



## АЛГОРИТМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ МНОГОПРОХОДНОЙ СВАРКИ МИГ/МАГ ИЗДЕЛИЙ С ПЕРЕМЕННОЙ ШИРИНОЙ РАЗДЕЛКИ КРОМОК

Т. Г. СКУБА, В. В. ДОЛИНЕНКО, В. А. КОЛЯДА, Е. В. ШАПОВАЛОВ

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Область исследований — автоматизация процессов многопроходной сварки МИГ/МАГ толстостенных изделий в нижнем положении. Цель исследований — получение сварного шва заданной ширины и усиления, не имеющего непроваров и подрезов при наличии внешних возмущающих воздействий в виде изменений геометрических параметров разделки кромок стыка (выборки). Задача исследований — разработка алгоритма технологической адаптации, который обеспечивает заданную высоту свариваемого слоя. Методика исследований — синтез математической модели на базе уравнений, содержащих как феноменологические описания процессов, так и регрессионные зависимости. Предложен алгоритм технологической адаптации разделки кромок стыка на базе средств технического зрения для многопроходной сварки МИГ/МАГ. Алгоритм обеспечивает в режиме реального масштаба времени на основе текущих геометрических параметров разделки кромок, расчет режима автоматической сварки (напряжения, тока и скорости сварки). В алгоритме используется разработанная математическая модель «источник питания – дуга установившегося процесса сварки МИГ/МАГ». Для проверки алгоритма выполнены сварочные эксперименты, в которых на стальную пластину наплавляли слой металла постоянной толщины 0,2 см с изменяющейся при этом шириной 2,0...3,3 см. Диапазон изменения погонной энергии сварки — 4,0...8,5 кДж/см, частота коротких замыканий — 5...54 Гц. Обрывов дуги не наблюдалось, дефекты макроструктуры наплавленного слоя отсутствовали. Предлагаемый алгоритм технологической адаптации можно рекомендовать к применению в АСУТП многопроходной сварки. Библиогр. 21, рис. 8.

*Ключевые слова:* многопроходная сварка МИГ/МАГ, технологическая адаптация, слой постоянной высоты, математическая модель, режим сварки

Многопроходная сварка МИГ/МАГ применяется при изготовлении и ремонте конструкций ответственных изделий с целью обеспечения высокого качества сварных соединений [1–5]. Применение роботизированной сварки с использованием средств технического зрения [6] позволяет обеспечить стабильность и повторяемость качества формирования сварного соединения, так как устраняет субъективный фактор — квалификацию сварщика. Одной из задач технологической адаптации многослойной роботизированной сварки является получение качественного сварного шва с требуемым усилением при максимально возможной производительности. Решением поставленной задачи является разработка алгоритма технологической адаптации, который на основе текущих геометрических параметров разделки позволял бы формировать вектор параметров оптимального режима автоматической сварки: напряжение, ток и скорость сварки. Известны методики решения этой задачи на основе полнофакторных активных экспериментов. Например, в работах [7, 8] синтезируются регрессионные модели, которые ис-

пользуются для формирования оптимального управления процессом сварки.

В настоящее время созданию систем адаптивного управления сваркой МИГ/МАГ уделяется большое внимание за рубежом [9–12]. Однако в полной мере задача обеспечения оптимального режима многопроходной сварки не решена.

В данной статье рассмотрена разработка алгоритма технологической адаптации для роботизированной многопроходной сварки МИГ/МАГ массивных изделий в нижнем положении.

Рассмотрим многопроходную дуговую сварку, при которой заполняется V-образная разделка (рис. 1, а) или выборка в изделии (рис. 1, б) слоями одинаковой высоты.

Первым этапом технологической адаптации является сканирование разделки (выборки) лазерным триангуляционным сенсором (ЛТС). По результатам сканирования делается вывод — геометрические параметры разделки остаются постоянными либо изменяются на всем ее протяжении.

В первом случае при постоянной геометрии разделки (выборки) технологическая адаптация

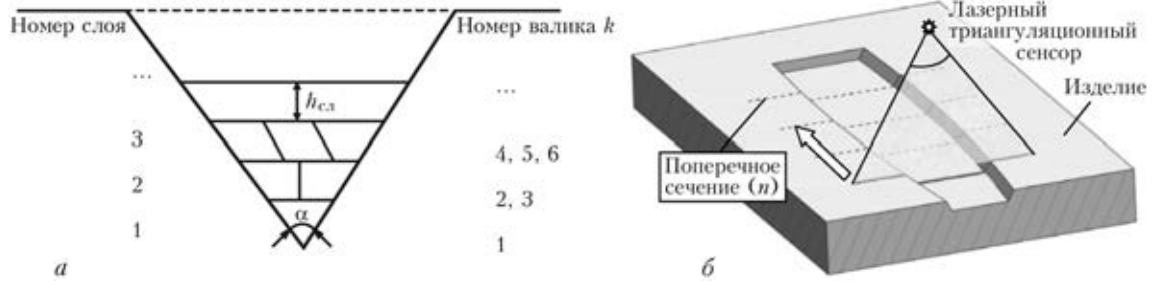


Рис. 1. Схемы многопроходной сварки: *a* — заполнение V-образной разделки слоями постоянной высоты ( $\alpha$  — угол разделки;  $h_{сл}$  — высота слоя, см); *б* — заполнение выборки в изделии (продольными сварными швами)

для многопроходной сварки МИГ/МАГ связана с наплавкой валиков на разных  $n$ -х слоях (рис. 1, *a*) и состоит в расчете режима наплавки для каждого  $k$ -го валика. Параметры режима наплавки остаются постоянными по всей длине наплавляемого валика.

Во втором случае при переменной геометрии разделки технологическая адаптация может быть связана, например, с изменением угла разделки вдоль линии стыка (рис. 1, *a*) или с изменяющейся формой выборки (рис. 1, *б*). Для компенсации указанных возмущений необходимо управлять режимом сварки в процессе наплавки каждого  $k$ -го валика. Таким образом, при укладке слоя постоянной высоты в разделку с изменяющейся шириной необходимо постоянно регулировать поперечное сечение каждого валика в слое в реальном масштабе времени.

**Формулирование концепции технологической адаптации для многослойной многопроходной сварки.** Рассмотрим  $n$ -е поперечное сечение наплавляемого слоя (рис. 1, *б*), которое имеет форму трапеции (в общем случае трапеция не является равнобедренной) с площадью  $S_n[n]$  (рис. 2).

Площадь поперечного сечения  $S_n[n]$  рассчитываем по формуле

$$S_n[n] = l_n[n]h_{сл} + \frac{h_{сл}^2}{2}(\text{tg } \theta_n[n] + \text{tg } \theta_n[n]), \quad (1)$$

где  $l_n[n]$  — ширина нижней поверхности слоя, см;  $\theta_n[n]$ ,  $\theta_n[n]$  — угол наклона поверхности левой и правой кромки, град.

Наплавляемый слой состоит из целого количества валиков  $N$ , площади поперечного сечения которых  $F_n[k]$  для каждого  $S_n[n]$  имеют одинаковые значения:

$$F_n[k] = \frac{S_n[n]}{N}, \quad (2)$$

где  $k$  — номер валика.

Ширину валика  $E[k]$  рассчитываем по следующей формуле:

$$E[k] = \frac{l_n[k]}{(N - 2K_{б.к} - (N - 1)K_{с.в})}, \quad (3)$$

где  $K_{б.к}$  — коэффициент, определяющий величину перекрытия крайних в слое валиков с боковыми кромками изделия;  $K_{с.в}$  — коэффициент, определяющий величину перекрытия между соседними валиками в слое. Здесь  $K_{б.к} = 0,135$  и  $K_{с.в} = 0,27$ .

Целью данной работы является разработка такого алгоритма адаптивного управления сваркой, который для каждого  $E[k]$  и  $F_n[k]$  позволяет рассчитать параметры режима сварки МИГ/МАГ: напряжение  $U$ , ток  $I$  и скорость сварки  $v_{св}$ .

В первой части алгоритма технологической адаптации для расчетных значений ширины валика  $E[k]$  определяют требуемые значения погонной энергии. Рассмотрим случай наплавки валика на поверхность массивного тела. Ширину зоны на поверхности изделия, ограниченной изотермами температуры плавления  $T_{пл}$ , можно определить из следующего уравнения [13]:

$$E[k] = \sqrt{\frac{8q_n[k]}{\pi c \gamma \Delta T}}, \quad (4)$$

где  $q_n[k]$  — погонная энергия сварки, Дж/см;  $c \gamma$  — объемная теплоемкость, Дж/(см<sup>3</sup>·°C);  $\Delta T = (T_{пл} - T_0)$ , °C;  $T_{пл}$  — температура плавления стали, °C;  $T_0$  — начальная температура изделия, °C;  $\pi$ ,  $e$  — константы ( $\pi = 3,14159265$ ,  $e = 2,71828183$ ).

Расчеты по формуле (4) позволяют получать значения погонной энергии с погрешностью более 8 % [14], что для поставленной задачи неприемлемо. При известном подходе можно повысить точность расчетов путем введения дополнительного коэффициента [15]. Экспериментально для диапазона изменений погонной энергии 4200...8400 Дж/см получен поправочный коэффициент  $K_q$ , который уменьшает погрешность рас-

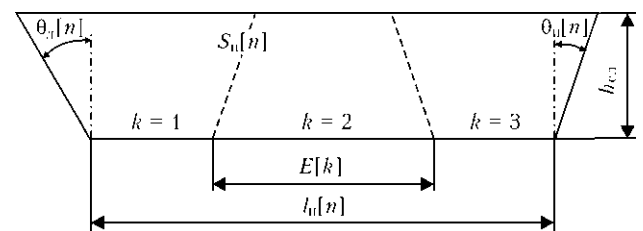


Рис. 2. Схема  $n$ -го поперечного сечения наплавляемого слоя



четов до 5 %. Тогда уравнение (4) запишется следующим образом:

$$q_n[k] = K_q \frac{\pi e}{8} E[k]^2 c \gamma \Delta T, \quad (5)$$

где  $q_n[k]$  — экспериментальные данные погонной энергии сварки, Дж/см;  $K_q = 1,05 - 0,6 \cdot 10^{-4} q_n$ . После их подстановки уравнение (5) принимает вид

$$q_n[k] \cong \frac{1,121 E[k]^2 c \gamma \Delta T}{1 + 6,405 \cdot 10^{-5} E[k]^2 c \gamma \Delta T} \quad (6)$$

Вторая часть алгоритма технологической адаптации — это решение системы феноменологических и регрессионных уравнений, описывающих сварку МИГ/МАГ в установившемся состоянии. Входными данными являются ширина валика  $E[k]$ , площадь поперечного сечения наплавляемого валика  $F_n[k]$  и погонная энергия сварки  $q_n[k]$ :

$$q_n[k] = \frac{I[k] U[k] \eta_3}{v_{cb}[k]}, \quad (7)$$

$$I[k] = (86,58 + 18,94 v_{nn}[k] - 4,2 U[k] + 0,17 U v_{nn}[k] - 0,46 v_{nn}[k]^2 + 0,09 U[k]^2), \quad (8)$$

$$F_n[k] = \frac{\pi d_3^2 v_{nn}[k] (1 - \psi)}{4 v_{cb}[k]}, \quad (9)$$

$$v_{nn}[k] = \frac{K[k] U[k] j_3[k] + 10^4 \rho_3 j_3[k]^2 L_3[k]}{M}, \quad (10)$$

$$K[k] = (0,285 - 0,0052 U[k]), \quad (11)$$

$$j_3[k] = \frac{4 I[k]}{\pi d_3^2}, \quad (12)$$

$$v_{nn}[k] = v_{nn}[k], \quad (13)$$

где  $L_3$  — длина вылета электрода, см;  $v_{nn}$  — скорость подачи проволоки, см/с;  $v_{пл}$  — среднее интегральное значение скорости плавления электродной проволоки, см/с;  $K$  — коэффициент, определяющий затраты тепла на нагрев и плавление проволоки,  $1/\text{см}^2$ ;  $M$  — теплофизическая константа электродной проволоки, Дж/см<sup>3</sup>;  $d_3$  — диаметр электрода, равный 0,12 см;  $j_3$  — плотность тока электродной проволоки, А/см<sup>2</sup>;  $\rho_3$  — среднее значение удельного электросопротивления электродного металла, Ом/см;  $\eta_3$  — эффективный КПД процесса нагрева изделия дугой;  $\psi$  — коэффициент, учитывающий потери присадочного металла на разбрызгивание и угар.

Значение  $q_n[k]$  определяется по формуле (7) [16]. Уравнение (8) является регрессионным и позволяет рассчитать скорость подачи электродной

проволоки. Оно синтезировано авторами для режима сварки МИГ/МАГ со следующими значениями: источник питания дуги «Fronius TransPuls Synergic-5000» на обратной полярности, в среде защитного газа 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>, диаметр электрода 0,12 см, диапазон тока сварки 200...300 А и напряжений сварки 22...30 В. Значение площади сечения наплавленного валика рассчитывается из уравнения (7) [1]. Скорость плавления проволоки рассчитывается из уравнений (10), (11) для установившегося режима сварки МИГ/МАГ при изменении напряжения сварки в диапазоне 15...35 В [17]. Из уравнения (12) рассчитывается плотность тока в круглом проводнике. Уравнение (13) описывает устойчивость процесса каплепереноса в системе источник питания — дуга при сварке МИГ/МАГ.

Решение системы уравнений (7)–(13) позволяет получить требуемые значения скорости подачи проволоки  $v_{nn}[k]$ , напряжения сварки  $U[k]$  и скорости сварки  $v_{cb}[k]$  для  $k$ -го сечения текущего валика многопроходного шва.

Исследование системы уравнений (6)–(13) показывает, что во многих случаях нельзя получить единственное решение. Поэтому целесообразно применить метод поиска численного решения по критерию минимальной среднеквадратичной ошибки. С этой целью сформированы дополнительные условия, которые, во-первых, обеспечивают устойчивый режим сварки МИГ/МАГ [18]; во-вторых, минимизируют среднеквадратические погрешности решения; в-третьих, обеспечивают максимальную производительность процесса сварки. В результате составлена следующая система неравенств, которая задает ограничения для алгоритма поиска решения системы уравнений (6)–(13):

$$I_{\min} < I[k] < I_{\max}, \quad (14)$$

$$A_3 I[k] < U[k] < A_4 I[k], \quad (15)$$

$$\delta_{F_n[k]} = \sqrt{\left( \frac{\left( \frac{F_n[k] - \pi(d_3)^2 v_{nn}[k] (1 - \psi)}{4 v_{cb}[k]} \right)^2}{F_n[k]} \right)} < \delta_{F_{n \max}}, \quad (16)$$

$$\delta_{v_{nn}[k]} = \sqrt{\left( \frac{v_{nn}[k] - v_{nn}[k]}{v_{nn}[k]} \right)^2} < \delta_{v_{nn \max}}, \quad (17)$$

$$v_{cb}[k] > v_{cb \min}. \quad (18)$$

где  $I_{\min}$ ,  $I_{\max}$  — значения верхнего и нижнего предела для тока сварки;  $A_3$ ,  $A_4$  — коэффициенты, задающие ограничения для напряжения сварки, которые обеспечивают устойчивый режим сварки



МИГ/МАГ в выбранном диапазоне токов сварки [18, 19];  $\delta_{F_n}$ ,  $\delta_{v_{п.п}}$  — относительная фактическая и максимально допустимая погрешность между расчетным значением сечения наплавки и заданным;  $\delta_{v_{п.п}}$ ,  $\delta_{v_{п.п \max}}$  — относительное фактическое и максимально допустимое отклонение расчетного значения скорости подачи проволоки относительно скорости ее плавления;  $v_{св \min}$  — минимальное значение скорости сварки, при котором обеспечивается необходимый уровень рентабельности при применении автоматической многопроходной сварки.

Для совместного решения системы уравнений (6)...(13) и ограничений (14)...(18) использовали нелинейные методы поиска локальных экстремумов такие, как алгоритм Левенберга–Марквардта, метод сопряженных градиентов или квазиньютоновские методы [20]. Проверку математической модели и алгоритмов ее решения выполняли в математическом пакете Mathcad с использованием оператора «Minerr» [21], который позволяет задать один из трех методов решения: «Levenberg-Marquardt», «Conjugate Gradient» или «Quasi-Newton».

В качестве примера решена задача наплавки слоя высотой 0,2 см с изменяющейся шириной от 2,0 до 3,3 см на пластину углеродистой стали толщиной 1,2 см. Материал электродной проволоки Св-08Г2С-О. Геометрические параметры  $S_n[n]$  рассчитаны с интервалом 3 см по формуле (1) на основе геометрических характеристик проекций лазерной плоскости на разделку свариваемого изделия, полученных с помощью ЛТС. В итоге геометрическая модель изменения поперечного сечения слоя представляет собой кривую, состоящую из отрезков прямых, соединяющих соседние точки расчетных значений  $S_n[n]$ , где  $n = 1 \dots 8$ , в зависимости от продольной координаты  $x$  (рис. 3).

Отметим, что для обеспечения корректного выполнения технологических операций «поджиг

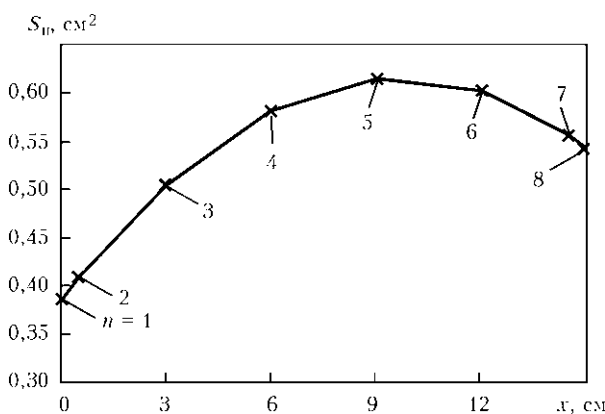


Рис. 3. Кривая изменения поперечного сечения наплавляемого слоя (использована линейная интерполяция между расчетными точками)

дуги» и «заварка кратера» специально добавлены две точки с номерами 2 и 7.

На основании общей геометрической модели многопроходного шва сформированы траектории перемещения горелки для сварки трех заполняющих валиков и двух вспомогательных (краевых), которые имитируют края выборки (рис. 4). Рассмотрение задачи расчета траекторий горелки для автоматической многопроходной сварки выходит за рамки данной статьи.

На основании результатов анализа минимального и максимального значений поперечных сечений слоя (рис. 3) и с учетом допустимого для разработанной математической модели диапазона погонной энергии 4200...8400 Дж/см рассчитаем необходимое количество валиков в слое  $n = 3$ . Принимаем, что площади поперечных сечений всех заполняющих валиков  $F_n[k]$  в одном и том же сечении слоя одинаковы. Поэтому массив исходных значений поперечных сечений валиков следующий:

$$F_n[k] = (0,128; 0,136; 0,168; 0,194; 0,205; 0,201; 0,185; 0,181), \text{ см}^2. \quad (19)$$

Массив значений ширины валиков находим по формуле (3)

$$E[k] = (0,83; 0,88; 1,10; 1,27; 1,35; 1,32; 1,22; 1,18), \text{ см}. \quad (20)$$

Массив данных для погонной энергии сварки получаем по формуле (6)

$$q_n[k] = (4244, 4651, 6344, 7592, 8091, 7902, 7177, 6964), \text{ Дж/см}. \quad (21)$$

Расчет режимов сварки выполнен при следующих значениях теплофизических и технологических констант:  $\eta_3 = 0,8$ ;  $c\gamma = 4,9 \text{ Дж}/(\text{см}^3 \cdot \text{°C})$ ;

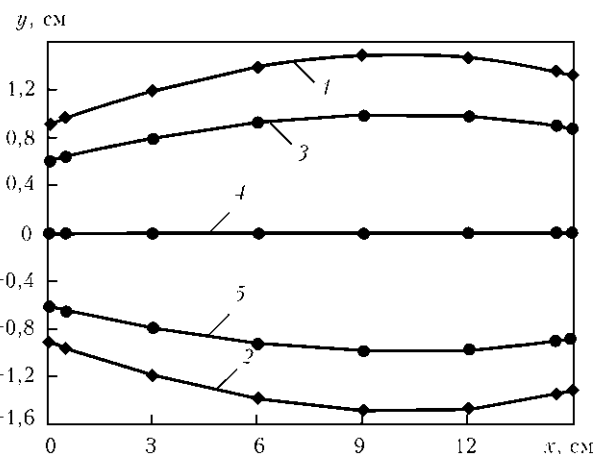


Рис. 4. Траектории перемещения горелки при наплавке слоя;  $x, y$  — координаты продольного и поперечного перемещения горелки; 1, 2 — вспомогательные крайние валики; 3–5 — основные заполняющие валики

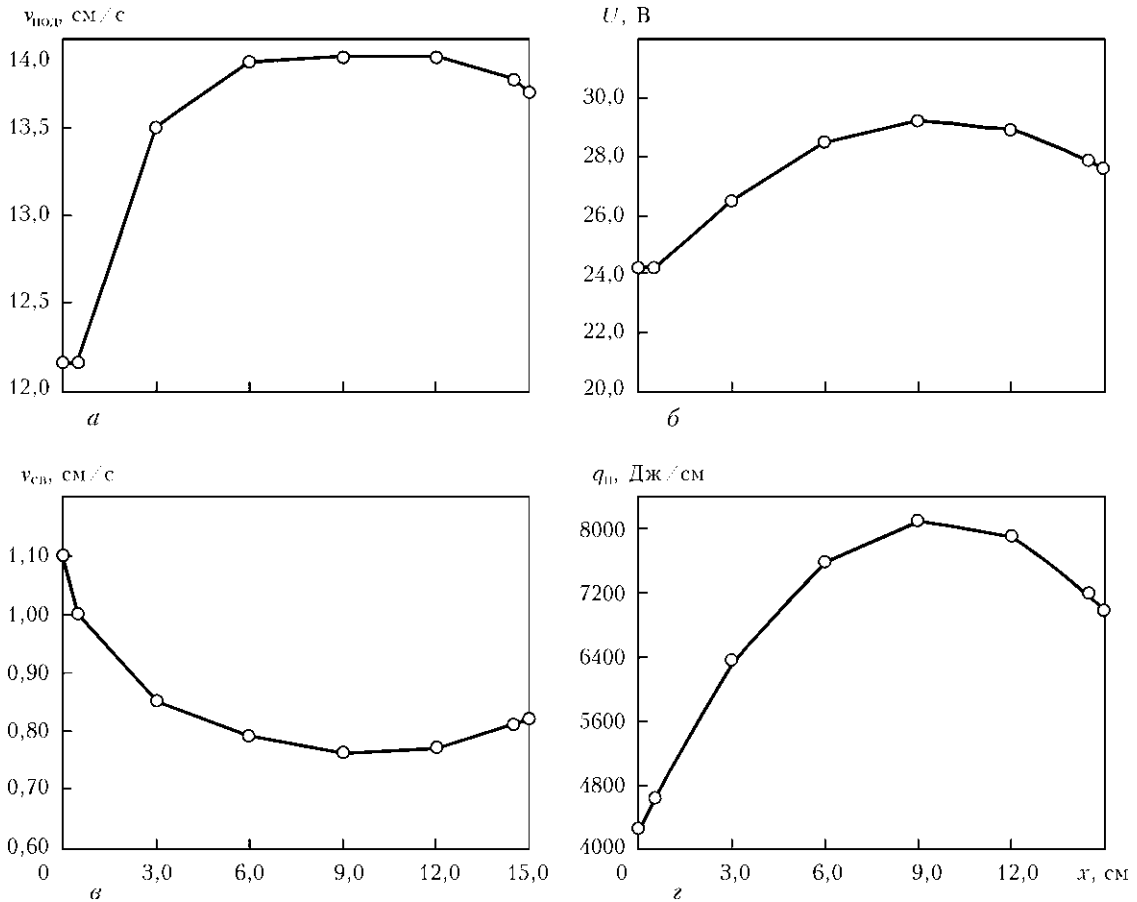


Рис. 5. Кривые изменения параметров режима сварки валиков (а–г) в шве при выполнении многопроходного слоя изменяющейся ширины

$\psi = 0,1$ ;  $\rho_3 = 0,777 \cdot 10^{-6}$  Ом/см;  $M = 9,75 \cdot 10^3$  Дж/см<sup>3</sup>;  $T_{пл} = 1520$  °С;  $T_0 = 200$  °С;  $I_{min} = 195$  А;  $I_{max} = 300$  А;  $A_3 = 0,1$ ;  $A_4 = 0,116$ ;  $v_{св min} = 0,75$  см/с;  $\delta_{F_n max} = 0,05$ ;  $\delta_{v_{п.п max}} = 0,1$ .

Для поиска решения использован пакет Mathcad. Применение метода «Levenberg-Marquardt» к системе уравнений (7)–(13) с ограничениями (14)–(18) позволило получить следующие значения параметров режимов многопроходной сварки:

$$v_{под}[k] = (12,16; 12,16; 13,50; 13,87; 13,90; 13,90; 13,77; 13,70), \text{ см/с}, \quad (22)$$

$$U[k] = (24,2; 24,2; 26,5; 28,5; 29,2; 28,9; 27,9; 27,6), \text{ В}, \quad (23)$$

$$v_{св}[k] = (1,1; 1,0; 0,85; 0,79; 0,76; 0,77; 0,81; 0,82), \text{ см/с}, \quad (24)$$

$$\delta_{F_n p100} = (4,6; 3,4; -1,1; 2,1; 3,3; 2,8; 1,1; 0,6), \text{ \%}, \quad (25)$$

$$\delta_{v_{п.п}}[k] \cdot 100 = (8,0; 8,0; 11,5; 16,1; 17,5; 17,0; 14,8; 14,1), \text{ \%}. \quad (26)$$

При задании текущего режима сварки промежуточные значения для уставок параметров ре-

жима рассчитывали методом линейной интерполяции. Графики результирующих функций изображены на рис. 5 (график изменения  $q_n$  приведен для проверки расчетов).

Отметим, что расчет режимов сварки с использованием оператора Mathcad «Minerr» на ПЭВМ с процессором Intel Core(TM)2 Quad CPU 2.50GHz и объемом ОЗУ 2Гб длится менее 1 с. Поэтому такой подход может быть использован в системе адаптивного управления в реальном масштабе времени.

Анализ полученных решений для режимов многопроходной сварки показывает, что ожидаемые погрешности формирования валиков по таким параметрам, как сечение наплавки и ширина валиков не превышают 5 %, что гарантирует равномерную наплавку слоя. Рассогласование скоростей плавления и подачи электродной проволоки не превышает 20 %. Расчетные режимы многопроходной сварки МИГ/МАГ обеспечивают высокую производительность технологической операции наплавки слоя толщиной 0,2 см: скорость сварки варьируется от 0,76 до 1,1 см/с, а ток сварки — от 241 до 262 А.

**Экспериментальная проверка алгоритма технологической адаптации.** Для проверки расчетных режимов многопроходной сварки были

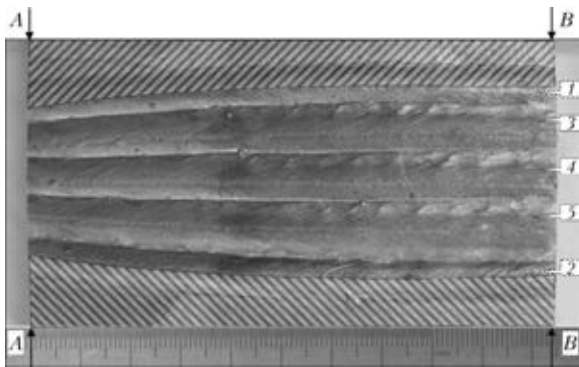


Рис. 6. Макрошлиф наплавленного слоя (заштрихованные области имитируют выборку в разрезе): 1, 2 — вспомогательные краевые валики; 3–5 — основные заполняющие валики

проведены эксперименты по наплавке на пластину низкоуглеродистой стали слоя толщиной 0,2 см. Наплавляемый слой состоял из пяти валиков: двух вспомогательных, которые имитируют края выборки, и трех заполняющих. Сварку производили в смеси газов 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> (25 л/мин),  $d_w = 0,12$  см,  $L_w = 1,4$  см. Температуру

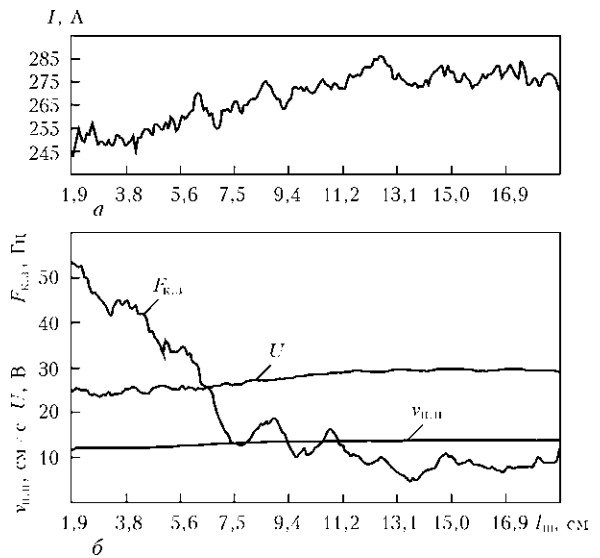


Рис. 7. Тренды изменения параметров режима сварки МИГ/МАГ при реализации алгоритма технологической адаптации (валик № 3): а — ток сварки  $I$ ; б — частота коротких замыканий дугового промежутка  $F_{к.з}$ , напряжение сварки  $U$  и скорость подачи проволоки  $v_{п.п}$

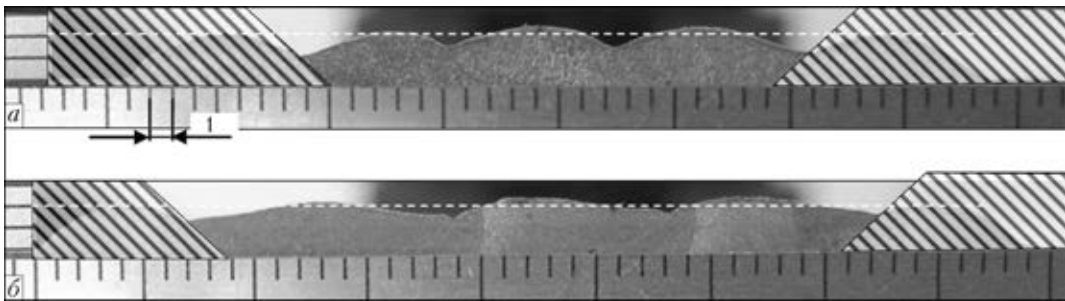


Рис. 8. Макрошлифы наплавленного слоя с использованием многопроходной сварки МИГ/МАГ (заштрихованные области имитируют выборку в разрезе): а — начальный участок слоя (сечение А–А рис. 6); б — конечный участок слоя (сечение В–В рис. 6)

изделия измеряли ТХА термопарами, что позволило контролировать температуру подогрева  $T_0$  с помощью технологических остановок между наплавками валиков. Как видно из внешнего вида наплавленного слоя (рис. 6), величины перекрытий между валиками соответствуют заданным, а потери на угар и разбрызгивание удовлетворительные.

Выполнен анализ устойчивости процесса сварки на базе зарегистрированных и усредненных значений (трендов)  $U$ ,  $I$ ,  $v_{п.п}$  и частоты коротких замыканий дугового промежутка  $F_{к.з}$ . На рис. 7 показаны тренды технологических параметров сварки валика № 3 по всей длине шва  $l_w$  (кроме интервалов «поджиг дуги» и «заварка кратера»). Анализ полученных трендов показывает, что фактические изменения параметров режима сварки соответствовали расчетным кривым изменений уставок (см. рис. 5). Процесс сварки МИГ/МАГ имел устойчивый характер. Параметр  $F_{к.з}$  изменялся в диапазоне от 54 до 5 Гц, что соответствует допустимому при сварке МИГ/МАГ изменению

характера каплепереноса от мелко- к крупнокапельному. Обрывов дуги не наблюдалось.

Выполнен анализ макрошлифа наплавленного слоя (рис. 8), показавший хорошее качество наплавленного слоя, в котором отсутствовали шлаковые включения и поры. Погрешности по ширине и высоте полученного слоя не превышают 5 %. Высота слоя (штриховая линия на рис. 8) остается постоянной на всем его протяжении.

Результаты экспериментальной проверки разработанного алгоритма технологической адаптации показывают, что предложенный алгоритм управления режимами сварки по  $I$ ,  $U$  и  $v_{св}$  позволяет получить слой заданной ширины и высоты с отсутствием дефектов. Высокая скорость расчета режимов сварки позволяет применять разработанный алгоритм в системах технологической адаптации для роботизированной многопроходной сварки МИГ/МАГ изделий большой толщины с переменной шириной разделки кромок.



1. *Березовский Б. М.* Математические модели дуговой сварки: В 3 т. Т. 2. Математическое моделирование и оптимизация формирования различных типов сварных швов. — Челябинск: ЮУрГУ, 2003. — 601 с.
2. *Разработка* высокоэффективных способов дуговой сварки и их применение / Н. Киндзи, К. Кобаяси, Д. Исии, Х. Ямяока // Автомат. сварка. — 2003. — № 10/11. — С. 59–63.
3. *Дослідження* та розробка технології електродугового зварювання рейкових закінчень залізничних хрестовин стрілочних переводів / В. Д. Позняков, В. М. Кір'яков, О. А. Гайворонський та ін. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Зб. наук. — К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ, 2009. — С. 579–584.
4. *Ремонтная* сварка корпусных деталей турбин из теплоустойчивых сталей без последующей термообработки / А. К. Царюк, В. Д. Иваненко, В. В. Волков и др. // Там же. — 2009. — С. 519–524.
5. *Memhard D., Pfeiffer W., Siegele D.* Determination of residual stress in multipass weldments of high strength steels with experimental and numerical techniques // Intern. conf. «WELDS-2005», GKSS Research Centre Geesthacht, 8–9 Sept., 2005. — P. 1–14.
6. *Гладков Э. А.* Управление процессами и оборудованием при сварке: Учеб. пособие для вузов. — М.: Академия, 2006. — 429 с.
7. *Srimath N., Murugan N.* Prediction and optimisation of weld bead geometry of plasma transferred arc hardfaced valve seat rings // Europ. J. Sci. Res. — 2011. — 51, № 2. — P. 285–298.
8. *Choteborsky R., Navratilova M., Hrabe P.* Effects of MIG process parameters on the geometry and dilution of the bead in the automatic surfacing // Res. Agr. Eng. — 2011. — 57. — P. 56–62.
9. *Muligan S. J.* Development of laser vision-based adaptive control of robotic multipass MAG welding. — TWI Ltd., Granta Park, Great Abington Cambridge, May, 2007. — 49 p.
10. *Moon H. S., Beattie R. J.* A fully automated adaptive pressure vessel welding system // American Welding Society AWS conf., Orlando, Florida, 17–18 Sept., 2002. — P. 1–6.
11. *Moon H. S., Beattie R. J.* Development of adaptive fill control for multitorch multipass submerged arc welding // Int. J. Adv. Manuf. Technol. — 2002. — P. 867–872.
12. *Lipnevicius G.* Robotic shop // Moder Steel Construction. — May, 2009. — P. 1–3.
13. *Бельчук Г. А., Гатовский К. М., Кох Б. А.* Сварка судовых конструкций: Учебник. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Судостроение, 1980. — 448 с.
14. *Теория* сварочных процессов: Учебник для вузов по ТЗЗ спец. Оборудование и технология сварочного производства / В. Н. Волченко, В. М. Ямпольский, В. А. Винокуров и др.; под ред. В. В. Фролова. — М.: Высш. шк., 1988. — 559 с.
15. *Сварка* и свариваемые материалы: В 3 т. Т. 1. Свариваемость материалов: Справ. изд. / Под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Металлургия, 1991. — 528 с.
16. *Рыкалин Н. Н.* Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 292 с.
17. *Маришкин А. К., Попков А. М., Постаушкин В. Ф.* Плавление электродной проволоки при автоматической сварке с систематическими замыканиями дугевого промежутка // Автомат. сварка. — 1970. — № 4. — С. 9–11.
18. *Сварка* в машиностроении: Справочник в 4 т. / Г. А. Николаев и др. — М.: Машиностроение, 1978. — Т. 1. — 504 с.
19. *Потатьевский А. Г.* Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Ч. 1. Сварка в активных газах. — 2-е изд., перераб. — Киев: Екотехнологія, 2007. — 192 с.
20. *Гилл Ф., Мюррей У., Райм М.* Практическая оптимизация. — М.: Мир, 1985. — 509 с.
21. *Очков В. Ф.* Mathcad 14 для студентов и инженеров. — СПб.: BHV, 2009. — 362 с.

Поступила в редакцию 26.07.2012

## НОВАЯ КНИГА

**Цыбулькин Г. А. Корректирующее управление траекторным движением. — К.:  
Сталь, 2012. — 161 с.**

В книге изложены методы корректирующего управления, составляющие основу альтернативного подхода к решению задачи повышения точности движения по заданным траекториям. Разработаны критерии точности движения и времени выхода системы на номинальный режим. Сформулирован и доказан ряд условий робастной устойчивости движения для широкого класса систем произвольного порядка с различными законами коррекции движения по криволинейным траекториям. Изложение теоретических вопросов иллюстрируется примерами и результатами компьютерного моделирования.

Для специалистов, занимающихся исследованием и проектированием многоканальных систем автоматического управления, а также для аспирантов и студентов соответствующих вузов.

