

АЛГОРИТМ «СЛЕЖЕНИЯ» ЗА ЛИНИЕЙ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ТАНДЕМНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Основная трудность, возникающая при решении проблемы автоматического «слежения» за линией свариваемого соединения при тандемной дуговой сварке, связана с измерением в процессе сварки боковых отклонений от этой линии каждого из электродов, расположенных вблизи друг от друга. Кроме того, наряду с боковой коррекцией движения электродов, отклоняющихся от линии свариваемого соединения, появляется необходимость в угловой коррекции горелки, которая обеспечивала бы «параллельность» между линией свариваемого соединения и линией, соединяющей электроды. Предложен подход решения указанной проблемы, основанный на использовании электродуговых методов измерения и применении рекуррентных процедур линейной и угловой коррекции движения сварочной горелки. В статье приведены результаты компьютерного моделирования. Библиогр. 7, рис. 3.

Ключевые слова: тандемная дуговая сварка, адаптивное управление, дуговые сенсоры, рекуррентные алгоритмы коррекции

Среди различных сварочных технологий, используемых в промышленном производстве, весьма перспективной считается сварка двумя последовательными дугами в защитном газе (Tandem Welding), характеризующаяся более высокой производительностью и лучшим качеством сварных соединений по сравнению с традиционной сваркой одной дугой [1]. Расположение электродов один за другим удлиняет сварочную ванну. Это, согласно [1], обеспечивает более эффективную дегазацию, приводящую к уменьшению пористости шва, и улучшает его механические характеристики.

Вместе с тем очевидно, что при всех достоинствах тандемной дуговой сварки хорошего качества сварных соединений можно достичь лишь при условии, что в процессе сварки оба электрода осуществляют движение по линии свариваемого соединения. Если же в силу тех или иных причин один или оба электрода отклоняются от указанной линии, и если эти отклонения превышают допустимую величину, то в сварочном шве будут образовываться подрезы и другие недопустимые дефекты.

При роботизированной дуговой сварке одним электродом эту проблему удастся решить, используя адаптивное управление движением [2], под которым понимается управление движением сварочной горелки в функции от контролируемых параметров внешней среды, в частности, от изменения пространственного положения свариваемого соединения. Информацию о боковом отклонении электрода от линии свариваемого соединения поставляют специальные сенсорные устройства. На основании этой информации при необходимости

производится коррекция заданного движения сварочной горелки. В результате осуществляется как бы «слежение» сварочной горелкой за линией свариваемого соединения.

В случае же тандемной дуговой сварки обеспечение режима «слежения» наталкивается на определенные трудности, связанные с тем, что слишком малое расстояние между двумя электродами (10...12 мм) затрудняет прямое измерение бокового отклонения каждого электрода в отдельности от линии свариваемого соединения с помощью существующих сенсорных устройств. Кроме того, из-за фиксированного положения электродов относительно друг друга в сварочной горелке появляются определенные сложности в обеспечении «параллельности» между линией, соединяющей эти электроды, и линией свариваемого соединения в условиях, когда линия свариваемого соединения может деформироваться непосредственно в процессе сварки.

Судя по материалам, размещенным на сайтах известных зарубежных фирм (см., например [3]), интерес к рассматриваемой проблеме неизменно растет. В частности, фирмой Kobe Steel разработан специальный «сенсор двойной дуги», используемый для слежения при тандемной дуговой сварке. В настоящей статье предлагается несколько иной подход к проблеме «слежения», заключающийся в использовании обычных дуговых сенсоров и применении рекуррентных алгоритмов для коррекции текущего положения горелки.

1. Определение отклонений. На рис. 1. изображена схема возможного расположения электродов E_1 и E_2 относительно осевой линии свариваемого соединения (отмечена на рисунке цифрой 1). Через ε_1 и ε_2 обозначены боковые отклонения

электродов от указанной линии. Штриховой линией показан отрезок d , соединяющий электроды E_1 и E_2 . Расположение электродов в сварочной горелке фиксировано.

Как упоминалось выше, прямое измерение боковых отклонений ε_1 и ε_2 связано с большими техническими трудностями. В то же время известно [4–8], что при сварке угловых, тавровых и нахлесточных соединений, а также соединений с V-образной разделкой кромок информацию об отклонениях ε_1 и ε_2 можно получить косвенным путем, используя дуговые сенсоры (Arc Sensors). В качестве чувствительного элемента этих сенсоров выступает сама сварочная дуга. Теория и принципы построения дуговых сенсорных систем для сварочных роботов изложены в монографии [8].

Особенностью дуговых сенсоров является то, что они позволяют определять текущее отклонение конца электрода от линии свариваемого соединения по результатам изменения сварочного тока. Значит, для определения боковых отклонений ε_1 и ε_2 с помощью дуговых сенсоров достаточно располагать лишь датчиками сварочных токов. Если сварочные токи i_1 и i_2 (или их отклонения $\delta_1 = i_1 - i_{n1}$ и $\delta_2 = i_2 - i_{n2}$ от своих номинальных значений i_{n1} , i_{n2}) измерять в крайних положениях горелки при ее поперечных колебательных движениях, то, согласно [8], искомые отклонения ε_1 и ε_2 можно определить расчетным путем по следующим формулам:

$$\varepsilon_1 = \frac{\delta_{1R} - \delta_{1L}}{\delta_{1R} + \delta_{1L}}(s - vT_w), \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\delta_{2R} - \delta_{2L}}{\delta_{2R} + \delta_{2L}}(s - vT_w). \quad (2)$$

Здесь индексами R и L отмечены значения δ_1 и δ_2 в крайнем правом и, соответственно, в крайнем левом положениях электродов относительно линии свариваемого соединения; s — половина расстояния между крайними положениями электродов; v — абсолютное значение скорости поперечного движения сварочной горелки, а параметр T_w , характеризующий динамические свойства процессов, протекающих в сварочном контуре, определяется по формуле

$$T_w = \frac{R}{EM},$$

где R_w — общее сопротивление сварочного контура; E — напряженность электрического поля в столбе дуги; M — параметр, характеризующий электрические, теплофизические и геометрические свойства плавящегося электрода. (Предполагается, что оба сварочных контура идентичны.)

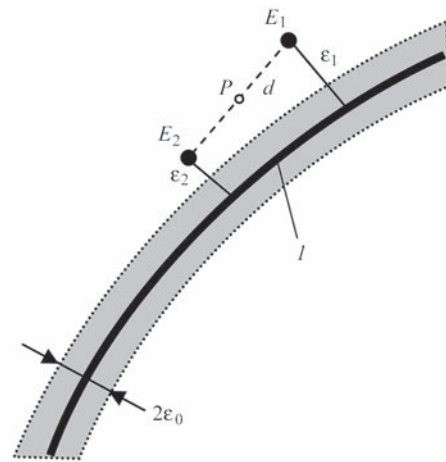


Рис. 1. Схема расположения электродов относительно свариваемого соединения (обозначения см. в тексте)

Итак, во многих практически важных случаях боковое отклонение каждого электрода в отдельности при тандемной дуговой сварке может быть определено по измерениям сварочных токов, протекающих по этим электродам, с последующим вычислением по формулам (1) и (2).

2. Коррекция движения сварочной горелки.

Задача боковой коррекции движения сварочной горелки состоит в устранении (непосредственно в процессе сварки) наметившихся отклонений ε_1 и ε_2 . Иначе говоря, задача состоит в обеспечении движения электродов E_1 и E_2 внутри «полоски» заданной ширины $2\varepsilon_0$ (рис. 1), осевой линией которой является линия свариваемого соединения.

Здесь следует обратить внимание на то, что, в отличие от сварки одной дугой, корректировать необходимо не только положение электродов E_1 и E_2 , но и ориентацию линии, соединяющей эти электроды, относительно линии свариваемого соединения.

Математически задачу коррекции сформулируем в форме следующих требований:

$$\frac{|\varepsilon_1 + \varepsilon_2|}{2} \leq \varepsilon_0,$$

$$\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{d} \leq \sin \phi_0,$$

где ϕ_0 — допустимое значение угла между отрезком d и касательной к линии свариваемого соединения.

Сформулированная задача может быть интерпретирована как задача стабилизации движения жестко связанных между собой электродов E_1 и E_2 внутри заданной «полоски». При такой постановке задачи алгоритмы стабилизации удобно строить в виде рекуррентных соотношений

$$u(k+1) = u(k) + \Delta u(k+1), \quad (3)$$

$$q(k+1) = q(k) + \Delta q(k+1), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

В этих соотношениях $u(k)$ — положение точки P , расположенной в середине отрезка d (см. рис. 1), относительно линии свариваемого соединения; $q(k) = \text{tg}\varphi(k)$, где $\varphi(k)$ — угол между отрезком d и касательной к линии свариваемого соединения; k — индекс, указывающий на момент времени kT_0 , где T_0 — шаг дискретизации по времени;

$$\Delta u(k+1) = \begin{cases} -\varepsilon_0, & (\varepsilon(k) > \varepsilon_0), \\ \varepsilon_0, & (\varepsilon(k) < -\varepsilon_0), \\ 0, & (|\varepsilon(k)| \leq \varepsilon_0), \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta q(k+1) = \begin{cases} -\mu_0, & (\mu(k) > \mu_0), \\ \mu_0, & (\mu(k) < -\mu_0), \\ 0, & (|\mu(k)| \leq \mu_0). \end{cases} \quad (6)$$

В (5) и (6) введены следующие обозначения: μ_0 — заданное число, характеризующее допустимую степень «непараллельности» между отрезком d и касательной к линии свариваемого соединения;

$$\varepsilon(k) = \frac{|\varepsilon_1(k) + \varepsilon_2(k)|}{2},$$

$$\mu(k) = \text{tg}\varphi(k) - y'(k),$$

где $y' = dy/dx$ — угловой коэффициент касательной к линии свариваемого соединения, описываемой выражением $y = y(x)$.

Под воздействием $\Delta u(k+1)$ осуществляется «смещение» электродов E_1 и E_2 (как единого целого) по нормали к линии свариваемого соединения, а под воздействием $\Delta q(k+1)$ выполняется поворот сварочной горелки относительно точки P , обеспечивающий «параллельность» между отрезком d и касательной к линии свариваемого соединения.

Из выражений (1)–(6) видно, что стабилизация движения сварочной горелки в заданной «полоске» происходит достаточно просто. Сначала по результатам измерений $\delta_{1R}, \delta_{1L}, \delta_{2R}, \delta_{2L}$ на каждом такте k вычисляются боковые отклонения $\varepsilon_1(k)$ и $\varepsilon_2(k)$ по формулам (1) и (2). Затем в соответствии с логическими функциями (5) и (6) определяются корректирующие воздействия Δu и Δq . После этого на такте $(k+1)$ производится коррекция положения сварочной горелки по законам (3) и (4).

3. Результаты компьютерного моделирования. Проиллюстрируем эффективность алгоритмов автоматической коррекции (3) и (4) на конкретном примере (рис. 2). Пусть линия свариваемого соединения, по которой планируется перемещать электроды в процессе сварки, задана в декартовых координатах уравнениями в параметрической форме $x = v_w t, y_1 = a, t = \{0, t_*\}$. Здесь

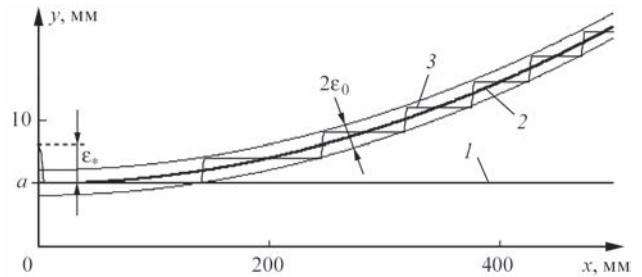


Рис. 2. Результаты моделирования коррекции положения электродов (точки P) относительно линии свариваемого соединения (обозначения см. в тексте)

$v_w = \text{const}$ — скорость перемещения сварочной горелки вдоль свариваемого соединения; a — константа; $t_* = l/v_w$, где l — длина заданной линии (на рис. 2 эта линия обозначена цифрой 1).

Предположим, что линия 1 в процессе сварки по тем или иным причинам деформируется и принимает форму линии, помеченной цифрой 2. Аппроксимируем эту линию уравнениями $x = v_w t, y_2 = a + bx^2$, в которых b — положительный коэффициент. При этом будем полагать, что точка P , расположенная в середине отрезка d (см. рис. 1), до начала сварки находилась на расстоянии ε_* от линии свариваемого соединения, а угол между отрезком d и касательной к кривой $y_2 = a + bx^2$ равен φ_* .

Цифрой 3 на рис. 2 обозначена кривая $u(x)$, представляющая собой «след» перемещающейся сварочной горелки (точки P) в результате коррекции ее движения на основе алгоритма (3). При моделировании корректирующего управления использовались следующие значения параметров: $v_w = 12$ мм/с; $l = 500$ мм; $d = 10$ мм; $a = 5$ мм; $\Delta l = 1$ мм; $b = 4 \cdot 10^{-5}$ /мм; $\varepsilon_0 = 1$ мм; $\varepsilon_* = 7$ мм; $\text{tg}\varphi_* = 0,1$; $T_0 = \Delta l/v_w = 0,08$ с.

Из рис. 2 видно, что хотя линия соединения 2 существенно не совпадает с программно заданной линией 1, тем не менее, благодаря корректирующему управлению движение характерной точки P в установившемся режиме происходит вблизи линии 2, т. е. внутри «полоски» с заданной шириной $2\varepsilon_0$.

Одновременно с коррекцией положения сварочной горелки относительно линии свариваемого соединения происходит ее угловая коррекция путем поворота вокруг точки P в соответствии с алгоритмом (4). На рис. 3 представлены результаты моделирования угловой коррекции. В качестве углового коэффициента $\text{tg}\varphi_*$, характеризующего наклон отрезка d к линии свариваемого соединения до начала сварки, взято число 0,1 (штриховая линия).

Линия, обозначенная цифрой 1, представляет собой график функциональной зависимости $y_2'(x) = 2bx$, а кривая 2, полученная в результате угловой коррекции движения горелки, есть не

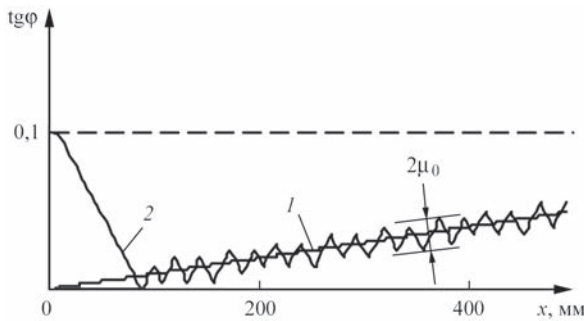


Рис. 3. Результаты моделирования коррекции наклона отрезка d относительно касательной к линии свариваемого соединения

что иное как графическое изображение изменения углового коэффициента $\text{tg}\varphi(x)$, стремящегося к линии $y'_2(x)$.

Из анализа этих кривых следует, что корректирующее управление поворотом сварочной горелки приводит к тому, что отклонение углового коэффициента $\text{tg}\varphi(x)$ отрезка d от углового коэффициента касательной к линии свариваемого соединения $y'_2(x)$ в установившемся режиме не превышает наперед заданной величины μ_0 .

Итак, общее заключение, к которому мы приходим, состоит в том, что благодаря использованию дуговых сенсоров в качестве источника текущей информации об отклонениях электродов от линии свариваемого соединения, и применению рекуррентных процедур коррекции движения сварочной горелки, управление тандемной дуговой сваркой приобретает адаптивные свойства. Особенность его заключается в том, что корректируются в процессе сварки не только положения электродов (как единого целого), но и их ориентация относительно линии свариваемого соединения, что обеспечивает высокую точность движения электродов вдоль свариваемого соединения. Создаются тем самым предпосылки к обеспече-

нию достаточно высоких технологических показателей, присущих тандемной дуговой сварке.

Список литературы

1. Дилтай У., Штайн Л., Вёсте К., Райх Ф. (2003) Состояние и перспективы применения высокоэффективных сварочных технологий. *Автоматическая сварка*, **10-11**, 151-157.
2. Цыбулькин Г.А. (2014) *Адаптивное управление в дуговой сварке*. Киев, Сталь.
3. Сайт фирмы Kobe Steel http://www.kobelco.co.jp/english/welding/files/KWT_2012_2TH.pdf.
4. Акулов Л. М., Буховец Т. К., Столович А. Ю. (2001) Система слежения за линией сварного шва по дуге. *Второй Международный симпозиум «Сварка и родственные технологии»*. Минск, Беларусь, сс.136-137.
5. Долиненко В. В. (1989) Оценка и управление положением горелки с использованием электрических параметров сварочной дуги. *Автореф. дис. ... канд. техн. наук*. Киев.
6. Yongyi A., Li Y. (1991) Arc Sensor used in MIG/MAG weld tracking. *Trans. China Welding Inst.*, **12**, **3**, 155-160.
7. Sugitani Y. (2000) Making Best Use of the Arc Sensor. *J. of the Jap. Weld. Soc.*, **69**, **2**, 46-50.
8. Цыбулькин Г.А. (2011) *Дуговые сенсорные системы для сварочных роботов*, Киев, Сталь.

References

1. Dilthey, U., Stein, L., Woeste, K., Reich, F. (2003) Latest development and trends in high-efficient welding technologies. *The Paton Welding J.*, **10-11**, 146-152.
2. Tsybulkin, G.A. (2014) *Adaptive control in arc welding*. Kiev, Stal [in Russian].
3. Kobe Steel Company. http://www.kobelco.co.jp/english/welding/files/KWT_2012_2TH.pdf
4. Akulov, L.M., Bukhovets, T.K., Stolovich, A.Yu. (2001) System of weld line tracking by arc. In: *Proc. of 2nd Int. Symp. on Welding and Related Technologies (Minsk, Belarus)*, 136-137 [in Russian].
5. Dolinenko, V.V. (1989) Evaluation and control of torch position using electric parameters of welding arc. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree*. Kiev [in Russian].
6. Yongyi, A., Li, Y. (1991) Arc sensor used in MIG/MAG weld tracking. *Trans. China Welding Inst.*, **12**(**3**), 155-160.
7. Sugitani, Y. (2000) Making best use of the arc sensor. *J. of the Jap. Weld. Soc.*, **69**(**2**), 46-50.
8. Tsybulkin, G.A. (2011) *Arc sensor systems for welding robots*. Kiev, Stal [in Russian].

АЛГОРИТМ «СТЕЖЕННЯ» ЗА ЛІНІЄЮ З'ЄДНАННЯ ПРИ ТАНДЕМНОМУ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

Г. О. ЦИБУЛЬКІН

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Основна складність, яка виникає при вирішенні проблеми автоматичного «стеження» за лінією зварного з'єднання при тандемному дуговому зварюванні, пов'язана з вимірюванням в процесі зварювання бічних відхилень від цієї лінії кожного з електродів, розташованих поблизу один від одного. Крім того, поряд з бічною корекцією руху електродів, що відхиляються від лінії зварного з'єднання, з'являється необхідність в кутовій корекції пальника, яка забезпечувала б «паралельність» між лінією зварного з'єднання і лінією, що з'єднує електроди. Запропоновано підхід до розв'язання зазначеної проблеми, заснований на використанні електродугових методів вимірювання та застосуванні зворотніх процедур лінійної і кутової корекції руху зварювального пальника. В статті наведено результати комп'ютерного моделювання. Бібліограф. 7, рис. 3.

Ключові слова: тандемне дугове зварювання, адаптивне управління, дугові сенсори, рекуррентні алгоритми корекції

ON SOLUTION OF PROBLEM OF JOINT TRACKING IN TANDEM ARC WELDING

G. A. TSYBULKIN

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail:office@paton.kiev.ua

The main difficulty, appearing in solution of the problem of automatic «tracking» of a welded joint line in tandem arc welding, is related with measurement of side deviations from this line of each of electrodes located close to each other in process of welding. Besides, together with side correction of movement of the electrodes, deviating from the welded joint line, there is a need in angular correction of a torch. It would provide “parallelism” between welded joint line and line joining the electrodes. A new solution was proposed to solve the indicated problem based on application of electric-arc methods of measurements and application of recurrent procedures of linear and angular correction of welding torch movement. The results of computer modelling are given in the paper. 7 Ref. , 3 Fig.

Keywords: tandem arc welding, adaptive control, arc sensors, recurrent correction algorithms

Поступила в редакцию 25.04.2018

СЕРТИФИКАТ

Компания ООО «ТМ. ВЕЛТЕК» получила на трехлетний период Сертификат одобрения производителя сварочных материалов в соответствии с VdTUV-Merkblatt Schweißtechnik 1153:2012.

В Сертификате отмечено, что компания ООО «ТМ. ВЕЛТЕК» предоставила неопровержимые доказательства соответствующего применения своих цеховых процедур по гарантированию качества производимых сварочных материалов. Инспекция была проведена представителем TÜV Rheinland Industrie Service GmbH.

Получение сертификата — еще один важный шаг по расширению поставок порошковых проволок отечественного производства на зарубежные рынки.



**Электроды ПАТОН™
сертифицированы для продажи в Европе**

Опытным заводом ИЭС им. Е.О. Патона успешно завершен процесс сертификации сварочных электродов ПАТОН™ для рынка Европы.

Наличие сертификата CE юридически подтверждает тот факт, что качество, рабочие характеристики, экологичность и безопасность электродов ПАТОН™ соответствуют всем необходимым требованиям со стороны европейского рынка и предоставляет возможность Заводу беспрепятственно поставлять данную продукцию в 25 стран Единой Экономической Зоны, а также в страны, признающие европейскую сертификацию.

Получение сертификата CE — еще один важный этап реализации стратегии ОЗСО ИЭС им. Е.О. Патона по развитию бренда и расширению поставок высококачественных сварочных материалов отечественного производства на зарубежные рынки.

