

1. *Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия* / Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, В. М. Нестеренков и др. // Автомат. сварка. — 2004. — № 5. — С. 3–7.
2. *Наблюдение процесса электронно-лучевой сварки и автоматическое слежение за стыком* / О. К. Назаренко, В. И. Шаповал, Г. А. Лоскутов и др. // Там же. — 1993. — № 5. — С. 35–38.

Поступила в редакцию 24.01.2013