

УДК 681.5.015

К.И. Сёмкин

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАНИПУЛЯТОРА ИЗДЕЛИЯ

Рассматриваются вопросы автоматизации проектирования роботизированных технологических комплексов дуговой сварки с использованием манипулятора изделия. Проводится анализ достоверности возможных ориентаций шва. Предлагается алгоритм минимизации времени перехода между группами швов с учетом технологических особенностей процесса дуговой сварки.

Введение

Дуговая сварка считается одной из быстроразвивающихся областей применения роботов. По данным Международной федерации робототехники (IFR), в данной области используется около 50% мирового парка роботов-манипуляторов [1]. Это объясняется тем, что применение роботов позволяет повысить качество и улучшить внешний вид швов, автоматизировать процесс сварки швов с любой формой линии соединения во всех пространственных положениях, а также исключить необходимость изготовления и применения специализированных сварочных установок, станков и машин [2]. Однако роботизированная сварка имеет свои особенности, затрудняющие ее применение. Например, сенсорные и манипуляционные свойства роботов значительно ниже соответствующих свойств человека-сварщика. Поэтому конструкции, приемлемые для ручной или механизированной сварки, в ряде случаев оказываются непригодными для сварки роботами из-за недоступности некоторых мест сварки инструментом. В связи с этим, наряду с промышленным роботом (ПР), манипулятором инструмента, обязательным компонентом современного роботизированного технологического комплекса (РТК) сварки (рис. 1) является позиционер, манипулятор изделия, обеспечивающий рациональную ориентацию шва по отношению к направлению силы тяжести и наиболее удобное для робота пространственное положение.

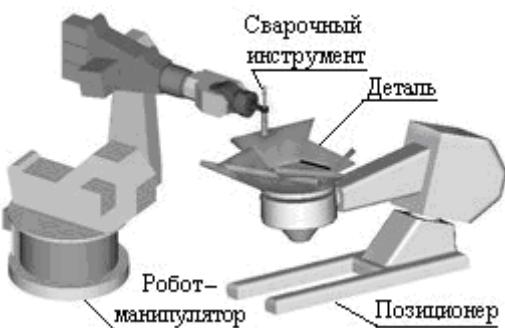


Рис. 1. Основные компоненты РТК сварки

В настоящее время на рынке имеется ряд моделей сварочных позиционеров, имеющих от одной до девяти степеней подвижности, хотя для ориентации шва по отношению к вектору силы тяжести в общем случае достаточно двух степеней свободы. Очевидно, что применение позиционеров приводит к кинематической избыточности и существенно усложняет процесс программирования РТК. Еще одна особенность, которую надо учитывать при проектировании РТК дуговой сварки, связана со сравнительно невысоким (по сравнению с ПР) быстродействием позиционеров, что накладывает ограничение на перемещение изделия в процессе сварки. Поэтому в данной работе рассматривается задача оптимального использования кинематической избы-

точности манипуляционной системы «робот – позиционер» с целью уменьшения времени обработки детали и повышения качества сварных соединений.

1. Проблемы оптимального управления позиционером

Скорость сварки и качество сварного соединения существенно зависят от таких технологических параметров, как ориентация шва относительно вектора гравитации и ориентация сварочной горелки относительно шва. Например, сварка горизонтальных угловых швов производится со скоростью 30–55 м/ч, в то время как скорость сварки вертикальных швов составляет порядка 6–10 м/ч. Очевидно, что с помощью позиционера можно ориентировать оптимальным образом каждый шов, однако для сложных изделий с большим количеством коротких швов (рис. 2) затраты времени на изменение ориентации могут превысить выигрыш от повышения скорости сварки. Поэтому при роботизированной сварке целесообразно объединять швы в группы, обрабатываемые при одинаковом расположении позиционера. Следует также отметить, что для задач дуговой сварки критичной является минимизация сварочных напряжений и деформаций. Особенно актуальна эта проблема для конструкций, имеющих длинные швы [3]. Наиболее эффективными способами борьбы со сварочными деформациями в процессе сварки являются рациональная последовательность наложения швов и крепление свариваемых деталей в жесткие приспособления [3 – 5]. В дуговой ручной и полуавтоматической сварке наибольшее распространение получил первый способ в силу его дешевизны по сравнению с креплением деталей в жесткие приспособления. Однако в роботизированной сварке, а в последнее время и полуавтоматической жесткая фиксация деталей друг относительно друга является обязательным условием [4], поэтому в некоторых случаях можно изменить последовательность обработки швов с целью увеличения производительности. Кроме того, объединение швов в группы позволяет разработчику устанавливать порядок обработки швов внутри группы исходя из требований минимизации деформаций, в то время как оптимизация управления позиционером будет проводиться на уровне групп.

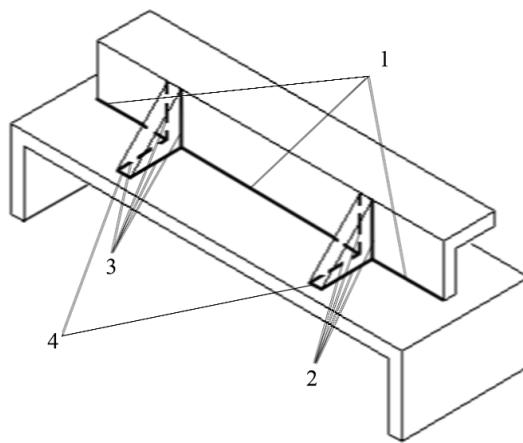


Рис. 2. Сварная конструкция с нанесенными швами, разбитыми на группы

Таким образом, задачу оптимального управления позиционером можно разделить на два класса: минимизация времени обработки отдельной группы швов, которая обеспечивается оптимальным расположением детали относительно вектора гравитации, и минимизация времени перехода между группами за счет нахождения оптимальной последовательности обработки групп. Кроме того, в отдельный класс задач можно выделить анализ возможных ориентаций шва в зависимости от ориентации детали относительно планшайбы позиционера. Такой анализ позволит определить степень влияния каждого из вышеперечисленных компонентов на общее время сварки и, как следствие, необходимость их минимизации.

Как показал проведенный анализ, в настоящее время имеются публикации, посвященные лишь отдельным аспектам оптимального управления позиционером. Так, в работах [6, 7] затра-

гиваются вопросы управления позиционером в процессе сварки с целью оптимальной ориентации шва в пространстве, однако решение ограничивается обратной задачей кинематики (ОЗК) позиционера. С другой стороны, в существующих в настоящее время САПР РТК управление позиционером осуществляется в интерактивном режиме с использованием только прямой задачи кинематики. Отдельно стоит рассмотреть САПР eM-Workspace (старое название ROBCAD) [8]. Эта САПР включает модуль eM-Arc, имеющий средства, позволяющие разрабатывать, моделировать, анализировать и программировать процессы дуговой сварки. Ориентация горелки и настройки позиционера могут быть оптимизированы для обеспечения доступа к швам и оптимизации технологических параметров сварки. Последовательность сварки швов оптимизируется с учетом минимизации рабочего цикла и уменьшения сварочных деформаций изделия. Однако оптимизация управления позиционером ограничивается лишь предварительной настройкой позиционера перед обработкой всей детали и не обеспечивает оптимальное управление им в процессе сварки. Таким образом, ни в одной из известных работ задача оптимального управления позиционером для технологического процесса дуговой сварки не только не решена, но и не formalизована в полном объеме, хотя некоторые авторы указывали на ее актуальность для промышленной робототехники [9, 10].

Рассмотрим сначала задачу нахождения обобщенных координат позиционера \mathbf{q}_P , обеспечивающих такое положение детали, что все швы, входящие в заданный набор, будут иметь ориентацию, близкую к оптимальной, а робот может обработать эти швы, соблюдая оптимальную ориентацию горелки относительно шва. Обозначим через $\{\mathbf{W}_i\}$ множество фреймов \mathbf{W}_i , каждый из которых задает ориентацию и положение шва относительно точки крепления детали. При этом учтем, что матрица \mathbf{W}_i задает ориентацию всех осей фрейма, связанного со швом, однако на скорость сварки влияют лишь два угла – ξ и θ (угол отклонения биссектрисы угла шва от вертикали и угол отклонения линии шва от горизонтальной плоскости). Поэтому далее будем рассматривать функции $\xi = F_\xi(\mathbf{W})$ и $\theta = F_\theta(\mathbf{W})$, позволяющие вычислить показатели качества ориентации шва в пространстве.

Аналогично введем множество фреймов $\{\mathbf{T}_i\}$, задающих ориентацию и положение сварочной горелки относительно шва. Как и в предыдущем случае, матрица \mathbf{T} задает ориентацию всех осей фрейма, связанного с горелкой, однако на скорость сварки влияют лишь два угла – α и β (угол наклона плоскости движения горелки по отношению к биссектрисе сварного соединения и угол наклона горелки по отношению к линии шва). Далее будем рассматривать функции $\alpha = F_\alpha(\mathbf{T})$ и $\beta = F_\beta(\mathbf{T})$, позволяющие вычислить показатели качества ориентации горелки относительно шва.

Предположим также, что математические модели позиционера и робота задаются матричными функциями

$$\mathbf{P}={}^P\mathbf{T}_D(\mathbf{q}_P); \quad \mathbf{R}={}^B\mathbf{T}_T(\mathbf{q}_R), \quad (1)$$

где ${}^P\mathbf{T}_D$ – однородная матрица преобразования из системы координат основания позиционера «Р» в систему координат детали «D»; ${}^B\mathbf{T}_T$ – однородная матрица преобразования из системы координат основания робота «В» в систему координат инструмента «Т»; \mathbf{q}_P и \mathbf{q}_R – обобщенные координаты позиционера и робота соответственно.

Как следует из анализа режимов сварки швов с различной пространственной ориентацией [11], зависимость скорости сварки от углов ориентации шва и инструмента можно аппроксимировать функцией вида

$$F_v(\theta, \xi, \alpha, \beta) = F_{v_0} + \eta_\theta (\theta - \theta_0)^2 + \eta_\xi (\xi - \xi_0)^2 + \eta_\alpha (\alpha - \alpha_0)^2 + \eta_\beta (\beta - \beta_0)^2, \quad (2)$$

где $\theta_0, \xi_0, \alpha_0, \beta_0$ – оптимальные значения соответствующих углов, а $\eta_\theta, \eta_\xi, \eta_\alpha, \eta_\beta$ – весовые коэффициенты, учитывающие влияние отклонения соответствующего угла от оптимума на

скорость сварки. Введем также функцию, определяющую время обработки шва длиной l при ориентации шва \mathbf{W} , ориентации инструмента относительно шва \mathbf{T} и положении базы робота относительно базы позиционера \mathbf{B}_0 :

$$F_\tau(\mathbf{q}_P, \mathbf{q}_R) = F_v(F_\theta(\mathbf{q}_P), F_\xi(\mathbf{q}_P), F_\alpha(\mathbf{q}_P, \mathbf{q}_R), F_\beta(\mathbf{q}_P, \mathbf{q}_R)) \cdot l, \quad (3)$$

где $F_\theta(\mathbf{q}_P) = F_\theta(^P\mathbf{T}_D(\mathbf{q}_P) \cdot \mathbf{W})$; $F_\xi(\mathbf{q}_P, \mathbf{q}_R) = F_\xi(^B\mathbf{T}_T(\mathbf{q}_R) \cdot \mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{W}^{-1} \cdot {}^B\mathbf{T}_T^{-1}(\mathbf{q}_P))$;

$$F_\alpha(\mathbf{q}_P) = F_\alpha(^P\mathbf{T}_D(\mathbf{q}_P) \cdot \mathbf{W}); \quad F_\beta(\mathbf{q}_P, \mathbf{q}_R) = F_\beta(^B\mathbf{T}_T(\mathbf{q}_R) \cdot \mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{W}^{-1} \cdot {}^B\mathbf{T}_T^{-1}(\mathbf{q}_P)).$$

С учетом введенных обозначений задача нахождения оптимального положения позиционера для совокупности швов может быть сформулирована следующим образом.

Для заданной совокупности швов $\{\mathbf{W}_i\}$ и заданного положения робота относительно позиционера \mathbf{B}_0 найти значения обобщенных координат позиционера \mathbf{q}_P , обеспечивающие минимум суммарного времени сварки,

$$F_\tau = \sum_i F_v(F_{\theta i}(\mathbf{q}_P), F_{\xi i}(\mathbf{q}_P), F_{\alpha i}(\mathbf{q}_P, \mathbf{q}_R), F_{\beta i}(\mathbf{q}_P, \mathbf{q}_R)) \cdot l_i \rightarrow \min_{\mathbf{q}_P} \quad (4)$$

с учетом ограничений на диапазон изменения обобщенных координат позиционера и робота $\mathbf{q}_P^i \in [\mathbf{q}_{P\max}^i, \mathbf{q}_{P\min}^i]$ и $\mathbf{q}_R^i \in [\mathbf{q}_{R\max}^i, \mathbf{q}_{R\min}^i]$.

Следует отметить, что в данной задаче оптимизация ведется по обобщенным координатам позиционера, а робот выступает в роли ограничения (так как требуется существование решения ОЗК для всех точек шва при заданном \mathbf{q}_P , оптимальных α, β и произвольном γ). Для решения данной задачи проведем сначала анализ достижимости углов ориентации шва ξ и θ в зависимости от ориентации изделия относительно планшайбы позиционера.

2. Анализ достижимости углов ориентации изделия

Как было показано в [12], типичный промышленный позиционер имеет ограниченное ориентационное пространство, т. е. кинематическая структура позиционера в общем случае не позволяет обеспечить произвольные углы ориентации шва (θ и ξ) относительно вектора гравитации. Однако на диапазон достижимых углов (θ и ξ) можно влиять путем ориентации шва относительно планшайбы позиционера, используя различную оснастку для крепления детали. Численные выражения для θ, ξ могут быть получены непосредственно из определения RPY-углов (крен, тангаж, рысканье) [13, 14], принимая во внимание, что нулевое значение углов θ, ξ определяет горизонтальную ориентацию оси X_w и вертикальную ориентацию Y_w :

$${}^0\mathbf{W}_R = \mathbf{R}_z(\psi) \cdot \mathbf{R}_y(\theta) \cdot \mathbf{R}_x(\pi/2 - \xi), \quad (5)$$

где ${}^0\mathbf{W}_R$ – подматрица ориентации шва размерностью 3x3; $\mathbf{R}_x, \mathbf{R}_y, \mathbf{R}_z$ – матрицы вращения вокруг осей X, Y, Z соответственно размерностью 3x3, а ψ – произвольный параметр. Перемножение этих матриц даст следующий результат:

$${}^0\mathbf{W}_R = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & C_\psi S_\theta C_\xi - S_\psi S_\xi & C_\psi S_\theta S_\xi + S_\psi C_\xi \\ S_\psi C_\theta & S_\psi S_\theta C_\xi + C_\psi S_\xi & S_\psi S_\theta S_\xi - C_\psi C_\xi \\ -S_\theta & C_\theta C_\xi & C_\theta S_\xi \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где C и S – сокращенное обозначение функций $\cos(.)$, $\sin(.)$ соответствующих углов, определенных в индексе. Анализируя элементы матрицы (6), получаем, что углы ориентации шва θ и ξ могут быть представлены в виде

$$\theta = \tan 2 \frac{-{}^0 n_w^z}{\sqrt{({}^0 s_w^z)^2 + ({}^0 a_w^z)^2}}; \quad \xi = \tan 2 \frac{{}^0 a_w^z}{{}^0 s_w^z}, \quad (7)$$

где \mathbf{n}_w , \mathbf{s}_w , \mathbf{a}_w – соответствующие векторы-столбцы ортогональной матрицы ${}^0 \mathbf{W}_R$.

Аналогичным образом определяется и ориентация шва относительно планшайбы позиционера (углы θ_w , ξ_w , ψ_w). Тогда ориентация шва в мировой системе координат будет описываться выражением

$${}^0 \mathbf{T}_F(q_1, q_2) \cdot {}^F \mathbf{T}_W(\theta_w, \xi_w, \psi_w) = {}^0 \mathbf{T}_W, \quad (8)$$

где ${}^0 \mathbf{T}_F(q_1, q_2)$ – матрица ориентации планшайбы позиционера относительно мировой системы координат (СК); ${}^F \mathbf{T}_W(\theta_w, \xi_w, \psi_w)$ – матрица ориентации шва относительно планшайбы; ${}^0 \mathbf{T}_W$ – матрица ориентации шва в мировой СК. С учетом равенства (7) и (8) выражения для углов θ и ξ будут иметь вид

$$\xi = \tan 2 \frac{{}^0 n_F^z \cdot {}^F a_w^x + {}^0 s_F^z \cdot {}^F a_w^y + {}^0 a_F^z \cdot {}^F a_w^z}{{}^0 n_F^z \cdot {}^F s_w^x + {}^0 s_F^z \cdot {}^F s_w^y + {}^0 a_F^z \cdot {}^F s_w^z}; \quad (9)$$

$$\theta = \tan 2 \frac{-({}^0 n_F^z \cdot {}^F n_w^x + {}^0 s_F^z \cdot {}^F n_w^y + {}^0 a_F^z \cdot {}^F n_w^z)}{\sqrt{({}^0 n_F^z \cdot {}^F s_w^x + {}^0 s_F^z \cdot {}^F s_w^y + {}^0 a_F^z \cdot {}^F s_w^z)^2 + ({}^0 n_F^z \cdot {}^F a_w^x + {}^0 s_F^z \cdot {}^F a_w^y + {}^0 a_F^z \cdot {}^F a_w^z)^2}}. \quad (10)$$

После соответствующих преобразований соотношение (9) примет вид

$$q_2 \in \left\{ \arcsin\left(\frac{c}{a^2+b^2}\right) - \varphi; \quad \pi - \arcsin\left(\frac{c}{a^2+b^2}\right) - \varphi \right\}, \quad (11)$$

где $a = \operatorname{tg}(\xi) C_\alpha S_1 {}^F s_w^x - \operatorname{tg}(\xi) C_\alpha S_\alpha V_1 {}^F s_w^y - C_\alpha S_1 {}^F a_w^x + C_\alpha S_\alpha V_1 {}^F a_w^y$, $c = {}^0 a_F^z ({}^F a_w^z - \operatorname{tg}(\xi) s_w^z)$;

$$b = \operatorname{tg}(\xi) C_\alpha S_\alpha V_1 {}^F s_w^x + \operatorname{tg}(\xi) C_\alpha S_1 {}^F s_w^y - C_\alpha S_\alpha V_1 {}^F a_w^x - C_\alpha S_1 {}^F a_w^y \text{ и } \varphi = \tan 2 \left(\frac{b}{a} \right).$$

Из выражения (10) получим

$$a S_2 + b C_2 + c S_2 C_2 + d S_2^2 + e C_2^2 + f = 0, \quad (12)$$

где

$$a = -2C_\alpha (C_1 + V_1 S_\alpha^2) (S_\alpha V_1 (T^2 ({}^F a_w^y {}^F a_w^z + {}^F s_w^y {}^F s_w^z) - {}^F n_w^y {}^F n_w^z) - T^2 S_1 ({}^F a_w^x {}^F a_w^z + {}^F s_w^x {}^F s_w^z) + S_1 {}^F n_w^x {}^F n_w^z); \quad (13)$$

$$b = 2C_\alpha (C_1 + V_1 S_\alpha^2) (S_\alpha V_1 (T^2 ({}^F s_w^x {}^F s_w^z + {}^F a_w^x {}^F a_w^z) - {}^F n_w^x {}^F n_w^z) + T^2 S_1 ({}^F a_w^y {}^F a_w^z + {}^F s_w^y {}^F s_w^z) - S_1 {}^F n_w^y {}^F n_w^z); \quad (14)$$

$$c = -2C_\alpha^2 \left\{ S_\alpha^2 V_1^2 (T^2 ({}^F s_w^x {}^F s_w^y + {}^F a_w^x {}^F a_w^y) - {}^F n_w^x {}^F n_w^y) + S_1^2 (-T^2 ({}^F s_w^x {}^F s_w^y - {}^F a_w^x {}^F a_w^y) + {}^F n_w^x {}^F n_w^y) \right. \\ \left. + S_\alpha V_1 S_1 \left(-T^2 \left(({}^F s_w^x)^2 + ({}^F s_w^y)^2 - ({}^F a_w^x)^2 + ({}^F a_w^y)^2 \right) + ({}^F n_w^y)^2 - ({}^F n_w^x)^2 \right) \right\}; \quad (15)$$

$$d = C_\alpha^2 \left(T^2 \left((S_1 {}^F s_w^x - {}^F s_w^y S_\alpha V_1)^2 + (S_1 {}^F a_w^x - {}^F a_w^y S_\alpha V_1)^2 \right) - ({}^F n_w^x S_1 - {}^F n_w^y S_\alpha V_1)^2 \right); \quad (16)$$

$$e = C_\alpha^2 \left(T^2 \left((S_1 {}^F s_w^y + {}^F s_w^x S_\alpha V_1)^2 + (S_1 {}^F a_w^y + {}^F a_w^x S_\alpha V_1)^2 \right) - ({}^F n_w^y S_1 + {}^F n_w^x S_\alpha V_1)^2 \right). \quad (17)$$

Используя далее для выражения (12) подстановку через тангенс половинного угла, приходим к уравнению четвертого порядка относительно $t = \operatorname{tg}(q_2/2)$:

$$(e - b + f)t^4 + 2(a - c)t^3 + 2(f - e + 2d)t^2 + 2(a + c)t + (b + e + f) = 0. \quad (18)$$

Полученное уравнение позволяет исследовать изменение области допустимых значений обобщенных координат позиционера q_1, q_2 при различной ориентации шва относительно планшайбы (θ, ξ). На рис. 3 в качестве примера приведены графики зависимости угла $q_2 = f(q_1, \xi)$ и $q_2 = f(q_1, \theta)$ при фиксированных значениях θ и ξ (линии равного уровня) и области оптимальности, в которых отклонения углов θ и ξ не превышают значения $\Delta_{\text{доп}}$, полученные на основе выражения (11) и в результате численного решения уравнения (18) при помощи пакета Matlab. Из анализа этих графиков следует, что максимальный объем ориентационного пространства будет получен при такой установке детали, при которой шов находится в положении, близком к оптимальному. При отклонении шва от оптимального положения можно наблюдать значительное изменение формы и объема ориентационного пространства, при дальнейшем отклонении (на угол более 30° при допуске $\Delta_{\text{доп}}=10^\circ$) объем и форма изменяются незначительно. Кроме того, из рис. 3 следует, что общее ориентационное пространство существует только для швов, имеющих небольшое взаимное отклонение (не превышающее $2\Delta_{\text{доп}}$).

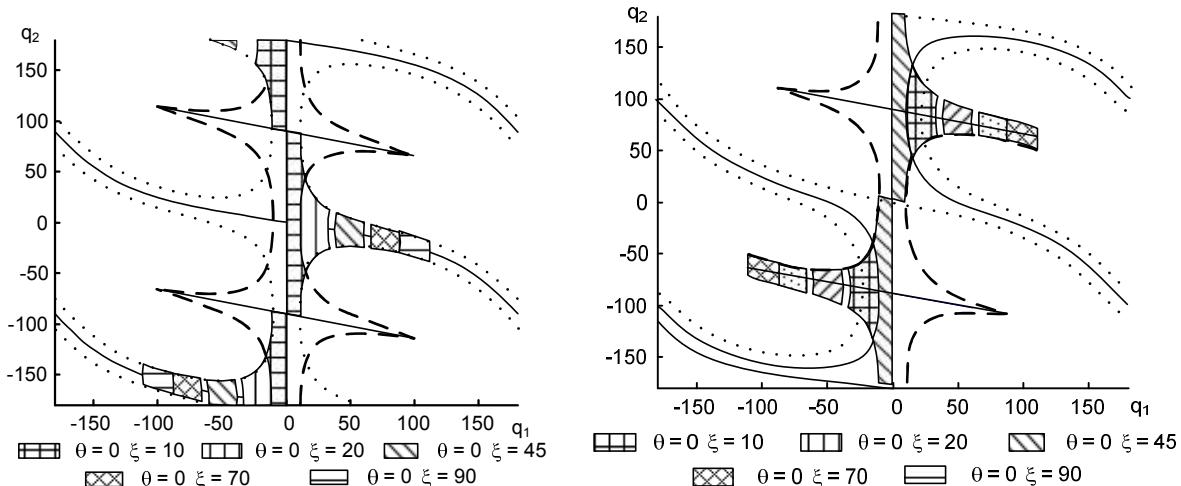


Рис. 3. Графики изменения ориентационного пространства позиционера

Таким образом, в группу швов, обрабатываемую при неизменной конфигурации позиционера, должны входить швы, имеющие близкую ориентацию, что ведет к значительному увеличению числа групп при обработке сложных деталей. Поэтому становится актуальной задача нахождения последовательности групп швов, обеспечивающей минимальные временные затраты на переход между группами.

3. Оптимальное управление при сварке нескольких групп швов

Пусть имеется последовательность из n групп швов $\{\mathbf{W}_i^1\}, \{\mathbf{W}_i^2\}, \dots, \{\mathbf{W}_i^n\}$ размером m_1, m_2, \dots, m_n соответственно, причем каждая группа швов обрабатывается в фиксированной конфигурации манипулятора $\mathbf{q}^k \in \mathbf{Q}^k$ из $\{\mathbf{Q}^1\}, \{\mathbf{Q}^2\}, \dots, \{\mathbf{Q}^n\}$, где \mathbf{Q}^k – множество конфигураций позиционера, в которых углы θ и ξ отклоняются от оптимума не более чем на заданную величину Δ_{max} . Тогда время обхода заданной последовательности групп швов определяется как

$$T' = \sum_{k=1}^n \max_i \left\{ \eta_i |q_i^k - q_i^{k+1}| \right\} \quad q_i^k \in \mathbf{Q}^k, \quad (19)$$

где η_i – весовые коэффициенты, определяемые скоростью движения звеньев позиционера. Однако критерий (19) не учитывает ряд технологических особенностей процесса дуговой сварки: при изменении конфигурации манипулятора необходимо вывести сварочную горелку из рабочей зоны, а затем вернуть ее обратно, что увеличивает общее время обхода последовательности групп швов; существуют переходы, равнозначные по времени, но различные по объему движения. Последняя особенность может быть пояснена на следующем примере: с точки зрения минимума критерия (19) переходы $\Delta q_1 = 4, \Delta q_2 = 2$ и $\Delta q_1 = 4, \Delta q_2 = 0$ равнозначны, однако первый переход требует движения вторым суставом, которое отсутствует во втором переходе. Для учета указанных особенностей введем в выражение (19) время отхода-подхода инструмента t_{app} и штраф на движение каждым суставом Ω :

$$T'' = \sum_{k=1}^n \left(\max_i \left\{ \eta_i |q_i^k - q_i^{k+1}| \right\} + t_{app} \cdot \begin{cases} 1, & q^k \neq q^{k+1} \\ 0, & q^k \equiv q^{k+1} \end{cases} + \sum_i \Omega \cdot \begin{cases} 1, & q_i^k \neq q_i^{k+1} \\ 0, & q_i^k \equiv q_i^{k+1} \end{cases} \right), \quad q_i^k \in \mathbf{Q}^k. \quad (20)$$

Следует заметить, что выражение (20) не включает время, затрачиваемое на заварку кратера в конце шва. Это объясняется тем, что заварка кратера производится при том же положении позиционера, что и варка шва, а следовательно, может быть включена в качестве постоянной составляющей времени обработки шва. Это позволяет использовать при оптимизации критерий (20).

Итак, задача оптимального управления манипулятором при сварке группы швов состоит в следующем: *необходимо найти такие значения \mathbf{q}^k , которые обеспечат минимум критерия (20) с учетом ограничений на конфигурацию манипулятора $\mathbf{q}^k \in \mathbf{Q}^k$, а также весовых коэффициентов η_i , определяемых скоростью движения каждого звена позиционера и временем подхода инструмента t_{app} .* Графическая интерпретация этой задачи может быть представлена как нахождение на плоскости \mathbf{q}_P такого оптимального пути, узловые точки которого принадлежат заданным множествам \mathbf{Q}^k и который обеспечивает минимум времени обхода (20). Заметим, что в этой задаче последовательность обхода групп швов считается заданной. Однако множества допустимых координат $\{\mathbf{Q}^1\}, \{\mathbf{Q}^2\}, \dots, \{\mathbf{Q}^n\}$, которым должны принадлежать узловые точки, в общем случае не являются связанными и могут состоять из ряда отдельных областей.

Поскольку области \mathbf{Q}^k имеют сложную форму, то целесообразно аппроксимировать их равномерной сеткой. Такая аппроксимация преобразует область поиска решений в направленный граф, каждый узел которого определяет вектор конфигурации позиционера \mathbf{q}^k . При этом ребра графа соединяют только те узлы сетки, которые соответствуют соседним областям в заданной последовательности $\{\mathbf{Q}^1\}, \{\mathbf{Q}^2\}, \dots, \{\mathbf{Q}^n\}$. Поэтому допустимое пространство поиска может быть представлено направленным графом с узлами

$$K = \left\{ \mathbf{q}_j^k \right\}, \quad \mathbf{q}_j^k \in \mathbf{Q}^k \quad (21)$$

и ребрами

$$E = \left\{ (\mathbf{q}_j^k, \mathbf{q}_l^{k-1}), \mathbf{q}^k \in \mathbf{Q}^k, \mathbf{q}^{k-1} \in \mathbf{Q}^{k-1}, k = 2, \dots, n, \forall j, l \right\}. \quad (22)$$

В результате рассматриваемая задача нахождения конфигураций позиционера для обработки последовательности групп швов сводится к следующей оптимизационной задаче на графе: для заданных множеств узлов K и множеств ребер E найти наилучший путь длины n

$$P = \langle \mathbf{Q}^1 \rightarrow \mathbf{Q}^2 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{Q}^n \rangle \quad (23)$$

с начальным узлом $K_0 \in \mathbf{Q}^0$ и конечным $K_n \in \mathbf{Q}^n$, который минимизирует критерий качества (20).

Для решения данной задачи используем метод динамического программирования, основанный на рекуррентном соотношении

$$T_{r+1}^*(p_j^{r+1}) = \min_i [T_r^*(p_i^r) + T(p_i^r, p_j^{r+1})], \quad (24)$$

где $T_r^*(p_i^r)$ – оптимальное значение времени перехода при обходе группы швов с индексами $1, \dots, r$. Данный метод обладает квадратичной сходимостью и позволяет найти оптимальное решение за приемлемое время.

Эффективность предложенного метода и его особенности проиллюстрируем на примере оптимизации движения позиционера для последовательности из семи групп швов (рис. 4). Требуется найти путь, обходящий эти группы в указанной последовательности и обеспечивающий минимум времени обхода (20).

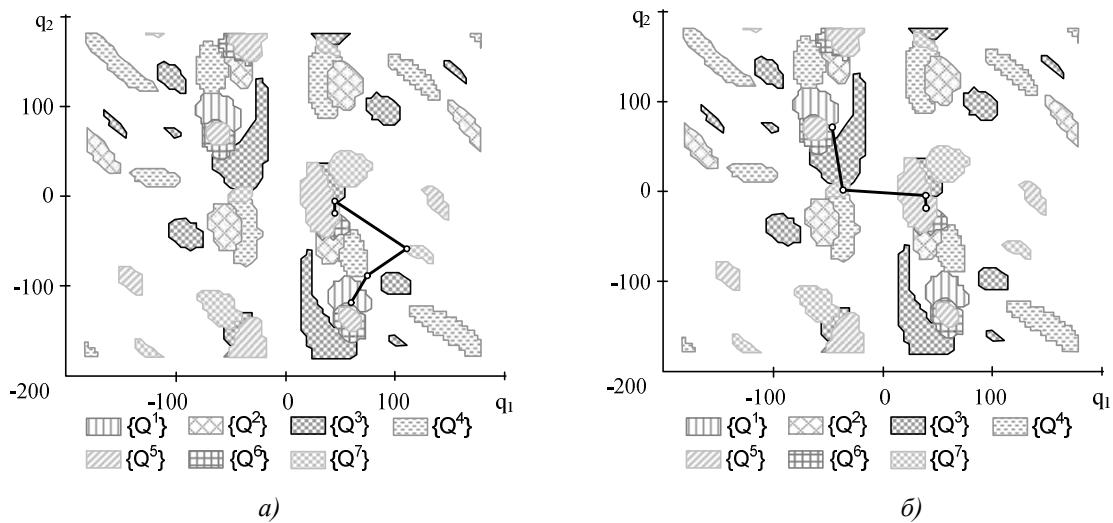


Рис. 4. Оптимальные конфигурации позиционера при обработке последовательности групп швов при различном t_{app} : а) $t_{app} = \{0, 5, 10\}$, б) $t_{app} \geq 20$

На рис. 4 показаны результаты работы алгоритма, построенного на базе выражения (24) для следующих входных параметров: весовых коэффициентов $\eta_i = 1$, штрафа на перемещение $\Omega = 0,1$ и переменного значения времени отхода/подхода t_{app} . Как следует из полученных результатов, при увеличении значения t_{app} алгоритм отдает предпочтение узловым точкам, находящимся на пересечении большего количества исходных множеств, что хорошо согласуется с физическим смыслом задачи. К тому же, учитывая, что каждому найденному положению соответствует группа (или несколько групп), а не отдельный шов, разработчик имеет возможность определить последовательность обработки швов внутри группы исходя из таких технологических требований, как уменьшение пластических деформаций и внутренних напряжений сварной конструкции.

Заключение

Скорость и качество шва при роботизированной дуговой сварке существенно зависят от ориентации сварного соединения в пространстве. Одним из способов управления ориентацией шва во время сварки является совместное использование сварочного робота и позиционера, исполняющего роль манипулятора изделия.

Задачу оптимального управления позиционером можно разбить на три подзадачи: анализ возможных ориентаций шва в зависимости от ориентации детали относительно позиционера; минимизацию времени обработки отдельной группы швов, которая обеспечивается оптимальным расположением детали относительно вектора гравитации; минимизацию времени перехода между группами за счет нахождения оптимальной последовательности обработки групп.

В работе предложены методы решения поставленных задач. При этом учитывается, что каждая группа должна обрабатываться в положении, близком к оптимальному, а также такие особенности процесса сварки, как затраты времени на отвод/подвод инструмента и исключение переходов, обеспечивающее одинаковое время при разном количестве движения позиционера. Поскольку области оптимальности для групп швов имеют сложную прерывистую форму, то они аппроксимируются равномерной сеткой. Такая аппроксимация преобразует область поиска решений в направленный граф, каждый узел которого определяет вектор конфигурации позиционера. При этом ребра графа соединяют только те узлы сетки, которые соответствуют соседним областям в заданной последовательности. В результате рассматриваемая задача сводится к задаче нахождения кратчайшего пути на графе, для решения которой применяется метод динамического программирования. Эффективность предложенного метода и его особенности иллюстрируются на примере оптимизации движения позиционера при сварке реального изделия. Перспективным направлением будущих исследований является компоновка нескольких изделий на позиционере и оптимизация управления манипуляционной системой для такого случая.

Список литературы

1. Бернадский В.Н. Промышленные роботы в сварочном производстве // Сварщик. – 2001. – № 5. – С. 4–5.
2. Тимченко В.А. Роботы в сварочном производстве // Сварщик. – 1998. – № 2. – С. 8–9.
3. Куликов В.П. Технология сварки плавлением: учеб. пособие. – Мн.: Дизайн ПРО, 2001. – 254 с.
4. Виноградов В.С. Оборудование и технология дуговой автоматической и механизированной сварки: учеб. – М.: Высшая школа, 2000. – 318 с.
5. Лупачев В.Г. Дуговая сварка в вопросах и ответах. – Мн.: Дизайн ПРО, 1999. – 240 с.
6. Bolmsjö G. Programming robot systems for arc welding in small series production // Robotics & Computer-Integrated Manufacturing. – 1989. – № 5(2/3). – P. 199–205.
7. Bolmsjö G. A kinematic description of a positioner and its application in arc welding robots // Proceedings of the second international conference on developments in automated and robotic welding. – London: The Welding Institute, 1987.
8. eM-Workplace digital manufacturing environment for robotic workcells // http://www.tecnomatix.com/downloads/products_eM-Workplace.pdf
9. Nikoleris G. A Programming System for Welding Robots // International Journal for the Joining of Materials. – 1990. – №2(2). – P. 55–61.
10. Bolmsjö G. Olsson M. Cederberg P. Robotic arc welding – trends and developments for higher autonomy // Industrial Robot. – 2002. – № 29(2). – P. 98–104.
11. Справочник по специальным работам. Сварочные работы в строительстве / Под ред. проф. В.Д. Тарака. – М.: Изд-во лит. по строительству, 1971. – 321 с.
12. Pashkevich A.P., Dolgui A.B., Semkin K.I. Kinematic aspects of a robot-positioner system in an arc welding application // Control Engineering Practice. – Vol. 11. – №. 6. – June 2003. – P. 633–647.
13. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 624 с.
14. Craig J. Introduction to Robotics, Mechanics and Control. – Addison-Wesley Publication, 1989. – 464 p.

15. Numerical optimization: theoretical and practical aspects / J. Frederic Bonnans et al. – Berlin; New York: Springer, 2003. – 419 p.

Поступила 25.11.04

*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,
Минск, П. Бровки, 6
e-mail: semkink@yandex.ru*

K.I. Siomkin

**COMPUTER-AIDED DESIGN OF ARC WELDING CELLS BASED
ON ROBOT-POSITIONER SYSTEMS**

The paper focuses on the problem of computer-aided design of arc welding robot-positioner manufacturing cells. It analyzes the accessibility of weld joint orientation and proposes the optimization algorithm, which minimizes the group-to-group motion time of the positioner.