

## НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ РОБОТИЗАЦИИ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В СРЕДЕ ЗАЩИТНОГО ГАЗА

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

При роботизации дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа возникает ряд проблем, вызванных необходимостью оснащать сварочные роботы специальными сенсорными устройствами, которые поставляли бы системе управления информацию о реальном протекании процесса дуговой сварки в сильно осложненных для наблюдения условиях. В данной работе рассмотрены возможности практического использования дуговых сенсоров, которые, в отличие от других сенсорных устройств, не нуждаются в специальной защите от световых и тепловых потоков, от разбрызгивания расплавленного металла и интенсивного выделения аэрозолей в самой зоне измерения. Приведены аналитические соотношения для числовой оценки отклонения сварочного инструмента от линии стыка по результатам текущих измерений, поступающих от дугового сенсора. Эти соотношения могут быть использованы для построения алгоритмов автоматической коррекции движения сварочного инструмента непосредственно в процессе дуговой сварки. Библиогр. 29, рис. 3.

*Ключевые слова:* роботизация дуговой сварки, плавящийся электрод, электродуговые адаптивные системы

Применение роботов для контактной точечной сварки началось еще в 70-х годах прошлого столетия фирмой «General Motors» при изготовлении автомобильных кузовов [1] и получило впоследствии широкое распространение во всех высокоразвитых странах. Это стало возможным благодаря тому, что сама операция контактной точечной сварки достаточно легко поддается роботизации.

Иное положение сложилось в дуговой сварке. Для ее выполнения с помощью робота с жестким программным управлением необходимо, чтобы свариваемые детали были изготовлены и собраны под сварку с достаточно высокой точностью, при которой сохранялось бы постоянство формы, площади разделки, зазора между свариваемыми деталями и их пространственное положение. Однако в реальных условиях сварочного производства не всегда удается выполнить эти жесткие требования. Поэтому неизбежны отклонения сварочного инструмента, перемещаемого роботом по заранее заданной программе, от реальных свариваемых соединений. При выходе указанных отклонений за пределы допусков качество сварного соединения может стать недопустимо низким. Могут быть и другие причины несовпадения необходимой и программно заданной траектории движения сварочного инструмента, например, температурные деформации тонких деталей в процессе сварки, так называемое магнитное дутье и т. п.

Для обеспечения требуемого качества сварных соединений в условиях не полностью определенной и частично меняющейся «технологической среды» используют адаптивное управление, под которым понимается управление сварочным

роботом в функции от контролируемых параметров этой среды. Адаптивные сварочные роботы способны «приспосабливаться» к изменяющимся условиям дуговой сварки и, в частности, к изменению пространственного положения свариваемых соединений. Но для реализации адаптивного управления нужно, чтобы сварочный робот был оснащен специальными сенсорными устройствами (датчиками), которые доставляли бы системе управления информацию о реальном текущем положении конца электрода относительно линии свариваемого соединения.

Проблема сенсорного оснащения сварочного робота до сих пор остается актуальной. Дело в том, что дуговая сварка плавящимся электродом в среде защитного газа сопровождается мощным световым, электромагнитным и тепловым излучением, разбрызгиванием расплавленного металла, интенсивным выделением аэрозолей и пыли непосредственно в самой зоне измерения. Надежность функционирования оптических, индукционных или акустических сенсорных устройств в таких условиях невысока. В этой связи, судя по многочисленным публикациям [2–20], особое внимание обращено на электродуговые сенсоры, то есть сенсоры, в качестве источника информации которых выступает сама сварочная дуга. В литературе они получили название «дуговые сенсоры» (Arc Sensors). Повышенный интерес к ним обусловлен еще и тем, что определение положения конца электрода относительно линии свариваемого соединения осуществляется непосредственно в точке сварки при полном отсутствии вблизи нее каких-либо измерительных устройств. Однако дуговые сенсоры способны функционировать лишь при определенных условиях.

Цель данной работы — рассмотреть условия применимости дуговых сенсоров в системах адаптивного управления сварочными роботами и получить аналитические соотношения для оценки отклонений конца плавящегося электрода от линий соединения свариваемых деталей по результатам текущих измерений, поступающих от дугового сенсора.

**Условия применимости дуговых сенсоров.**

Одно из главных условий заключается в том, чтобы линия поперечного сечения свариваемых поверхностей  $F = F(y)$  имела экстремальный характер (рис. 1), а сам экстремум находился на осевой линии свариваемого соединения. Данному условию, согласно работ [21, 22], удовлетворяют большинство свариваемых соединений, к которым относятся угловые, тавровые и нахлесточные соединения, а также стыковые соединения с V-образной разделкой кромок.

Еще одним неизменным условием является допустимость (с точки зрения самой технологии сварки) колебаний электрода поперек линии свариваемого соединения непосредственно в процессе сварки. Согласно работе [22], использование поперечных колебаний в большинстве случаев вполне допустимо и даже приводит к положительному эффекту: возрастает ширина шва, снижается глубина проплавления, уменьшается перегрев металла шва и его химическая неоднородность. Поэтому дуговую сварку чаще всего ведут с поперечными колебаниями, исходя из чисто технологических соображений.

И наконец, важно, чтобы частота поперечных колебаний электрода не попадала в полосу частот, в которой возможны колебания сварочного тока,

вызванные иными причинами, например, флуктуациями напряжения на входе источника сварочного тока или крупнокапельным переносом металла. При выполнении этих условий сварочная дуга вполне может выступать в качестве источника информации о текущем положении конца электрода относительно линии свариваемого соединения и стать как бы чувствительным элементом некоего виртуального сенсорного устройства [23].

Итак, наличие экстремальной характеристики у объекта управления и использование поисковых колебаний как средства получения информации о фактическом положении системы относительно экстремума являются, как известно [24–27], основными признаками, указывающими на принадлежность систем с дуговыми сенсорами в цепи обратной связи к классу адаптивных систем экстремального типа. В теории экстремального управления разработан ряд достаточно эффективных методов поиска экстремума, полное представление о которых можно получить в специальной литературе, например, в работе [24]. Для решения задач слежения за линией свариваемого соединения в процессе дуговой сварки наиболее подходящими, согласно работе [20], являются два метода: разностный метод и метод модулирующего воздействия.

Здесь мы кратко остановимся лишь на разностном методе. Идея разностного (или, как его иногда называют, дифференциального) метода состоит в следующем. Траекторию движения сварочного инструмента в рабочем пространстве сварочного робота задают в виде «зигзагообразной» кривой  $y = y(x)$ , симметрично расположенной относительно осевой линии, которая в идеале должна совпадать с осевой линией свариваемого соединения. В процессе движения по кривой  $y = y(x)$  измеряют значения функции  $F = F(y)$  в ее левой и правой крайних точках и вычисляют разность  $\Delta F$  измеренных значений. Если осевая линия кривой  $y = y(x)$  совпадает с осевой линией свариваемого соединения, то разность  $\Delta F$  будет равна нулю. Отличие же этой разности от нуля непосредственно свидетельствует об отклонении осевой линии кривой  $y = y(x)$  от желаемой линии. Сигнал, соответствующий разности  $\Delta F$ , используется для коррекции текущего положения сварочного инструмента.

Для построения электродуговой адаптивной системы на основе разностного метода достаточно располагать лишь датчиком сварочного тока  $i$ . Измерение сварочного тока  $i$  или его отклонения  $\delta = i - i_n$  от номинального значения  $i_n$  производится в крайних точках поперечных колебаний горелки. Задача состоит в том, чтобы найти аналитические соотношения, позволяющие по результатам этих измерений получать текущие числовые оцен-

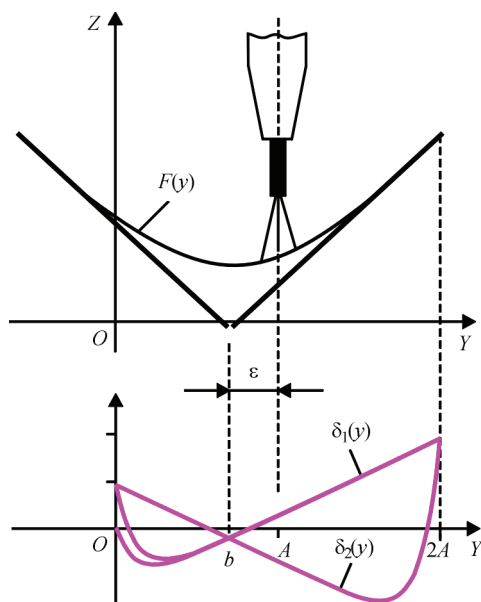


Рис. 1. Схема движения сварочного инструмента поперек линии соединения свариваемых деталей и графики функций  $\delta_1 = \delta_1(y)$  и  $\delta_2 = \delta_2(y)$

ки бокового отклонения  $\varepsilon(t)$  среднего положения колеблющегося электрода от линии свариваемого соединения.

**Числовые оценки отклонения  $\varepsilon(t)$ .** Пусть сварочный инструмент в процессе сварки перемещается поперек линии углового соединения (вдоль оси  $Y$  на рис. 1) от точки  $O$  до некоторой точки  $2A$  и обратно с постоянной скоростью  $v_y = \text{const}$ . При этом предполагается, что скорость движения горелки вдоль оси  $X$  (направлена вверх по нормали к плоскости чертежа) сохраняется постоянной, т. е.  $v_x = \text{const}$ .

Линию  $F = F(y)$ , следуя работе [7], аппроксимируем параболой

$$F(y) = a(y - b)^2 + c, \quad (1)$$

где  $a, b, c$  — положительные коэффициенты, характеризующие форму и положение кривой  $F(y)$  в системе координат  $OYZ$ .

Предполагается, что эти коэффициенты на малом интервале времени  $\theta = 2A/v_y$  заметно не изменяются. Расстояние между точкой  $b$  и точкой  $A$  (рис. 1), равное

$$\varepsilon = A - b, \quad (2)$$

характеризует искомое отклонение среднего положения горелки от линии соединения свариваемых элементов.

Связь между функциями  $\delta(y) = i(y) - i_n$  и  $F(y)$ , согласно работе [20], можно описать дифференциальным уравнением

$$\frac{d\delta}{dy} + \frac{1}{v_y T_w} \delta = \frac{1}{MT_w} \frac{dF}{dy}, \quad (3)$$

где

$$T_w = \frac{R_w}{EM}.$$

Здесь  $M$  — параметр, характеризующий электрические, теплофизические и геометрические свойства плавящегося электрода;  $E$  — напряженность электрического поля в столбе дуги;  $R_w$  — общее сопротивление сварочного контура, а  $dF/dy$  — крутизна кривой в текущей точке сварки.

Используя уравнение (3) и принимая во внимание (1) и (2), запишем отдельно два уравнения, соответствующие движению электрода от точки  $O$  до точки  $2A$  и обратно:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\delta_1}{dy} + \frac{1}{v_y T_w} \delta_1 &= \frac{2a}{MT_w} (y - b), \\ \frac{d\delta_2}{dy} + \frac{1}{v_y T_w} \delta_2 &= \frac{2a}{MT_w} (2A - y - b). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В этих уравнениях через  $\delta_1 = \delta_1(y)$  обозначено отклонение сварочного тока, возникающее при движении горелки от точки  $O$  до точки  $2A$ , а через

$\delta_2 = \delta_2(y)$  — отклонение сварочного тока при движении горелки в обратном направлении  $2A \rightarrow O$ .

Решения уравнений (4) имеют вид

$$\delta_1(y) = \frac{2av_y}{M} (y - b - v_y T_w) + C_1 \exp\left(-\frac{y}{v_y T_w}\right), \quad (5)$$

$$\delta_2(y) = -\frac{2av_y}{M} (2A - y - b + v_y T_w) + C_2 \exp\left(-\frac{2A - y}{v_y T_w}\right), \quad (6)$$

где  $C_1, C_2$  — некоторые константы. Поскольку нас интересуют отклонения сварочного тока лишь в крайних точках поперечного колебания электрода, то, полагая в уравнении (5)  $y = 2A$ , а в (6)  $y = 0$  и вводя обозначения  $\delta_R = \delta_1(2A)$ ,  $\delta_L = \delta_2(0)$ , получим с учетом (2) следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \delta_R &= \frac{2av_y}{M} (A - v_y T_w + \varepsilon), \\ \delta_L &= \frac{2av_y}{M} (A - v_y T_w - \varepsilon). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Отсюда

$$\delta_R - \delta_L = \frac{4av_y}{M} \varepsilon. \quad (8)$$

Из последнего выражения видно, что если бы в процессе измерения  $\delta_R$  и  $\delta_L$  наряду со значениями параметров  $v_y$  и  $M$  было также известно и значение коэффициента  $a$ , то по разности  $(\delta_R - \delta_L)$  можно было бы получить достаточно точную оценку

$$\varepsilon = (\delta_R - \delta_L) \frac{M}{4av_y} \quad (9)$$

интересующего нас бокового отклонения сварочной горелки от осевой линии свариваемого соединения. Такого вида оценка, а именно:  $\varepsilon = K_1(\delta_R - \delta_L)$ , где  $K_1$  — некоторая константа, использовалась в работах [3, 11, 12].

К сожалению, коэффициент  $a$ , входящий в формулу (9), лишь на небольшом интервале времени можно считать мало изменяющимся. В процессе дуговой сварки вследствие нестационарного движения свободной поверхности жидкой ванны  $a$  изменяется непредсказуемым образом и практически не поддается текущей идентификации. Следовательно, оценка  $\varepsilon$ , получаемая на основе разности  $(\delta_R - \delta_L)$ , отражает истинное отклонение, в лучшем случае, лишь с точностью до знака.

Возникает естественный вопрос, можно ли устранить влияние неконтролируемых изменений параметра  $a$  на оценку  $\varepsilon$ , получаемую по результатам измерения  $\delta_R$  и  $\delta_L$ . Оказывается, такая возможность действительно существует. В самом деле, если рассмотреть сумму  $(\delta_R + \delta_L)$ , которая согласно (7) равна

$$\delta_R + \delta_L = \frac{4av_y}{M}(A - v_y T_w), \quad (10)$$

то нельзя не заметить, что множитель  $4av_y/M$  в правой части этого выражения, содержащий неизвестный коэффициент  $a$ , точно такой же, как и в правой части выражения (8). На этот факт впервые нами было обращено внимание в работе [28].

Разделим соотношение (8) на (10) и запишем результат в виде

$$\varepsilon = \frac{\delta_R - \delta_L}{\delta_R + \delta_L}(A - v_y T_w). \quad (11)$$

Теперь в (11) вовсе не фигурирует коэффициент  $a$ . Это означает, что боковое отклонение  $\varepsilon$ , определяемое по этой формуле, совершенно не зависит от данного коэффициента. В выражение (11), в отличие от (9), входят только измеряемые величины  $\delta_R$ ,  $\delta_L$  и заранее известные значения параметров  $A$ ,  $v_y$  и  $T_w$ . Другими словами, оценка бокового отклонения, вычисляемая по формуле (11), обладает свойством робастности по отношению к текущему изменению формы свободной поверхности ванны.

На рис. 2 представлены результаты компьютерного моделирования процесса дуговой сварки плавящимся электродом с поперечными колебаниями горелки при постоянном боковом отклонении  $\varepsilon_0 = 1$  мм и при двух различных значениях параметра  $a$ , т. е. при  $a = 0,1$  мм<sup>-1</sup> и  $a = 0,25$  мм<sup>-1</sup>. Значения остальных параметров, используемых при моделировании, являются типовыми для роботизированной дуговой сварки:  $v_x = 5$  мм/с;  $v_y = 12$  мм/с;  $A = 3$  мм; напряжение источника сварочного тока  $u = 30$  В; скорость подачи электрода  $v_e = 45$  мм/с;  $i = 145$  А;  $E = 2$  В/мм;  $M = 0,31$  мм/(с·А);  $L = 0,4$  мГн;  $R_w = 0,04$  Ом.

Из рис. 2 хорошо видно, что  $\delta = \delta(t, a)$  существенно зависит от коэффициента  $a$ . Подставляя в формулу (11) результаты измерений  $\delta_R$  и  $\delta_L$ :

$$\delta_R = 19,96 \text{ А}, \delta_L = 5,94 \text{ А (при } a = 0,10 \text{ мм}^{-1}\text{),}$$

$$\delta_R = 55,07 \text{ А}, \delta_L = 17 \text{ А (при } a = 0,25 \text{ мм}^{-1}\text{),}$$

получаем

$$\varepsilon_1 = \frac{19,96 - 5,94}{19,96 + 5,94}(3 - 12 \cdot 0,1) = 0,97 \text{ мм}$$

$$\text{(при } a = 0,10 \text{ мм}^{-1}\text{),}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{55,17 - 16,80}{55,17 + 16,80}(3 - 12 \cdot 0,1) = 0,96 \text{ мм}$$

$$\text{(при } a = 0,25 \text{ мм}^{-1}\text{).}$$

Сравнение  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  между собой и с  $\varepsilon_0$  убедительно показывает, что коэффициент  $a$  не оказывает ощутимого влияния на результаты расчета  $\varepsilon$  по формуле (11) и расчетные значения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  фактически совпадают с реальным отклонением  $\varepsilon_0$ .

Это означает, что оценка бокового отклонения  $\varepsilon$ , выполненная по формуле (11), достаточно эффективна.

В данной статье мы не станем углубляться в вопросы, касающиеся помехоустойчивости дифференциального дугового сенсора. Заметим лишь, что в тех случаях, когда помехи на входе датчика сварочного тока значительны, т. е. когда отношение сигнал-помеха недостаточно для гарантированной оценки  $\varepsilon$ , можно воспользоваться одним из эффективных методов борьбы с помехами, так называемым методом накопления [29]. Для этого в процессе измерения  $\delta_R(t)$  и  $\delta_L(t)$  следует брать не один отсчет, а несколько и их усреднять. При этом будут усредняться как полезные сигналы, так и мгновенные значения помех, но отношение сигнал-помеха в результате операции усреднения, как показано в работе [29], будет в  $n$  раз ( $n$  — число отсчетов) выше, чем в однократном измерении. Таким образом, достоверность оценки при использовании метода накопления существенно увеличится.

Что касается времени накопления измерений  $\tau$ , то при его выборе следует руководствоваться теоремой Котельникова, согласно которой должно выполняться условие  $\tau = n/v$ , где  $v$  — половина ширины спектра измеряемого сигнала. Следует заметить, что если движение сварочной горелки поперек линии свариваемого соединения происходит без остановок в крайних точках, то начинать накопление измерений нужно несколько раньше прихода сварочной горелки в крайнюю точку, т. е. в момент времени  $t_m = 2A/v_y - \tau$ . При этом предполагается, что за начало отсчета времени каждый раз берется момент, когда сварочная горелка находится в предыдущей крайней точке.

Итак, при использовании метода накопления боковое отклонение  $\varepsilon$  можно рассчитывать по формуле

$$\varepsilon = \frac{\bar{\delta}_R - \bar{\delta}_L}{\bar{\delta}_R + \bar{\delta}_L}(A - v_y T_w), \quad (12)$$

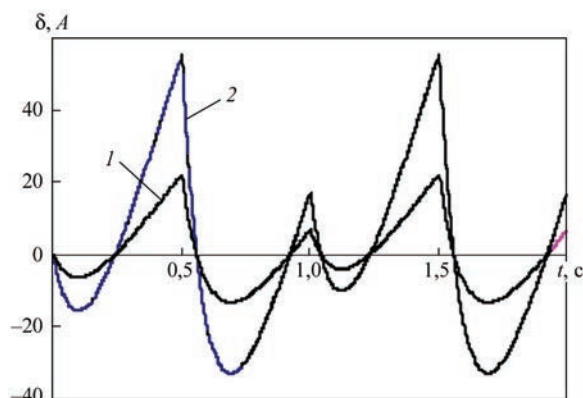


Рис. 2. Кривые переходных процессов  $\delta = \delta(t, a)$ : 1 — при  $a = 0,10$  мм<sup>-1</sup>; 2 — при  $a = 0,25$  мм<sup>-1</sup>



аналогичной формуле (11), но в которой вместо мгновенных значений  $\delta_R(t)$  и  $\delta_L(t)$  фигурируют средние значения  $\bar{\delta}_R$  и  $\bar{\delta}_L$ , полученные в результате накопления  $n$  отсчетов и их усреднения на интервале времени  $\tau$ .

В заключение следует подчеркнуть, что задача адаптации сварочного робота к изменяющимся условиям дуговой сварки может быть решена с помощью дуговых сенсоров лишь частично, поскольку эти сенсоры функционируют только в процессе дуговой сварки. При «холостом» движении сварочного инструмента от одного свариваемого соединения к другому, очевидно, требуются дополнительные средства адаптации. Выходом из затруднений может оказаться обсуждаемая в последнее время идея создания мультисенсорных систем.

В частности, для дуговой сварки плавящимся электродом угловых соединений и соединений с разделкой кромок можно использовать сварочный робот, оснащенный сенсорной системой, состоящей из двух устройств: дугового сенсора и видеокамеры. Видеокамера позволяет оперативно оценивать, насколько отличаются геометрические характеристики свариваемого соединения от характеристик, заданных в программе. На основе этой информации система управления сварочным роботом автоматически корректирует программу движения сварочного инструмента перед началом дуговой сварки и при переходе от одного свариваемого соединения к другому. В ходе же самой сварки видеокамера не используется, а текущая информация о положении сварочного инструмента относительно линии свариваемого соединения поступает от дугового сенсора. Эта информация используется для коррекции движения сварочного инструмента непосредственно в процессе дуговой сварки.

На рис. 3 показан один из возможных вариантов системы адаптивного управления сварочным роботом с двумя сенсорными устройствами в контуре обратной связи, где приняты следующие обозначения: УУ — управляющее устройство; ИУ — исполнительные устройства; ИГ — источник сварочного тока; ДС — дуговой сенсор; 1 — сварочный инструмент; 2 — датчик тока; 3 — свариваемое изделие; 4 — видеокамера. На вход ДС поступает сигнал  $u = K_2 i$ , где  $K_2 = \text{const}$ . На выходе ДС формируется сигнал  $u_* = u_*(u)$ , отвечающий требованиям интерфейса конкретного сварочного робота. Оценка отклонения  $\varepsilon$ , возникающего в процессе дуговой сварки, вычисляется в УУ по формуле (11) или (12) и используется для автоматической коррекции движения сварочного инструмента непосредственно в процессе дуговой сварки. Коррекция пространственного положения сварочного инстру-

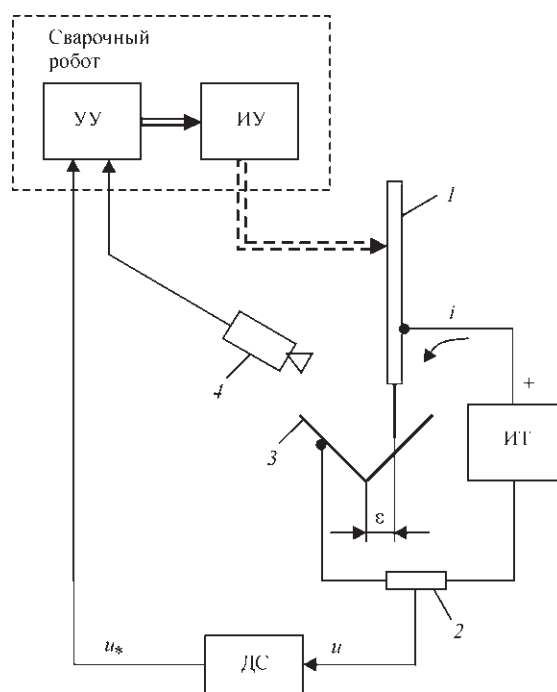


Рис. 3. Система адаптивного управления сварочным роботом с двумя сенсорными устройствами в контуре обратной связи (обозначения см. в тексте)

мента до и после операции дуговой сварки производится на основе информации, поступающей от видеокамеры 4.

### Выводы

1. При использовании роботов для дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа возникает ряд проблем, связанных с необходимостью оснащать эти роботы специальными сенсорными устройствами, которые обеспечивали бы систему управления текущей информацией о ходе сварочного процесса в сильно осложненных для наблюдения условиях.

2. Рассмотрена возможность частичного решения этой проблемы с помощью дуговых сенсорных устройств, на которые, в отличие от оптических, индукционных или акустических сенсоров, не оказывают влияние световое, электромагнитное и тепловое излучение, турбулентные потоки газа, разбрызгивание расплавленного металла, интенсивное выделение аэрозолей и пыли непосредственно в самой зоне измерения.

3. Приведены формулы для числовой оценки отклонения сварочного инструмента от линии стыка по результатам текущих измерений, поступающих от дугового сенсора. Эти формулы могут использоваться для построения алгоритмов автоматической коррекции движения сварочного инструмента непосредственно в процессе дуговой сварки.

4. Для расширения адаптационных возможностей сварочного робота представляется перспек-

тивним використанням дугового сенсора спільно з відеосенсорними системами.

### Список литературы

1. Геттерт В., Герден Г., Гюттнер Х. и др. (1988) *Сварочные работы*: пер. с нем. Г. Н. Клебанова, Д. Г. Тесменицкого. Москва, Машиностроение.
2. Ushio M. (1991) Sensors in Welding. *Transaction of JWRI*, 20, 2, 157–163.
3. Cook G. E. (1983) Robotic arc welding: research in sensory feedback control. *IEEE Trans. Ind. Electron*, IE-30, 3, 252–268.
4. Кисилевский Ф. Н., Долиненко В. В. (1986) Определение поперечного смещения горелки относительно стыка при сварке с колебаниями. *Информационные материалы СЭВ*, 1, 37–41.
5. Fujimura H., Joint H. (1987) Joint Tracking Control Sensor of GMAW. *Transactions of the Japan Welding Society*, 58, 1, 32–40.
6. Цыбулькин Г. А., Тимченко В. А., Власов О. В. (1990) *Устройство слежения за стыком при дуговой сварке*: А. с. 1586873 СССР.
7. Yongyi A., Li Y. (1991) Arc sensor used in MIG/MAG weld tracking. *Trans. China Welding Inst.*, 12, 3, 155–160.
8. Kim I. W., Na S. J. (1991) A Study on an Arc Sensor for Gas Metal Arc Welding of Horizontal Fillets. *Welding research supplement*, 8, 216–221.
9. Inoue K., Zhang J., Kang M. (1991) Analysis of detection sensitivity of arc sensor in welding process. *Transactions of JWRI*, 20, 2, 53–56.
10. Цыбулькин Г. А. (1992) *Устройство слежения за стыком*: А. с. 1706796 СССР.
11. Kim I. W., Na S. J. (1993) A Self-Organizing Fuzzy Control Approach to Arc Sensor for Weld Joint Tracking in Gas Metal Arc Welding of Butt Joints. *Welding research supplement*, 2, 60–65.
12. Dilthey U., Stein L., Oster M. (1996) Through-the-arc sensing – An universal and multipurpose sensor for arc welding automation. *Int. J. for the Joining of Materials*, 8(1), 6–12.
13. Sugitani Y. (2000) Making Best Use of the Arc Sensor. *J. Japan Weld. Soc.*, 69, 2, 46–50.
14. Карпов В. С., Панарин В. М., Помелов Д. С. (2000) Исследование гармонических составляющих сварочного тока при сварке различных стыков. *Сварочное производство*, 8, 3–7.
15. Kim C. H., Na S. J. (2001) Development of rotating GMA welding system and its application to arc sensor. *Proc. 11th International Conf. on Computer Tech. in Welding Columbus*, pp. 46–50.
16. Акулович Л. М., Буховец Е. К., Столович А. Ю. (2001) Система слежения за линией сварного шва по дуге. *2-й Международный симпозиум «Сварка и родственные технологии: мировой опыт и достижения»*, Минск, Беларусь, сс. 136–137.
17. Dilthey U., Gollnick J., Paul C. (2002) Erweiterung der Einsatzgebiete von Lichtbogensensoren. *Praktiker*, 5, 164–168.
18. Savu I. D. (2003) Building of the reference signal for the through-the-arc sensor systems function in two wires GMA welding. *Sudura*, XIII, 28–41.
19. Yoo W. S. et al. (2006) End Point Detection of Fillet Weld Using Mechanized Rotating Arc Sensor in GMAW. *Welding Journal*, 8, 180–187.
20. Цыбулькин Г. А. (2011) *Дуговые сенсорные системы для сварочных роботов*. Киев, Сталь.
21. Стеклов О. И. (1986) *Основы сварочного производства*. Москва, Высшая школа.
22. Патон Б. Е. (ред.). (1974) *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавением*. Москва, Машиностроение.
23. Цыбулькин Г. А. (2014) *Адаптивное управление в дуговой сварке*. Киев, Сталь.
24. Кунцевич В. М. (1961) *Системы экстремального управления*. Киев, «Госиздат технической литературы УССР».
25. Красовский А. А. (1963) *Динамика непрерывных самонастраивающихся систем*. Москва, Физматгиз.
26. Растринин Л. А. (1974) *Системы экстремального управления*. Москва, Наука.
27. Чаки Ф. (1975) *Современная теория управления. Нелинейные, оптимальные и адаптивные системы*. Москва, Мир.
28. Цыбулькин Г. А. (1999) К оценке текущего отклонения электрода от линии свариваемого соединения. *Автоматическая сварка*, 12, 53–54.
29. Харкевич А. А. (1965) *Борьба с помехами*. Москва, Наука.

Г. О. Цибулькин

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

### ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ РОБОТИЗАЦІЇ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ В СЕРЕДОВИЩІ ЗАХИСНОГО ГАЗУ

При роботизації дугового зварювання плавким електродом в середовищі захисного газу виникає ряд проблем, викликаних необхідністю оснащувати зварювальні роботи спеціальними сенсорними пристроями, які поставляли б системі управління інформацію про реальний перебіг процесу дугового зварювання в сильно ускладнених для спостереження умовах. У даній роботі розглянуті можливості практичного використання дугових сенсорів, які, на відміну від інших сенсорних пристроїв, не потребують спеціального захисту від світлових і теплових потоків, від розбризкування розплавленого металу і інтенсивного виділення аерозолів в самій зоні вимірювання. Наведено аналітичні співвідношення для числової оцінки відхилення зварювального інструмента від лінії стику за результатами поточних вимірювань, що надходять від дугового сенсора. Ці співвідношення можуть бути використані для побудови алгоритмів автоматичної корекції руху зварювального інструменту безпосередньо в процесі дугового зварювання. Бібліогр. 29, рис. 3.

*Ключові слова:* роботизація дугового зварювання, плавкий електрод, електродугові адаптивні системи

Поступила в редакцію 18.04.2017