



КОМПЬЮТЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ С МНОГОКООРДИНАТНЫМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ ПУШКИ И ИЗДЕЛИЯ

Академик **Б. Е. ПАТОН**, чл.-кор. НАН Украины **О. К. НАЗАРЕНКО**, **В. М. НЕСТЕРЕНКОВ**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
чл.-кор. НАН Украины **А. А. МОРОЗОВ**, **В. В. ЛИТВИНОВ**, д-р техн. наук, **В. В. КАЗИМИР**, канд. техн. наук
(Ин-т проблем математических машин и систем НАН Украины)

Рассмотрен новый подход к построению систем управления установками ЭЛС с многокоординатной системой перемещений, основной особенностью которого является реализация визуального способа проектирования программ сварок для сложных пространственных конструкций.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, компьютерное управление, сварочные перемещения, виртуальное представление, визуальное проектирование, автоматическое обучение, слежение за стыком

Наиболее развитыми областями промышленного использования электронно-лучевой сварки (ЭЛС) являются аэрокосмическая индустрия, ядерная энергетика, энергетическое машиностроение, электроника и точная электромеханика [1]. Именно на данный способ сварки ориентируются конструкторы при проектировании изделий сложной формы. В последние годы стала очевидной необходимость одновременного многокоординатного перемещения электронной пушки и свариваемого изделия, которое не может быть реализовано без компьютерного управления.

В современных установках для ЭЛС используются распределенные компьютерные системы, которые включают связанные между собой интерфейсными шинами, но отдельно функционирующие устройства типа CNC (Compute Numerical Control) — современный аналог числового программного управления и PLC (Programmable Logic Con-

troller) — программируемый логический контроллер. При этом собственно программы сварки исполняются процессором CNC, а программы управления вспомогательным оборудованием — процессором PLC.

Как известно [2], в CNC программы записываются в G-кодах (рис. 1) и представляют собой последовательность блоков (строк кода), в которых для каждого отрезка пути задаются координаты точки, куда необходимо переместиться, а также способ и параметры интерполяции при выполнении данного перемещения.

В программах для ЭЛС в блоке задаются значения токов сварки CW, фокусировки CF, технологической развертки и отклонения, устанавливаемые при достижении конечной точки программируемого отрезка пути, а также скорость перемещения на данном отрезке. Дополнительные задания, связанные с синхронизацией осей, поддержанием стабильности скорости и др., задаются с помощью специальных команд, которые также записываются в виде отдельных блоков кода. При одновременном использовании нескольких коор-

```

G codes program
Save as
Refresh
G94
FGROUP(X,Y,Z,QG,VG,W,V)
M54
G4      F=0.5
G0      X=0,00 Y=0,00 Z=25,00 QG=0,00 VG=0,00 W=0,00 V=0,00
M54
PRESETON(CF,4,0000)
PRESETON(CW,0,0000)
N2      G93
N3      G1 F=20,00 Z=19,20 W=20,89 CF=6,0000 CW=0,2000
N12     G1 F=6,05 Z=0,00 W=90,00 CW=0,5000
N22     G1 F=4,64 Z=25,00 W=180,00
N32     G1 Z=50,00 W=270,00 CF=5,0000 CW=0,2000
N42     G1 F=6,00 Z=30,66 W=339,64
N52     G1 F=20,52 Z=25,00 W=360,00 CW=0,0000
G54
M30
    
```

Рис. 1. Фрагмент программы ЭЛС, составленной в G-кодах

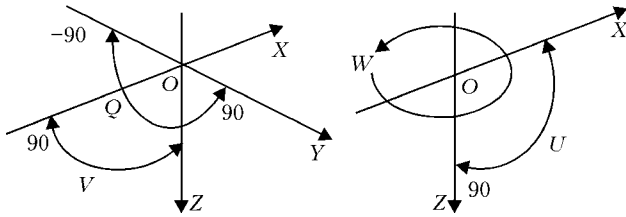


Рис. 2. Система координатных осей и сварочных перемещений: X, Y, Z — линейные оси перемещения пушки; Q — угол перемещения пушки; V — угол наклона; W — угол перемещения планшайбы стола; U — угол наклона стола

динат, когда итоговая траектория представляет собой сложную пространственную кривую, традиционная процедура предусматривает разработку программы перемещений с использованием чертежа изделия, подлежащего сварке, и CAD/CAM системы со специальным постпроцессором, способным конвертировать траекторию, спроектированную в CAD/CAM системе, в ее машинное представление в виде G-кодов для конкретной CNC. Длительность подготовки такой программы может составить (в зависимости от сложности траектории) от нескольких часов до нескольких дней или недель.

Следует также учесть, что оператор-сварщик еще затратит время непосредственно на установку для адаптации заранее спроектированной программы к реальному изделию с учетом неточностей его изготовления и размещения на позиции сварки. И если такая корректировка достаточно проста при использовании только линейных координат (X, Y, Z), то при формировании траектории путем одновременных линейных и угловых перемещений адаптация становится крайне сложной. Поэтому при сохранении ориентации на использование высокоточных CNC систем поставлена задача разработать встраиваемые в эти системы инструмен-

тальные программные средства, которые позволили бы непосредственно оператору создавать программы сварки сложных конструкций за короткое время и без привлечения дополнительных ресурсов. Данная задача потребовала нового подхода к построению системы управления процессом ЭЛС, основной особенностью которого является применение высокоуровневого интерфейса оператора с развитыми инструментальными средствами, обеспечивающими визуальный метод проектирования программ ЭЛС.

В данной статье рассматриваются основные результаты применения данного подхода.

Архитектура системы компьютерного управления. Рассмотрим некоторые пространственно сложные конструкции и требуемые для их сварки программные перемещения пушки и изделия. В таблице (см. вклейку между с. 6–7) в качестве примеров приведены сложные конструкции, при сварке которых с учетом необходимости обеспечения перпендикулярности луча к поверхности изделия требуется, как минимум, четыре одновременно управляемые оси. Обозначения координатных осей и сварочных перемещений, совокупность которых позволяет осуществить сварку подобных изделий, показана на рис. 2. Аппаратная архитектура системы компьютерного управления, позволяющая реализовать данные сварочные перемещения, показана на рис. 3. Как видно из рисунка, дополнительно к традиционно применяемому [3] вычислительному комплексу, объединяющему в своем составе CNC и PLC, нами используются:

— более высокий уровень НМИ (Human Machine Interface) — интерфейс оператора для визуального проектирования рабочих программ и контроля процесса сварки;

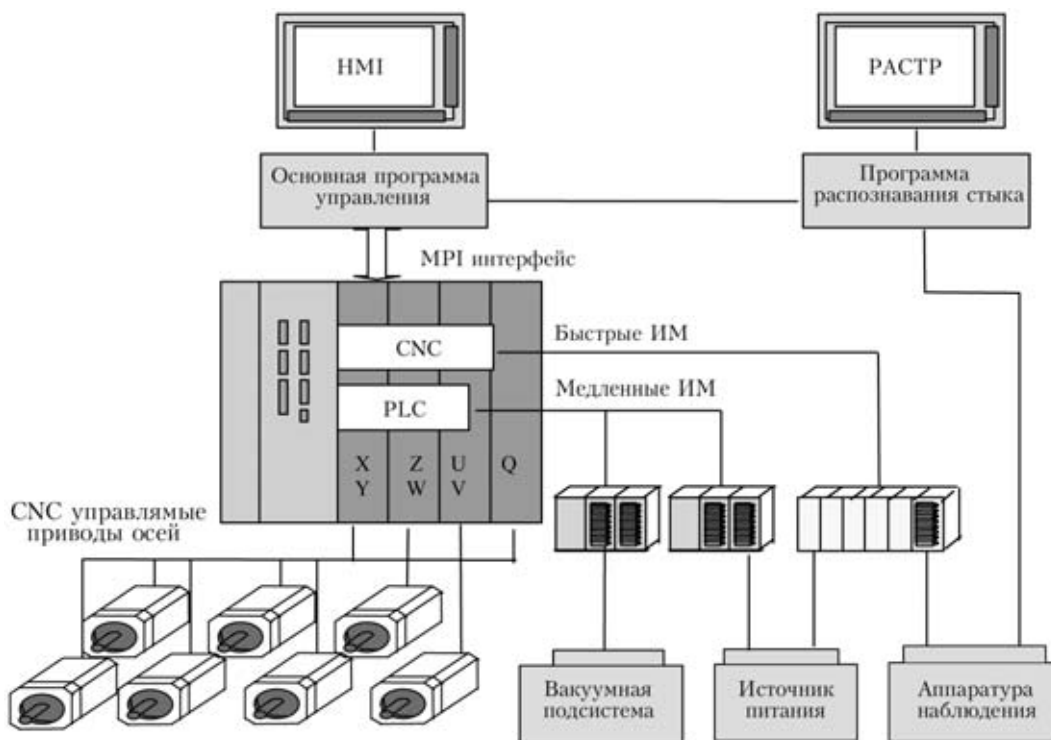


Рис. 3. Аппаратная архитектура системы компьютерного управления



— дополнительный компьютер, который независимо от других процессорных узлов решает задачи распознавания стыка по получаемому от аппаратуры наблюдения РАСТР изображению поверхности изделия, а также совместно с компьютером НМІ обеспечивает выполнение функций автоматического обучения, корректировки и слежения за стыком.

Принцип работы аппаратуры наблюдения РАСТР [4] основан на измерении тока вторично-эмиссионных электронов, образующихся при циклическом (с периодом 300 мс) сканировании рабочей зоны изделия остросфокусированным пучком малой мощности в кратковременные моменты (до 5 мс) прерывания процесса сварки. Изображение поверхности изделия формируется по сигналам от датчика вторично-эмиссионных электронов, установленного на электронной пушке в непосредственной близости от места сварки. Измеренные и оцифрованные аппаратурой наблюдения уровни яркости участков сканируемой поверхности запоминаются в памяти компьютера в виде кадра (матрицы) изображения и после специальной программной обработки воспроизводятся в отдельном окне монитора РАСТР. На сегодня аппаратура наблюдения позволяет получать только плоские изображения. Интерфейсные модули (ИМ) обеспечивают обмен сигналами управления с оборудованием установки. В частности, через быстрые ИМ в темпе работы CNC, с задержкой до 75 мкс, осуществляется управление токами и синхронизация взаимодействия с аппаратурой наблюдения РАСТР.

Предложенная архитектура позволяет отказаться от традиционного программирования сварки в G-кодах и реализовать программное управление ЭЛС путем последовательного выполнения следующих процессов: построение трехмерного виртуального представления обстановки внутри вакуумной камеры; выбор с помощью созданного виртуального представления начальной точки траектории стыка; обучение системы перемещений для следования вдоль траектории стыка; автоматическое слежение за стыком во время выполнения сварки с целью компенсации возникающих сварочных деформаций.

Виртуальное представление изделия и сварочной траектории. Виртуальное трехмерное представление изделия внутри вакуумной камеры необходимо оператору для выбора характерных точек и задания правильной угловой ориентации пушки во время визуального проектирования траектории.

Разработанный инструментальный виртуального представления позволяет, в частности:

- создавать трехмерные образы изделий (см. таблицу на вклейке);
- отображать реальное расположение изделия и пушки внутри вакуумной камеры;
- изменять масштаб и ракурс обзора формируемого отображения для его более удобного и детального представления;
- отображать расположение запрограммированной сварочной траектории на поверхности изделия;

- задавать допустимые области перемещения пушки и осуществлять автоматический контроль за перемещениями с целью недопущения повреждения изделия и внутрикамерного оборудования;
- отслеживать на поверхности изделия положение электронного луча относительно заданной траектории при выполнении сварки.

Образы изделий формируются самим оператором установки из базового набора автофигур и отображаются на мониторе НМІ в трехмерном пространстве (x, y, z) . Однако для отображения в этом пространстве траектории луча на поверхности изделия, в действительности получаемой в результате сварочного перемещения в многомерном пространстве (X, Y, Z, V, Q, W, U) , необходимо трансформировать семикоординатные векторы, описывающие точки траектории, в трехмерные.

С этой целью для учета углов вращения и наклона пушки найдем дополнительный вектор $\mathbf{A} = (-rX, 0, rZ + D)$, где rX — расстояние по координате X от оси луча до оси наклона пушки; rZ — расстояние от оси вращения пушки до ее торца; D — расстояние от торца пушки до поверхности изделия. Далее для каждой точки поворачиваем вектор \mathbf{A} вокруг оси вращения пушки в плоскости YZ на угол Q , а затем — вокруг оси наклона пушки в плоскости XZ на угол V . В результате получаем координаты точки относительно центра вращения и наклона пушки (x_1, y_1, z_1) .

Для учета углов вращения и наклона стола найдем дополнительный вектор $\mathbf{B} = (X_{\text{rot}}, Y_{\text{rot}}, Z_{\text{rot}} + dZ_{\text{rot}})$, где $X_{\text{rot}}, Y_{\text{rot}}, Z_{\text{rot}}$ — координаты центра стола в базовой системе координат; dZ_{rot} — расстояние от оси наклона стола до его поверхности. Далее перемещая центр координат в конец вектора \mathbf{B} и поворачивая вектор (X, Y, Z) каждой точки вокруг оси вращения стола в плоскости XY на угол W , получаем точку (x_2, y_2, z_2) , а затем путем поворота вокруг оси наклона стола в плоскости XZ на угол U , получаем точку (x_3, y_3, z_3) .

В итоге базовые координаты точек, в соответствии с которыми точки будут отображаться внутри вакуумной камеры, пересчитываются согласно следующему выражению:

$$(x, y, z) = (X + X_{\text{rot}} + x_1 + x_2 + x_3, Y + Y_{\text{rot}} + y_1 + y_2 + y_3, Z + Z_{\text{rot}} + z_1 + z_2 + z_3). \quad (1)$$

Визуальное проектирование программы сварки. При проектировании простых, например, одномерных швов, оператор может задать координаты точек сварочного перемещения в виде таблицы. Для составления программы сварки пространственно сложного шва предусматривается процедура автоматического обучения, которая в процессе своего выполнения использует изображение стыка кромок, подлежащих сварке (рис. 4, а, см. вклейку между с. 6–7). Стык на данном изображении представлен в виде темной линии на фоне более светлой поверхности изделия. Крестом показано место нахождения центра электронного пучка. Оператор, вручную перемещая пушку или изделие, совмещает пучок электронов с начальной



точкой стыка свариваемых кромок и выдает команду на выполнение автоматического обучения, которое реализуется в результате совместной работы компьютеров РАСТР и НМІ. В процессе движения в первоначально указанном оператором направлении программа распознавания в каждом новом кадре изображения находит стык (синяя линия) и определяет вектор перемещения (желтая линия, выходящая из креста) в новую точку траектории, расположенную на середине стыка.

Алгоритм распознавания реализует метод сегментации с выделением точек стыка путем наращивания [5]. Для повышения эффективности данный метод был модифицирован путем рассмотрения не отдельных пикселей, а целых групп. После проверки на однородность в область стыка зачисляется первый пиксель, принадлежащий направлению со средним уровнем яркости, наиболее близким к яркости стыка. Подобным образом находят все множество точек кадра изображения, принадлежащих стыку. Вектор линейного перемещения рассчитывается, исходя из условия обеспечения требуемой точности попадания пучка в середину стыка — не хуже 0,1 мм. CNC обрабатывает перемещение в новую точку с линейной интерполяцией и выдает сигнал компьютеру РАСТР для определения координат очередной точки. В результате крест снова оказывается расположенным на линии стыка. Автоматическое обучение завершается, если очередная найденная точка совпадает с предыдущей (достигнут конец стыка) или начальной (для замкнутой траектории).

Траектория, которая формируется в процессе автоматического обучения, отображается на базовых координатных плоскостях (рис. 5, см. вклейку между с. 6–7) для случая выполнения косоугольного шва на цилиндрическом теле путем четырехкоординатного перемещения пушки — поворот и перемещение по трем линейным осям. По мере обнаружения новых точек траектории они соединяются с предыдущими отрезками прямых линий. Получаемая подобным образом кусочно-линейная модель реального стыка не учитывает его геометрических особенностей и содержит избыточное количество точек (чем больше кривизна стыка, тем больше точек требуется для его кусочно-линейной аппроксимации), которое может быть сокращено за счет проведения по команде оператора дополнительной аппроксимации.

Особенностью реализованного алгоритма дополнительной аппроксимации является то, что уравнения линии или дуги окружности, полученные с помощью метода наименьших квадратов, корректируются так, чтобы координаты начальной и конечной точек оставались неизменными. При проверке возможности линейной аппроксимации выбранного участка траектории, состоящего из n точек, коэффициенты отрезка прямой линии вычисляются с помощью формул

$$a = \frac{s_{xy} - s_x s_y}{s_x^2 - s_x s_x}, \quad b = \frac{s_x^2 s_y - s_x s_{xy}}{s_x^2 - s_x s_x}, \quad (2)$$

где

$$s_x = \sum_{i=0}^{n-1} x_i; \quad s_x^2 = \sum_{i=0}^{n-1} x_i^2; \quad s_y = \sum_{i=0}^{n-1} y_i; \quad s_{xy} = \sum_{i=0}^{n-1} x_i y_i.$$

Если построенная линейная регрессия не удовлетворяет требуемой точности, предпринимается попытка подобрать дугу окружности, аппроксимирующую выбранный участок траектории. Неизвестные коэффициенты a , b и c , которые используются для вычисления радиуса окружности $R = \sqrt{c + a^2 + b^2}$, определяются с помощью системы уравнений

$$\begin{cases} s_y^2 b + s_{xy} a + s_y c = s_y^3 + s_x^2 y, \\ s_{xy} b + s_x^2 a + s_x c = s_{xy}^2 + s_x^3, \\ s_y b + s_x a + nc = s_y^2 + s_x^2, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} s_x &= \sum_{i=0}^{n-1} x_i; \quad s_x^2 = \sum_{i=0}^{n-1} x_i^2; \quad s_x^3 = \sum_{i=0}^{n-1} x_i^3; \quad s_y = \sum_{i=0}^{n-1} y_i; \\ s_{xy} &= \sum_{i=0}^{n-1} x_i y_i; \quad s_x^2 y = \sum_{i=0}^{n-1} x_i^2 y_i; \quad s_{xy}^2 = \\ &= \sum_{i=0}^{n-1} x_i y_i^2; \quad s_y^3 = \sum_{i=0}^{n-1} y_i^3; \quad s_y^2 = \sum_{i=0}^{n-1} y_i^2. \end{aligned}$$

С учетом того, что начальная и конечная точки участка интерполяции принимаются фиксированными, дополнительно корректируются координаты центра окружности. Если рассчитанная круговая аппроксимация также не удовлетворяет необходимой точности, она автоматически отклоняется, а длина анализируемого участка траектории уменьшается на одну точку. Далее процесс аппроксимации повторяется.

Помимо выполнения описанной выше дополнительной аппроксимации, оператор может редактировать получаемую траекторию вручную путем изменения координаты точек, способов интерполяции (линейной или круговой) на выбранных участках траектории, добавлением новых точек в уже существующую траекторию или удалением некоторых на полученной траектории. В качестве параметров точек оператор также задает и редактирует все технологические параметры сварки, в том числе токи пучка и фокусировки, скорость сварочного перемещения между точками и пр.

Спроектированная визуально программа сварки при запуске ее на выполнение автоматически, без участия оператора, конвертируется в последовательность G-кодов, исполняемую CNC. Данная программа может быть вызвана для просмотра в отдельном окне монитора НМІ (см. рис. 1).

Ввиду возможных сварочных деформаций изделия предусмотрен режим автоматического слежения за стыком непосредственно в процессе выполнения сварки по составленной программе. На кадре изображения стыка, который формируется в процессе слежения за стыком (рис. 4, б, см. вклейку между с. 6–7), отображается зона обнаружения стыка, а также реальное и расчетное место



расположения центра электронного пучка. Зона обнаружения стыка выносится вперед относительно текущего места сварки, где образуется сварочная ванна. Обнаруженные уходы траектории от стыка компенсируются за счет отклонений пучка, которые запоминаются программой и могут быть воспроизведены при повторных (например, косметических) проходах по стыку.

Описанные выше архитектура построения системы управления и метод визуального проектирования программ управления многокоординатными перемещениями уже реализованы в промышленных установках (см. рис. 6, вклейка между с. 6–7).

В заключение можно отметить, что рассмотренный в данной статье подход к построению установок для ЭЛС нового поколения на основе применения распределенной компьютерной архитектуры с развитым человеко-машинным интерфейсом позволил реализовать весь комплекс задач

управления многокоординатными перемещениями. Разработанные методы и алгоритмы обеспечили автоматическое обучение сложным траекториям и слежение за стыком во время сварки, значительно расширили возможности визуального проектирования программ сварок и тем самым повысили качество и эффективность применения ЭЛС в производстве пространственно сложных конструкций.

1. *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.
2. *Сосонкин В. Л.* Программное управление технологическим оборудованием. — Л.: Машиностроение, 1991. — 512 с.
3. *Schiller S., Heisig U., Panzer S.* Electron beam technology. — New York: J. Wiley & Sons, 1988. — 136 p.
4. *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.
5. *Бузовский О. В., Болдак А. О., Мохамед Руми М. Х.* Компьютерная обработка изображений. — Киев: Корнійчук, 2001. — 180 с.

A new approach has been considered to construction of control systems of EBW machines with a multi-coordinate displacement system, which has the main feature of implementation of a visual method of development of welding programs for complex three-dimensional structures.

Поступила в редакцию 09.02.2004

**Международный симпозиум
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ
1–6 августа 2004 г. Иркутск, Россия**

Россия • 634021 • г. Томск • пр. Академический, 2/1 • Тел./факс: (3822) 49-10-73 • e-mail: oilgas@ispms.tsc.ru • www.asiaoilgas.tomsk.ru

ОРГАНИЗАТОРЫ: ❖ Сибирское отделение Российской академии наук ❖ Консорциум «Сибнефтегазстрой», Москва, Россия ❖ ООО «Управляющая компания Томскподводтрубопроводстрой», Томск, Россия ❖ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

Планируется во время работы Симпозиума учредить Международную Ассоциацию «Трансазиатские нефтегазопроводы», необходимость создания которой вызвана развитием транспортной инфраструктуры Сибири как одного из приоритетных направлений реализации Стратегии экономического развития Сибири, утвержденной Правительством Российской Федерации.

Симпозиум будет проходить в Прибайкальском регионе, где планируется интенсивное строительство магистральных нефтегазопроводов с выходом в Азиатско-Тихоокеанские страны.

ОСНОВНЫЕ ТЕМЫ:

- ❖ Экологическая и техногенная безопасность строительства и эксплуатации трубопроводов
- ❖ Новые технологии при строительстве нефтегазопроводов, методы и средства защиты трубопроводов и технологического оборудования от коррозии
- ❖ Технологии и оборудование для ремонта и упрочнения импортозамещающих запасных частей строительной техники, нефте- и газодобывающего оборудования
- ❖ Разработка новых экологически чистых и экономически эффективных сварочных технологий и оборудования для строительства трубопроводов
- ❖ Компьютерные и информационные технологии как инструмент контроля и повышения эффективности управления объектами нефтяной и газовой отраслей
- ❖ Технологии мониторинга и оценки ресурса эксплуатации трубопроводов на базе современных средств дефектоскопии и методов неразрушающего контроля
- ❖ Обеспечение охраны и безопасности трубопроводов в процессе эксплуатации