
УДК 621.791.014

**В.В. Долиненко, В.А. Коляда,
Е.В. Шаповалов**, кандидаты техн. наук, **Т.Г. Скуба**
Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
(Украина, 03680, ГСП, Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11,
тел.: (044) 2004711, e-mail: eshapovalov@paton.kiev.ua)

Компьютерное моделирование оптимального управления положением ванны при сварке МИГ/МАГ корневых швов

Предложена методика синтеза и компьютерного моделирования оптимального регулятора состояния для системы автоматического управления орбитальной сваркой МИГ/МАГ (дуговой сваркой плавящимся электродом в среде защитных газов) корневых швов. Решена задача оптимального управления формированием корневого шва с обратной связью от видеопирометрического сенсора, использующего видеоизображения сварочной ванны в инфракрасном диапазоне ее излучения. Выполнено моделирование системы оптимального управления положением ванны при сварке с поперечными колебаниями горелки 1 и 3 Гц.

Запропоновано методику синтезу та комп'ютерного моделювання оптимального регулятора стану для системи автоматичного управління орбітальним зварюванням МИГ/МАГ (дуговим зварюванням плавким електродом в середовищі захисних газів) корневих швів. Розв'язано задачу оптимального управління формуванням корневого шва зі зворотнім зв'язком від відеопірометричного сенсора, який використовує відеозображення зварювальної ванни в інфрачервоному діапазоні її випромінювання. Виконано моделювання системи оптимального управління положенням ванни при зварюванні з поперечними коливаннями пальника 1 і 3 Гц.

Ключевые слова: МИГ/МАГ сварка с поперечными колебаниями электрода, корневой шов, сварочная ванна, оптимальный регулятор состояния.

Сварка МИГ/МАГ корневого шва — одна из наиболее ответственных операций при формировании односторонних многопроходных стыковых соединений труб с разделкой кромок [1, 2], особенно при орбитальной сварке труб большого диаметра [3, 4]. Форма и размеры корневого шва имеют существенное значение и во многом определяют надежность и качество всего сварного соединения.

Известным способом получения гарантированного провара корневого шва является применение подкладки (которая остается или не остается после выполнения сварки). Однако использование различного вида под-

© В.В. Долиненко, В.А. Коляда, Е.В. Шаповалов, Т.Г. Скуба, 2016

кладок или вставок в большинстве случаев существенно ухудшает работоспособность сварного соединения, создает условия возникновения в них трещин, затрудняет подготовку изделия под сварку. Поэтому на практике, в основном для соединения труб большого диаметра, используют технологию сварки корневого шва без подкладки.

При сварке толстостенных труб обязательно выполняют разделку кромок стыка. Наиболее технологичной является разделка кромок типа С17 [5], однако следует обеспечить наличие зазора b в стыке. Практика показывает, что величина зазора в стыке может изменяться как в силу неидеальности геометрии свариваемых труб, так и по причине тепловых деформаций в процессе сварки, что отрицательно влияет на качество формирования корневого шва (рис. 1, см. вклейку).

В связи с этим актуальным является создание системы автоматического управления (САУ) формированием корневого шва, которая обеспечивает компенсацию различных технологических возмущений (в том числе изменение величины зазора) посредством регулирования амплитуды поперечных колебаний горелки (электрода). Известно, что увеличение амплитуды поперечных колебаний горелки приводит к подъему сварочной ванны, а уменьшение амплитуды колебаний — к опусканию сварочной ванны в радиальном направлении в системе координат стыка трубы [6—9]. Существует оптимальное положение сварочной ванны, обеспечивающее необходимое формирование высоты выпуклости обратного валика (1—2 мм), которая является одним из основных критериев качества выполнения корневого шва. Следует заметить, что высота выпуклости обратного валика — ненаблюдаемый параметр, но для конкретного режима сварки она однозначно определяется положением сварочной ванны.

Известны результаты многочисленных разработок САУ дуговой сваркой с использованием оптических и видеотелевизионных сенсорных систем, позволяющих получать в реальном времени изображения сварочной ванны и стыка, а также определять их геометрические размеры и положение в пространстве [10—14]. В известных системах автоматическое управление сваркой происходит посредством компенсирующих воздействий на такие параметры режима сварки, как скорость подачи плавящегося электрода и скорость сварки. Недостатком такого подхода является тот факт, что при этом изменяется величина погонной энергии сварки. Следует также заметить, что подробная информация о САУ формированием корневого шва в открытых публикациях отсутствует. Предлагается использовать другой подход — реализовать управление формированием корневого шва посредством регулирования амплитуды поперечных колебаний. Это позволяет регулировать высоту выпуклости обратного валика без изменения

погонной энергии сварки. Такой способ управления позволяет также предотвратить нежелательное воздействие на заданный технологический характер термодинамики сварки.

Предварительные экспериментальные исследования показали, что для объекта управления — сварочной ванны — характерны как инерционность, так и временное запаздывание реакции ее положения в стыке относительно момента изменения амплитуды поперечных колебаний горелки. Поэтому наиболее рациональным решением является использование оптимального регулятора состояния, который учитывает наличие в объекте управления транспортного запаздывания, а также позволяет оптимизировать время переходного процесса регулирования [15].

В исследованиях использован видеопирометрический сенсор, позволяющий получать текущую информацию о размерах и положении сварочной ванны. На рис. 2 (см. вклейку) представлено изображение теплового поля сварочной ванны в двух крайних положениях горелки при выполнении поперечных колебаний в процессе сварки корневого шва.

Положение максимально нагретой зоны (зоны горения дуги) остается в средней части кадра, в то время как менее нагретая зона сварочной ванны испытывает периодические поперечные перемещения, обусловленные поперечными колебаниями горелки. Неподвижное положение максимально нагретой зоны объясняется тем, что видеопирометрический сенсор закреплен непосредственно на горелке и поэтому на изображении теплового поля дуга неподвижна, а контуры сварочной ванны перемещаются.

Рассмотрим алгоритм управления положением сварочной ванны по высоте (относительно нижней поверхности изделия) с использованием амплитуды поперечных колебаний в качестве регулирующего воздействия. Цель управления — стабилизация высоты обратного валика, однако его геометрические размеры в данной постановке задачи — ненаблюдаемые параметры. Объектом управления является положение сварочной ванны по высоте.

На рис. 3 (см. вклейку) показано схематичное изображение процесса сварки корневого шва, а на рис. 4 представлена структурная схема контура автоматического управления, где приняты следующие обозначения: $\bar{h}_{cb}^*(t)$, $h_{cb}(t)$ и $\hat{h}_{cb}(t)$ — уставка, текущее значение и усредненная оценка радиальной координаты положения сварочной ванны; $\Delta \bar{h}_{cb}(t)$ — ошибка регулирования; $w(t)$ — сигнал регулирования для исполнительного органа формирования амплитуды поперечных колебаний горелки.

Формализуем задачу управления, т.е. заменим объект управления математической моделью, которая описывает существенные особенности объекта с учетом задач и целей управления. Положение сварочной ванны

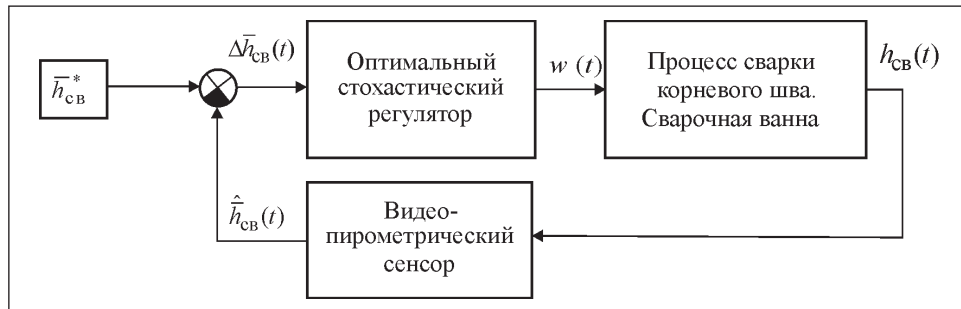


Рис. 4. Структурная схема контура автоматического управления положением сварочной ванны по высоте

относительно нижней поверхности изделия в первом приближении можно описать системой дифференциальных уравнений первого порядка. В пространстве состояний уравнения такого объекта управления имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= A \cdot \mathbf{x}(t) + B \cdot u(t) + \mathbf{v}_0(t), \\ y(t) &= C \cdot \mathbf{x}(t) + v_n(t), \\ \dot{\mathbf{x}}(t_0) &= \mathbf{x}_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{x} — вектор переменных состояния (7×1); u — управляющее воздействие для процесса сварки корневого шва; y — положение сварочной ванны по высоте; A — матрица состояний системы (7×7); B — матрица управлений (7×1); C — матрица наблюдений (1×7); $\mathbf{v}_0(t)$ — вектор шума (7×1) процесса сварки случайного характера с ковариационной матрицей V_0 (7×7); $v_n(t)$ — шум наблюдений с ковариационной матрицей V_n (1×1); t_0, t — время. Предполагается, что ковариационные матрицы V_0 и V_n соответствуют белым шумам с нулевым математическим ожиданием.

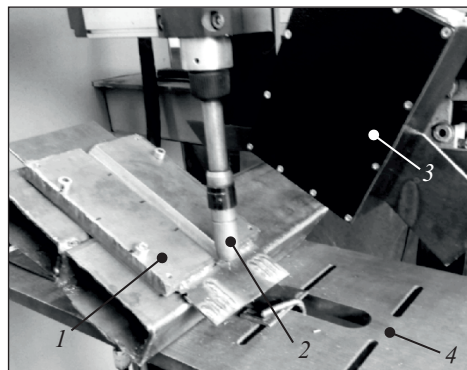
В соответствии с известной методикой [16] критерий оптимальности, который требуется минимизировать, зададим в виде функционала:

$$J = M \left[x^T(t_f) F x(t_f) + \int_0^{t_f} [x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)] dt \right], \quad (2)$$

где M — математическое ожидание; F — матрица граничных условий; Q и R — матрицы весовых коэффициентов.

Задачу оптимального управления сформулируем так [16]: при заданных уравнениях объекта (1), ограничениях на управление $u(t) \in U_t$, $U_t \subseteq \mathfrak{R}$, где \mathfrak{R} — линейное пространство, краевых условиях $x(0) = x_0$ и

Рис. 5. Экспериментальное исследование положения сварочной ванны: 1 — образец со стыком типа С17; 2 — сварочная горелка; 3 — видеопирометрический сенсор; 4 — сварочный стол



$x(t_f) = 0$ необходимо определить такое управление с обратной связью $u = u\{y(\tau), t_0 \leq \tau \leq t\}$, где $t_0 \leq \tau \leq t_f$, при котором критерий оптимальности (2) принимает минимальное значение.

Для решения поставленной задачи представим объект управления, которым является положение сварочной ванны в пространстве при МИГ/МАГ сварке корневого шва с поперечными колебаниями горелки, в виде математической модели — системы динамических звеньев. Наблюдаемым параметром является высота сварочной ванны относительно уровня внутренней поверхности свариваемых труб. Будем полагать, что смещение кромок отсутствует.

Для идентификации параметров объекта управления были подготовлены и проведены активные сварочные эксперименты, в которых скачкообразно изменяли амплитуду поперечных колебаний горелки. Режим сварки и величина зазора выбраны такими, чтобы до и после изменения амплитуды поперечных колебаний высота обратного валика имела положительное значение. Амплитуда поперечных колебаний изменялась от 1,5 мм до 0,8 мм. Напряжение, ток и скорость сварки соответственно: $U_{св} = 17,5$ В, $I_{св} = 95$ А, $V_{св} = 2$ мм/с.

Сварка проводилась на обратной полярности «на подъем» в положении «10,5 ч» в среде защитного газа 100 % CO_2 . Применен источник питания дуги «Fronius Trans Pulse Synergic — 5000» и механизм подачи проволоки «Fronius VR 2000». Объект сварки — пластины углеродистой стали с разделкой кромок типа С17, притуплением 2 мм, зазором 2,5 мм и толщиной 16 мм. Использована электродная проволока Св08Г2С-О диаметром 1,2 мм.

Для измерения положения сварочной ванны применен разработанный в рамках данного проекта видеопирометрический сенсор (рис. 5). В результате эксперимента установлено, что скачкообразные изменения амплитуды поперечных колебаний от 1,6 мм до 0,8 мм вызвали синхронные

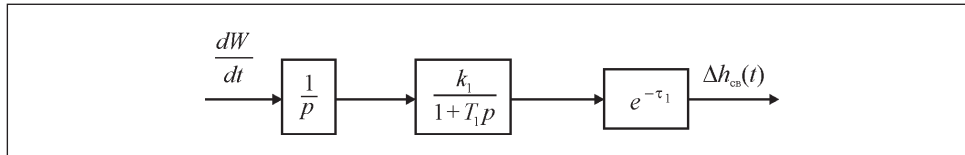


Рис. 6. Структурная схема динамической модели положения сварочной ванны по высоте: $k_1 = 0,38$; $T_1 = 1,9$ с; $\tau_1 = 1,5$ с

изменения положения ванны по высоте от 3,0 мм до 2,7 мм и высоты обратного валика — от 0,1 мм до 0,7 мм. Ширина ванны практически не изменялась и составила 4 мм. Выявлено одинаковое временное запаздывание реакции изменения высоты ванны и высоты обратного валика — приблизительно 1,5 с. После обработки данных, поступивших от видеопирометрического сенсора, рассчитанное значение постоянной времени объекта управления (динамического звена первого порядка) составило 1,9 с. Коэффициент усиления для параметра высоты сварочной ванны составил приблизительно +0,38, а для параметра высоты обратного валика — приблизительно -0,75.

Динамическая модель объекта управления синтезирована так, что управление задано в виде производной по времени: $u(t) = dw(t)/dt$. Тогда для согласования управляющих и регулирующих воздействий в состав объекта управления необходимо добавить идеальное интегрирующее звено. Выход модели (наблюдения) задан в виде приращения $y(t) = \Delta h_{cb}(t)$. Результирующее уравнение выхода в операторной форме запишем в виде $y = G(p)u$, где $G(p) = G_3(p)G_2(p)G_1(p)$; p — оператор Лапласа; $G_3(p)$ — передаточная функция идеального звена транспортного запаздывания; $G_2(p)$ — передаточная функция апериодического звена 1-го порядка; $G_1(p)$ — передаточная функция идеального интегрирующего звена.

На рис. 6 представлена структурная схема передаточной функции $G(p)$. Для того чтобы воспользоваться известной методикой синтеза оптимальной САУ, преобразуем передаточную функцию звена запаздывания к каноническому виду. Согласно теории автоматического управления экспоненциальные функции можно заменить рациональными полиномами. С достаточной точностью экспонента аппроксимируется полиномом Паде пятой степени [17]:

$$e^{-\tau p} = -\frac{\tau^5 p^5 - 30\tau^4 p^4 + 420\tau^3 p^3 - 3360\tau^2 p^2 + 15120\tau p - 30240}{\tau^5 p^5 + 30\tau^4 p^4 + 420\tau^3 p^3 + 3360\tau^2 p^2 + 15120\tau p + 30240}.$$

Полученную передаточную функцию $G(p)$ необходимо преобразовать в систему в пространстве состояний. Для этого воспользуемся функцией MATLAB $ss(\cdot)$, которая преобразует LTI модель (Linear Time-Invari-

ant model) в модель в пространстве состояний [18]. Полученные матрицы данной системы имеют следующий вид:

$$A = \begin{pmatrix} -20 & -11,6667 & -7,7778 & -5,8333 & -3,8889 & 0 & 0 \\ 16 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2500 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2500 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$C = (0 \quad -0,0031 \quad 0,0078 \quad -0,0182 \quad 0,0486 \quad -0,5833 \quad 3,1111).$$

Из (3) видно, что матрица B только в первой строке содержит ненулевое значение, так как управление осуществляется по одной координате системы. Напротив, матрица C в первой строке имеет нулевое значение, так как в формировании наблюдения первая координата не участвует — участвуют задержанные во времени ее производные.

При синтезе регулятора состояния требуется формировать полный вектор состояний, а именно вектор $x(t)$. Однако в системе формируется только одно скалярное наблюдение — $y(t)$. Поэтому применяется фильтр Калмана—Бьюси (оптимальный наблюдатель состояния), который на основе информации о содержании системных матриц математической модели A , B и C , а также текущего значения управления и единственного наблюдения $y(t)$ восстанавливает вектор состояний $x(t)$.

Синтез оптимальной системы управления положением ванны в пространстве выполняется по методике [16], основанной на известном принципе разделения или стохастической эквивалентности [19, 20]. При этом решаются следующие взаимосвязанные задачи: разработка детерминированного оптимального регулятора состояния и синтез фильтра Калмана—Бьюси.

Для объекта (1) при заданном критерии оптимальности (2) уравнение оптимального регулятора имеет следующий вид:

$$u(t) = R^{-1} B^T K \hat{x}(t),$$

где \hat{x} — оптимальная оценка состояния объекта управления, определяемая с помощью фильтра Калмана—Бьюси; K — симметрическая матрица, определяемая из матричного уравнения Риккати, $\dot{K} = -KA - A^T K + KBR^{-1}B^T K - Q$, с граничным условием $K(t_f) = F$.

Синтез фильтра Калмана—Бьюси выполняется классическим способом. Принимаем следующее условие: шумы процесса сварки и наблюде-

ния не коррелированы. Оценка состояния $\hat{x}(t)$ является несмещенной и оптимальной в случае, когда она удовлетворяет уравнению

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K^0(y - C\hat{x}), \quad \hat{x}(t_0) = \overline{x_0},$$

с матрицей коэффициентов усиления $K^0 = PC^T R_0^{-1}$, где матрица P — решение уравнения Риккати, $\dot{P} = AP + PA^T - PC^T R_0^{-1} CP + Q_0, P(t_0) = P_0$.

Оптимальный регулятор состояния выполнен в виде дискретной по времени системы с обратной связью от видеопирометрического сенсора. Информация от сенсора о положении сварочной ванны поступает с определенным временным тактом T_s , который соответствует полупериоду поперечных колебаний горелки $T_s = T_w / 2$, где T_w — период поперечных колебаний горелки. Такой регулятор, имеющий значительный по продолжительности временной такт работы, синтезирован средствами пакета MATLAB с помощью функции *lqrd* (\cdot).

Рассмотрены два режима сварки с поперечными колебаниями горелки: с частотой 1 Гц ($T_s = 0,5$ с) и 3 Гц ($T_s = 0,17$ с). Решения получены в виде матриц коэффициентов усиления K (1×7). Настройка регулятора состояния задана с помощью матриц Q (7×7) и R (1×1). Системные матрицы регулятора состояния для частот поперечных колебаний горелки 1 Гц имеют вид

$$Q = \begin{pmatrix} 25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 \end{pmatrix}, R = 0,002,$$

$$K = (0,04 \quad -0,70 \quad -0,70 \quad -0,59 \quad -0,35 \quad 0,76 \quad 0,36),$$

а для частот колебаний горелки 3 Гц — следующий вид:

$$Q = \begin{pmatrix} 1,0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 \end{pmatrix}, R = 0,18,$$

$$K = (0,65 \quad 0,23 \quad 0,20 \quad 0,13 \quad 0,10 \quad 1,15 \quad 0,5).$$

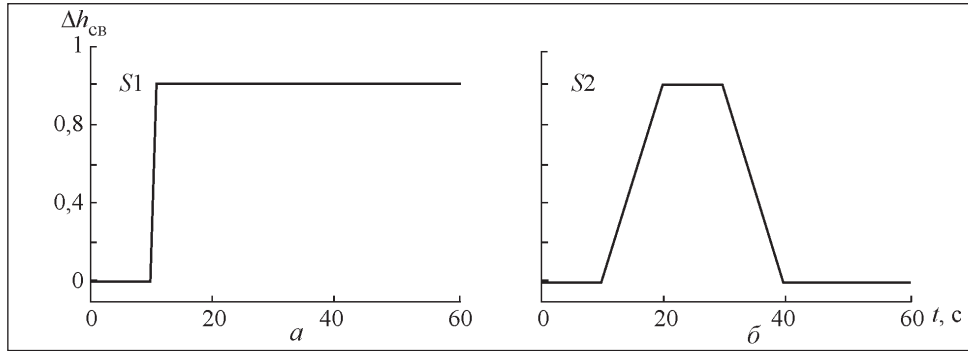


Рис. 7. Тестовые сигналы «ступенька» (а) и «трапеция» (б)

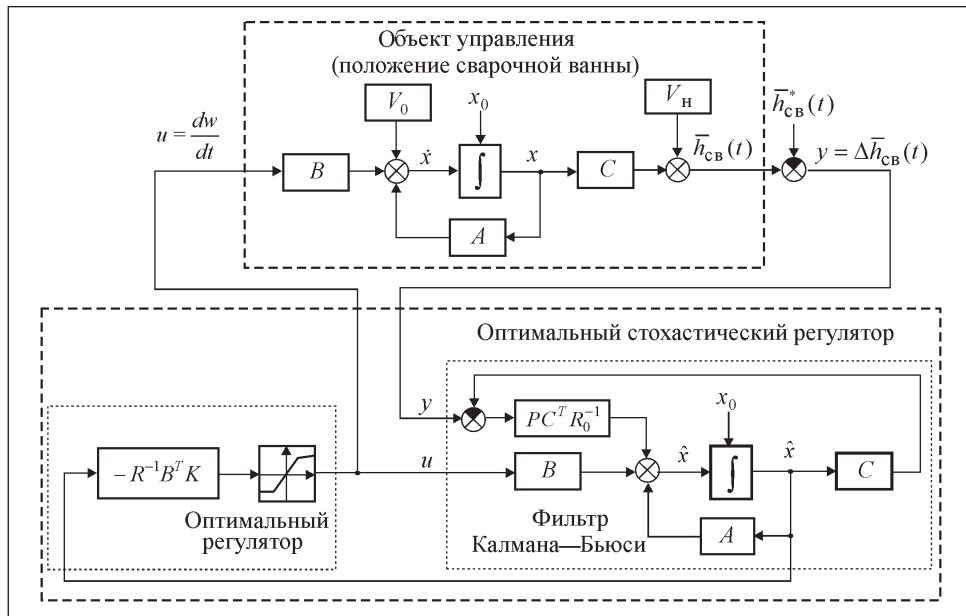


Рис. 8. Структурная схема имитационной модели системы положение сварочной ванны — автоматический регулятор

Расчет фильтра Калмана—Бьюси выполнен с использованием функции MATLAB *kalman* (\cdot):

$$[K_{obs}, l, P] = kalman(ss(A, [B G], C, [D H], Q_n, R_n),$$

где $[K_{obs}, l, P]$ — результат расчета, содержащий системные матрицы фильтра Калмана—Бьюси; $G = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$; $H = 0,4$; $Q_n = 0,15$; $R_n = 1 \cdot 10^{-4}$.

Для исследования работы алгоритмов автоматического управления применены два вида тестовых сигналов: «ступенька» и «трапеция» (рис. 7).

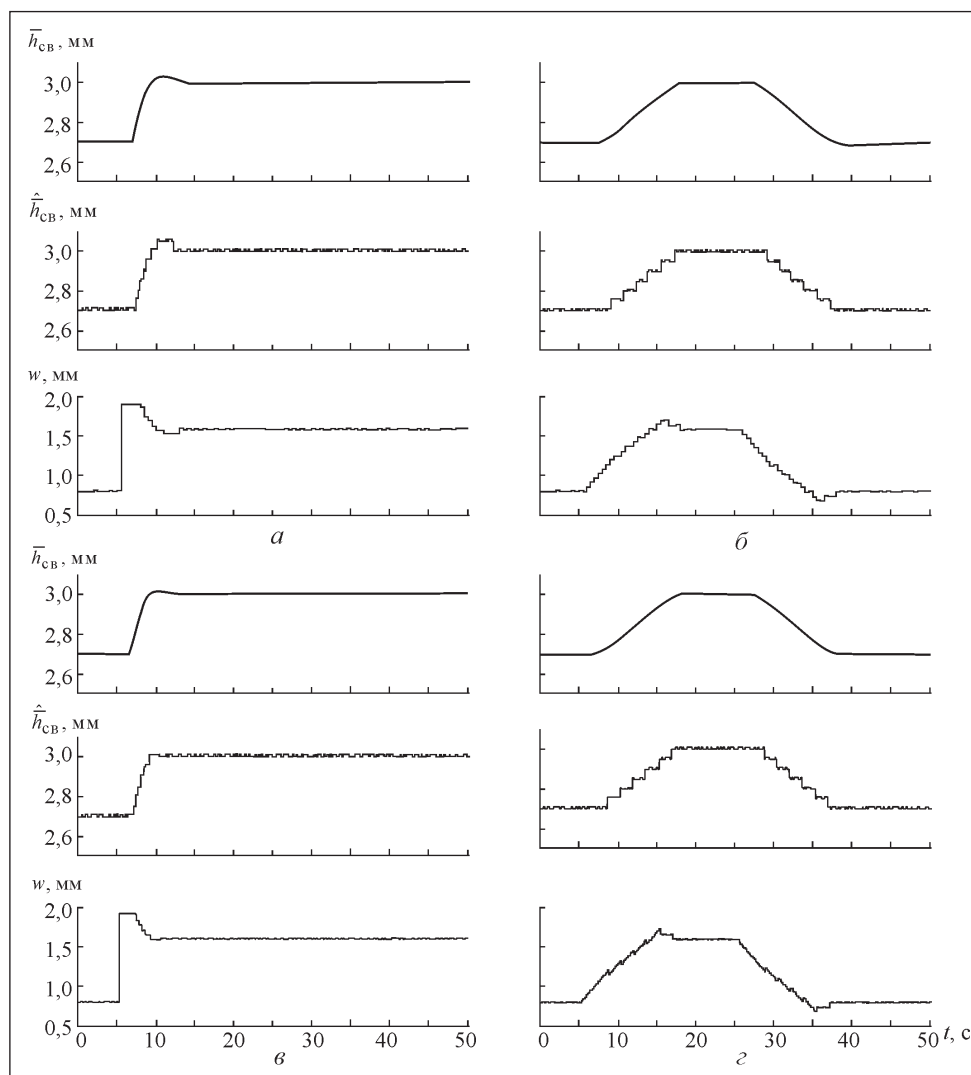


Рис. 9. Графики реакции САУ на тестовые сигналы типа «ступенька» (а, в) и «трапеция» (б, г) при частоте колебаний 1 Гц (а, б) и 3 Гц (в, г)

Переходная характеристика исследована с помощью сигнала типа «ступенька», а линейность управления — с помощью сигнала типа «трапеция». При выполнении моделирования данной задачи амплитуды этих сигналов соответствовали 0,3 мм высоты сварочной ванны.

Исследование алгоритма автоматического управления проведено на имитационной модели (рис. 8), выполненной с использованием математического пакета MATLAB Simulink. Имитационная модель состоит из двух

математических моделей: положения сварочной ванны (объекта управления) и оптимального стохастического регулятора. В качестве управляющего воздействия выбрана амплитуда поперечных колебаний горелки $w(t)$, которая изменяется дискретно во времени с временным тактом, равным полупериоду колебаний горелки.

На рис. 9 представлены графики реакции САУ на тестовые сигналы при сварке с частотой колебаний горелки 1 Гц и 3 Гц.

Анализ результатов моделирования показывает, что продолжительность переходного процесса для данного типа регулятора составляет 10 с при частоте колебаний горелки 1 Гц и 8 с при частоте колебаний горелки 3 Гц. При сварке со скоростью 2 мм/с получим длину переходного процесса соответственно 20 и 16 мм, т.е. разница составляет 20 %.

Величина перерегулирования положения ванны не превышает 0,1 мм, что обеспечивает отсутствие угрозы прожога при отработке скачкообразных изменений уставки в реальной сварке. В связи с наличием дискретизации оценки положения ванны по высоте в автоматическом регуляторе наблюдается астатизм, вследствие чего возникает дополнительная ошибка регулирования, которая, однако, не превышает 0,1 мм, что для практики сварки вполне допустимо. Несмотря на то что регулирующие воздействия имеют значительный уровень шума дискретизации, высота ванны в силу инерционных свойств самой ванны изменяется плавно без перерегулирования.

Выводы

На основе предложенной методики выполнен синтез и компьютерное моделирование оптимального стохастического регулятора состояния с транспортным запаздыванием для САУ сваркой МИГ/МАГ корневых швов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке САУ орбитальной сваркой труб большого диаметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельфор М.Г., Патон Б.Е. Оборудование для дуговой и шлаковой сварки и наплавки. — М. : Высшая школа, 1974. — 256 с.
2. Ворновицкий И.Н., Кучерова М.И., Ранцев А.А., Числов С.А. Технология сварки корневого шва стыков трубопроводов без подкладных колец // Сварочное производство. — 1999. — № 12. — С. 30—32.
3. Полосков С.И., Букаров В.А., Ищенко Ю.С. Особенности управления формированием корня шва при орбитальной сварке неповоротных стыков труб // Там же. — 2003. — № 4. — С. 3—10.
4. Ерохин А.А., Ищенко Ю.С. Некоторые закономерности формирования проплава при сварке неповоротных стыков труб // Там же. — 1967. — № 4. — С. 16—18.
5. ГОСТ 16037-80. Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. — М. : Изд-во стандартов, 1980. — 24 с.

6. Полосков С.И., Ищенко Ю.С., Букаров В.А. Анализ факторов, определяющих формирование сварочной ванны при орбитальной сварке неповоротных стыков труб (обзор) // Сварочное производство. — 2003. — № 2. — С. 11—19.
7. Давыдов В.А., Колупаев Ю.Ф., Сидоров А.В. Регулирование формы обратной стороны корневого шва при сварке стыковых соединений с разделкой кромок // Там же. — 1988. — № 11. — С. 9—11.
8. Чернышов Г.Г., Акулов А.И. Соображения по выбору режимов сварки в CO₂ корневого шва поворотных стыков труб // Автоматическая сварка. — 1965. — № 12. — С. 73.
9. Тимченко В.А., Дубовецкий С.В., Гурский К.П. и др. Влияние траектории колебаний электрода на формирование шва при роботизированной дуговой сварке в углекислом газе // Там же. — 1989. — № 2. — С. 73.
10. Doutmanidis C.C., Hardt D.E. Simultaneous In-Process Control of Heat-Affected Zone and Cooling Rate during Arc Welding // Welding J. — 1990. — No 69. — P. 186s—196s.
11. Shan-Ben Chen, Jing Wu. Intelligentized Methodology for Arc Welding Dynamical Processes: Visual Information Acquiring, Knowledge Modeling and Intelligent Control. — Springer Publishing Company, Incorporated, 2008. — 278 p.
12. Bae K.Y., Lee T.H., Ahn K. C. An optical sensing system for seam tracking and weld pool control in gas metal arc welding of steel pipe // Journal of Materials Processing Technology. — 2002. — Vol. 120. — P. 458—465.
13. Huang J., Huang J., Zou Y. et al. Study on a pipe welding robot based on laser vision sensing // IEEE Conf. on Robotics, Automation and Mechatronics // IEEE published. — Chengdu, 21—24 Sept. 2008. — P. 720—723.
14. Лобанов Л.М., Шаповалов Е.В., Коляда В.А. Применение современных информационных технологий для решения задач автоматизации технологических процессов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 2014. — № 4. — С. 52—56.
15. Долиненко В.В., Коляда В.А., Скуба Т.Г., Шаповалов Е.В. Оптимальное управление формированием валика сварного шва // Автоматическая сварка. — 2010. — № 2. — С. 23—29.
16. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие. — М. : Физматлит, 2004. — 464 с.
17. Бейкер Дж., Грейвс-Моррис П. Аппроксимации Паде. — М. : Мир, 1986. — 502 с.
18. Перельмутер В.М. Пакеты расширения MATLAB: Control System Toolbox и Robust Control Toolbox. — М. : Соломон-Пресс, 2008. — 224 с.
19. Квакернак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления: Пер. с англ. — М. : Мир, 1977. — 650 с.
20. Брайсон А., Хо Ю-Ши. Прикладная теория оптимального управления: Пер с англ. — М. : Мир, 1972. — 544 с.

V.V. Dolinenko, V.O. Kolyada, E.V. Shapovalov, T.G. Scuba

COMPUTER MODELING OF OPTIMAL CONTROL OF WELD POOL POSITION DURING ROOT JOINTS MIG/MAG WELDING

The paper proposes a method of synthesis and computer modeling of the optimal state controller for automatic control system of MIG/MAG (arc welding in shielding gases) orbital welding root passes. We consider the problem of optimal control of root pass formation with feedback from video-pyrometric sensor, which uses a video of the weld pool in its infrared radiation. Modeling of the system of the weld pool optimal position control at welding with torch transverse oscillations of 1 Hz and 3 Hz has been made.

Keywords: MIG/MAG welding with transverse electrode oscillations, the root seam, weld pool, the optimal state feedback control.

REFERENCES

1. Belfor, M.G. and Paton, B.E. (1974), *Oborudovanie dlya dugovoi svarki i shlakovoy svarki i naplavki* [Equipment for arc and slag welding and surfacing], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.
2. Vornovitsky, I.N., Kucherova, M.I., Rantsev, A.A. and Chislov, S.A. (1999), "Welding of root weld joints of pipes without backing rings", *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 12, pp. 30-32.
3. Poloskov, S.I., Bukarov, V.A. and Ischenko, Y.S. (2003), "Features management of root formation during orbital welding of pipes", *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 4, pp. 3-10.
4. Erokhin, A.A. and Ischenko, Y.S. (1967), "Some regularities of formation when melted the orbital welding of pipes", *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 4, pp. 16-18.
5. GOST 16037-80 (1980), *Soyedineniya svarnye stalnykh truboprovodov. Osnovnye tipy, strukturnye elementy i razmery* [Welded joints of steel pipelines. Basic types and sizes of structural elements], Izd-vo standartov, Moscow, Russia.
6. Poloskov, S.I., Ischenko, Y.S. and Bukarov, V.A. (2003), "Analysis of the factors determining the formation of the weld pool in orbital welding of pipes (review)", *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 2, pp. 11-19.
7. Davydov, V.A., Kolupaev, Y.F. and Sidorov, A.V. (1988), "Control forms the back of the root pass welding joints with groove", *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 11, pp. 9-11.
8. Chernyshev, G.G. and Akulov, A.I. (1965), "Considerations for selection of welding in CO₂ root weld pipe joints turning", *Avtomaticheskaya svarka*, no. 12, pp. 73.
9. Timchenko, V.A., Dubovetsky, S.V., Gursky, K.P., Fedotov, P.F. and Pavlyuk, Y.V. (1989), "Influence of oscillations trajectory of the electrode to form a seam at robotic arc welding in carbon dioxide", *Avtomaticheskaya svarka*, no. 2, pp. 73.
10. Doumanidis, C.C. and Hardt, D.E. (1990), "Simultaneous in-process control of heat-affected zone and cooling rate during arc welding", *Welding Journal*, Vol. 69, May 1990, pp. 186s-196s.
11. Shan-Ben Chen and Jing Wu (2008), "Intelligentized methodology for arc welding dynamical processes: visual information acquiring, knowledge modeling and intelligent control", Springer Publishing Company, Incorporated, Germany, USA.
12. Bae, K.Y., Lee, T.H. and Ahn, K.C. (2002), "An optical sensing system for seam tracking and weld pool control in gas metal arc welding of steel pipe", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 120, pp. 458-465.
13. Huang, J., Huang, J., Zou, Y., Jiang, L., Xue, L. and Huang, M. (2008), "Study on a pipe welding robot based on laser vision sensing", *Proceedings of IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, Chengdu, September 21-24, 2008, pp. 720-723.
14. Lobanov, L.M., Shapovalov, E.V. and Kolyada, V.A. (2014), "Use of modern information technology to meet the challenges of automation of technological processes", *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayuschiy control*, no. 4. pp. 52-56.
15. Dolinenko, V.V., Kolyada, V.A., Scuba, T.G. and Shapovalov, E.V. (2010), "Optimum control of weld bead formation", *Avtomaticheskaya svarka*, no. 2, pp. 23-29.
16. Kim, D.P. (2004), *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Vol. 2. Mnogomernye, nelineinye, optimalnye i adaptivnye sistemy: Uchebnoye posobiye* [Automatic control Theory. Vol. 2. Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems: Manual], Fizmatlit, Moscow, Russia.
17. Beiker, Dzh. and Greivs-Morris, P. (1986), *Approksimatsii Pade* [Pade approximations], Mir, Moscow, Russia.
18. Perelmuter, V.M. (2008), *Pakety rasshireniya MATLAB – Control System Toolbox and Robust Control Toolbox* [Extension packages MATLAB: Control System Toolbox and Robust Control Toolbox], Solomon Press, Moscow, Russia.

19. Kvakernak, H. and Sivan, R. (1977), *Lineynye optimalnye sistemy kontrolya* [Linear optimal control systems], Translated from English, Mir, Moscow, Russia.
20. Braison, A. and Yu-Shi, Ho (1972), *Prikladnaya teoriya optimalnogo upravleniya* [Applied theory of optimal control], Translated from English, Mir, Moscow, Russia.

Поступила 25.02.16;
после доработки 15.03.16

ДОЛИНЕНКО Владимир Владимирович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отд. №27 Ин-та электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. В 1979 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — оптимальное управление дуговой сваркой, численное моделирование термомеханической и гидромеханической задач.

КОЛЯДА Владимир Александрович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отд. №27 Ин-та электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. В 2002 г. окончил Национальный технический университет «Киевский политехнический ин-т». Область научных исследований — создание имитационных моделей видеосенсоров, разработка математического обеспечения для видеосенсоров, решение прямой и обратной задачи кинематики манипуляторов.

ШАПОВАЛОВ Евгений Викторович, канд. техн. наук, заведующий отд. №27 Ин-та электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. В 1999 г. окончил Национальный технический университет «Киевский политехнический ин-т». Область научных исследований — создание перспективных образцов лазерно-триангуляционных видеосенсоров и регуляторов с обратной связью, неразрушающий контроль качества сварных швов.

СКУБА Тарас Григорьевич, ведущий инженер-программист отд. №27 Ин-та электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. В 2002 г. окончил Национальный технический университет «Киевский политехнический ин-т». Область научных исследований — имитационное моделирование манипуляторов, системы управления роботами, оптимальное управление.