

Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. Регулирование провара при сварке по аналитической математической модели распространения тепла // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 38–44. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.05

Sidorov V.P., Melzhitdinova A.V. Penetration control for welding on analytical mathematical model of heat distribution. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 38–44. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.05

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 20, № 3, 2018**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.05  
УДК 65.011.56: 721.791

**В.П. Сидоров<sup>1</sup>, А.В. Мельзитдинова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

<sup>2</sup> ЧОУ ДПО ТУЦ «Спектр», Тольятти, Россия

**РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОВАРА ПРИ СВАРКЕ ПО АНАЛИТИЧЕСКОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ  
МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА**

Изложена методика автоматического регулирования процесса сварки по аналитической модели распространения тепла в изде-лии. Методика применима для аргонодуговой сварки стыковых 2-сторонних соединений без разделки кромок. Суть ее заключается в определении 2 коэффициентов расчетной схемы точечного источника тепла на поверхности пластины. Для определения коэффициентов необходимо измерение температуры в 2 точках тела при известных координатах этих точек. В качестве таких точек берутся данные по эталонным значениям провара и ширины сварного шва. Излагается решение системы уравнений относительно искомых коэффициентов графическим способом с помощью построения изолиний для провара и ширины шва. При регулировании используется понятие удельной эффективной мощности, приходящейся на 1 А тока дуги. Это позволяет не производить измерения эффективной мощности сварки. Выполняется измерение тока и скорости сварки, а в качестве регулирующего параметра используется один параметр. В этом случае существенно снижаются требования к точности регулирующего параметра. Приведен пример использования предлагаемой методики при аргонодуговой сварке 1-го слоя 2-стороннего шва. В предлагаемой методике устраняются неточности математической модели, связанные с допущением отсутствия зависимости теплофизических коэффициентов от температуры. Методика регулирования обеспечивает значительное сокращение экспериментов по определению коэффициентов математической зависимости провара от параметров сварки, повышение точности регулирования провара за счет снижения зависимости коэффициентов, определяемых экспериментально, от параметров режима сварки и учет влияния температуры и толщины свариваемых деталей на провар без проведения дополнительных экспериментов.

**Ключевые слова:** сварной шов, пластина, источник тепла, коэффициенты, провар, автоматическое регулирование, математическая модель, температура, ширина шва, возмущение.

**V.P. Sidorov<sup>1</sup>, A.V. Melzhitdinova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation

<sup>2</sup> PEA APE TTC “Spectrum”, Togliatti, Russian Federation

**PENETRATION CONTROL FOR WELDING ON ANALYTICAL  
MATHEMATICAL MODEL OF HEAT DISTRIBUTION**

The paper describes the technique of automatic control of the welding process on the analytical model of heat propagation into the product. The technique is applicable for argon-arc welding of double-sided butt joints without edge preparation. The essence of this technique is to determine two coefficients of the structural model of a point heat source on the surface of a plate. To determine the coefficients, it is necessary to measure the temperature of the body at two points with their known coordinates. The data on standard values of the penetration and the weld width are taken as these points. The solution of the system of equations for the known coefficients is described graphically by constructing isolines for the penetration and the weld width. For control, the concept of the specific effective power per 1 A of arc current is used. It makes not to measure the effective welding power. The current and the welding speed are measured, and one parameter is used as the control parameter. In this case, the requirements to the accuracy of the control parameter are significantly reduced. An example of using the proposed technique for argon-arc welding of the first layer of a double-sided weld is given. The proposed method eliminates the inaccuracies of the mathematical model associated with the assumption that there is no temperature dependence of the thermophysical coefficients. The control method provides a significant reduction of the experiments to determine the coefficients of the mathematic dependence of the penetration against the welding parameters, to increase the accuracy of the penetration control by reducing the dependence of the coefficients determined experimentally on the welding parameters, and to take into account the influence of the temperature and the thickness of the welded parts on the penetration without additional experiments.

**Keywords:** weld, plate, heat source, coefficients, penetration, automatic control, mathematical model, temperature, width of weld, disturbance.

## Введение

Автоматическое регулирование проплавления при дуговой сварке является одним из важнейших условий обеспечения качества сварного соединения. Достаточно эффективно регулирование, когда обеспечивают необходимые допуски на неизмеримые параметры процесса и поддерживают на заданном уровне измеримые параметры. Под неизмеримыми параметрами понимаются такие, которые сложно измерять в процессе сварки, а только до сварки. При наличии математической модели процесса возможно использование только 1 регулирующего параметра [1].

Математическую модель провара при сварке неплавящимся электродом в патенте [1] получили экспериментально в виде

$$H = MI^P U^Q V_c^R, \quad (1)$$

где  $M, P, Q, R$  – эмпирические коэффициенты;  $I$  – ток дуги;  $U$  – напряжение дуги;  $V_c$  – скорость сварки.

При таком регулировании измеряют все параметры, входящие в формулу (1), а регулируемый параметр (ток или скорость сварки) рассчитывают по эталонному провару  $H_0$ . При этом не учитываются возмущения неизмеримых параметров процесса, которые в отличие от режимов можно назвать условиями сварки [2–4].

Недостатками методики [1] являются высокая трудоемкость экспериментального определения коэффициентов в формуле (1) и невысокая точность регулирования, обусловленная существенной зависимостью этих коэффициентов от режимов. При проведении опытов необходимо поддерживать 2 параметра из 3 на постоянном уровне, что для сварочной дуги затруднительно, так как, например, напряжение дуги зависит от ее тока. Также зависимость (1) не учитывает влияния на провар начальной температуры изделия, что требует проведения дополнительных опытов при изменении температуры, например при предварительном или сопутствующем подогреве свариваемых деталей. Кроме того, не учитываются отклонения по толщине пластин, которые влияют на провар.

В работе [5] также по эмпирической математической модели дополнительно к расчету регулирующего параметра по эталонному провару производили измерение температуры на оси сварного шва. Так учитывалось действие возмущений на неизмеримые параметры сварки. К недостаткам способа [5] можно отнести то, что точка замера температуры располагается далеко от зоны с максимальным проваром, поэтому велики погрешности, связанные с инерционностью тепловых процессов.

В работе [6] вместо измерения температуры предложено измерение ширины сварного шва, которая рассчитывается по формуле, подобной формуле (1). В работах [7, 8] в качестве математической модели использована формула нормально-кругового источника тепла (НКИ) на поверхности плоского слоя и дополнительно к измерению температуры на шве предложено измерять ширину зоны, нагретой выше 800 °С. В этом случае возникают трудности по выбору теплофизических коэффициентов и параметров источника тепла. Фактически это, так же как и для способа [1], означает необходимость выполнения большого числа экспериментов, чтобы получить адекватное описание поля значений температуры в зоне регулирования.

В работе [9] точку замера температуры для учета неизмеримых возмущений перенесли в зону максимального провара. Однако измерение значений температуры только по одну сторону от стыка может привести к значительным возмущениям, связанным с отклонением дуги от стыка. В работе [10] предложен способ контроля отклонения дуги от стыка по значениям температуры 2 точек, расположенных симметрично стыку, а в работе [11] – методика автоматического регулирования, позволяющая учитывать совместно отклонение дуги от стыка и действие неизмеримых возмущений.

Все рассмотренные способы регулирования рекомендованы только для сварки без присадочной проволоки.

Целью данной работы являлось обоснование методики выбора теплофизических коэффициентов в аналитической математической модели для оптимального регулирования провара по измеримым параметрам процесса при минимальном объеме необходимых экспериментов. Также методика может использоваться при сварке с присадочной проволокой.

## Методика исследований

Для расчета регулирующего параметра сварки использовали зависимость температуры в пластине при действии на ее поверхности точечного источника тепла, представленную в работе [12]. При этом сознательно пошли на упрощение математической модели по сравнению с приведенными в работах [7, 8], чтобы показать, что на конкретных режимах сварки для расчета провара точность описания источника тепла не имеет существенного значения. Уравнение для регулирования провара имеет вид

$$T_L - T_0 = \frac{2Iq_y}{c\rho(4\pi a)^{1.5}} \times$$

$$\times e^{-\frac{xV_c}{2a}} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \int_0^{\infty} \frac{dt}{t^{1.5}} \cdot e^{-\frac{V_c^2 t}{4a} \left[ \frac{x^2 + y^2 + (H_0 - 2n\delta)^2}{4a} \right]}, \quad (2)$$

где  $T_L$  – температура плавления, °C;  $T_0$  – эталонная начальная температура пластин, °C;  $I$  – ток сварки, А;  $q_y$  – отношение эффективной мощности сварочной дуги к току сварки;  $c\rho$  – объемная теплоемкость металла, Дж/(см<sup>3</sup>·°C);  $a$  – коэффициент температуропроводности, см<sup>2</sup>/с;  $x$  – координата, положительная в направлении сварки, отсчитываемая от оси теплового пятна сварочной дуги, см;  $V_c$  – скорость сварки, см/с;  $t$  – время с момента начала действия дуги до наступления установившегося состояния проплавления изделия, с;  $y$  – координата, перпендикулярная направлению сварки, отсчитываемая от оси теплового пятна сварочной дуги, см;  $H_0$  – эталонный провар, см;  $\delta$  – номинальная толщина пластины, см;  $n$  – целые числа от  $-\infty$  до  $+\infty$ .

Конкретное число  $n$  и значение  $t$  выбираются исходя из требуемой точности вычислений. При расчетах значений температуры в сталях число  $n = N$  не превышает 10. Эксперименты и расчеты показывают, что в условиях 2-сторонней сварки стыковых соединений (толщина пластин 6–8 мм) установившееся состояние достигается не более чем за 10 с для сталей и 15 с для алюминиевых сплавов с очень высокой точностью расчета значений температуры, порядка 0,1 %.

Произведение  $Iq_y$  в уравнении (2) представляет эффективную мощность источника тепла  $q_{и}$ ,  $Iq_y = q_{и}$ .

Величина  $q_y$  в литературе получила название вольтова эквивалента эффективной мощности [13, 14] или удельного теплового потока [15], однако более точно называть эту величину удельной эффективной мощностью. Она слабо зависит от тока и длины дуги [15], а следовательно, и от напряжения дуги. Это обусловлено тем, что эффективная мощность при сварке неплавящимся электродом передается изделию преимущественно от приэлектродной области дуги [16, 17]. Ввиду этого можно рассматривать  $q_y$  в уравнении (2) как постоянную величину. В связи с этим при автоматическом регулировании провара по выражению (2) можно не измерять напряжение дуги.

Из формулы (2) видно, что температура точек тела пропорциональна эффективной мощности источника тепла и обратно пропорциональна объемной теплоемкости пластины. Таким образом, температура будет пропорциональна отношению этих величин. Это позволяет определять из экспериментов и использовать в формуле (2) не каждую из этих величин по отдельности, а их отношение и в дальнейшем, при регулировании глубины проплавления, оперировать этим отношением.

С учетом постоянных чисел в формуле (2) обозначим коэффициент пропорциональности  $K$ , не включая в него ток сварки, который может изменяться в процессе сварки вследствие действия возмущений:  $K = 2q_y/c\rho(4\pi)^{1.5}$ . Размерность коэффициента  $K$  – (см<sup>3</sup>·°C)/(А·с).

Суть предлагаемой методики регулирования заключается в том, что коэффициент  $K$  и температуропроводность  $a$  предлагается определять по эталонным провару и ширине шва, решая систему уравнений. Второе уравнение аналогично уравнению (2), но вместо провара  $H_0$  в нем используется эталонная ширина шва  $B_0$ .

В системе уравнений остается только 2 неизвестных: коэффициент  $K$  и коэффициент температуропроводности  $a$ . Для их однозначного определения на эталонном режиме нужно знать 2 независимые температуры в 2 точках тела при известных координатах этих точек  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Затем можно применять полученные коэффициенты при расчете регулирующего параметра – тока или скорости сварки. При этом обеспечивается высокая точность определения регулирующего воздействия, так как полученные коэффициенты изменяются мало при имеющих место возмущениях режимов сварки. Такой методикой устраняются неточности математической модели, связанные с допущением отсутствия зависимости теплофизических коэффициентов от температуры.

Предлагаемая методика регулирования обеспечивает значительное сокращение экспериментов по определению коэффициентов математической зависимости провара от параметров сварки, повышение точности регулирования провара за счет снижения зависимости коэффициентов, определяемых экспериментально, от параметров режима сварки и учет влияния температуры и толщины свариваемых деталей на провар без проведения дополнительных экспериментов. Фактически необходимо только 1 эксперимент по сварке эталонного шва и измерение после него провара и ширины шва. Этот результат возможен благодаря тому, что адекватное описание формы температурного поля с помощью аналитической зависимости, представляющей действие движущегося точечного источника тепла на поверхности пластины, позволяет при измерении 2 размеров шва отыскать точные значения соответствующих им коэффициента температуропроводности  $a$  и коэффициента  $K$ .

Отыскание провара и ширины сварочной ванны (рис. 1) производится численным методом последовательной подстановкой координат  $x$  с малым шагом  $\Delta x$ , например 1 мм. Для отыскания координаты  $z$  или  $y$  с температурой плавления использовали метод дихотомии [18]. Теплофизиче-

ские коэффициенты были выбраны для высоколегированной стали 304L [19].

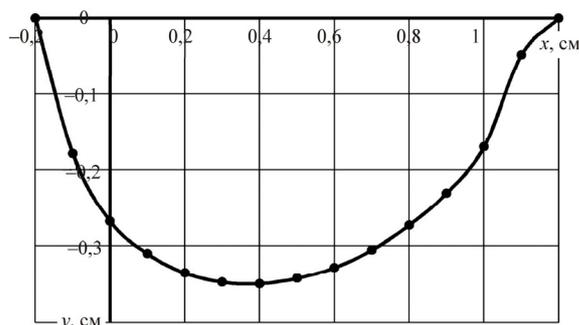


Рис. 1. Расчетная эталонная полуизотерма сварочной ванны:  $\delta = 0,6$  см,  $q_H = 1350$  Вт,  $V_c = 0,43$  см/с,  $c_p = 3,476$  Дж/(см<sup>3</sup>·°C),  $a = 0,0432$  см<sup>2</sup>/с,  $TL = 1440$  °C,  $T_0 = 20$  °C,  $K = 7,75 \cdot 10^{-2}$  (см<sup>3</sup>·°C)/(А·с)

Численные методы решения систем нелинейных уравнений типа уравнения (2) подробно изложены в специальной литературе [18].

Зависимости провара и ширины шва пропорциональны значениям  $K$  (рис. 2).

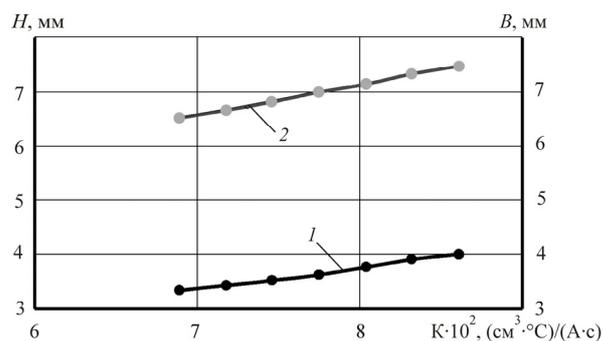


Рис. 2. Расчетные зависимости провара  $H$  (кривая 1) и ширины шва  $B$  (кривая 2) от коэффициента  $K$

Для решения системы уравнений при отыскании коэффициентов  $K$  и  $a$  использовали построенные изолинии (рис. 3).

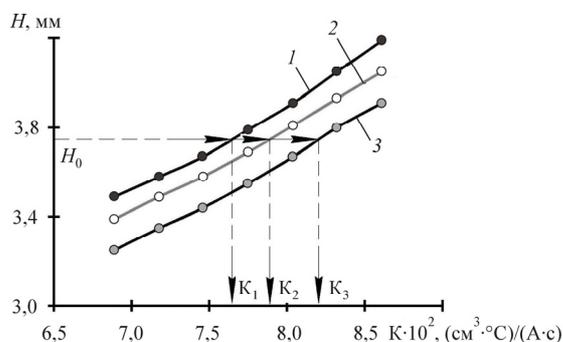


Рис. 3. Схема построения изолинии коэффициент  $K$ –коэффициент температуропроводности  $a$ : 1 –  $a = 0,03$  см<sup>2</sup>/с, 2 –  $a = 0,04$  см<sup>2</sup>/с, 3 –  $a = 0,05$  см<sup>2</sup>/с

Кривые представляют зависимость глубины проплавления  $H$  от  $K$  при разных коэффициентах  $a$ . Через эти кривые проводится линия, параллельная оси коэффициента  $K$  при значении эталонного провара  $H = H_0$ . Точки пересечения этой прямой с кривыми дают значения  $K_1, K_2, K_3$  при разных коэффициентах  $a$  и дают возможность построить изолинию коэффициент  $K$ –коэффициент температуропроводности  $a$  (рис. 4). Аналогично строится график 2-й изолинии для ширины шва  $B_0$ .

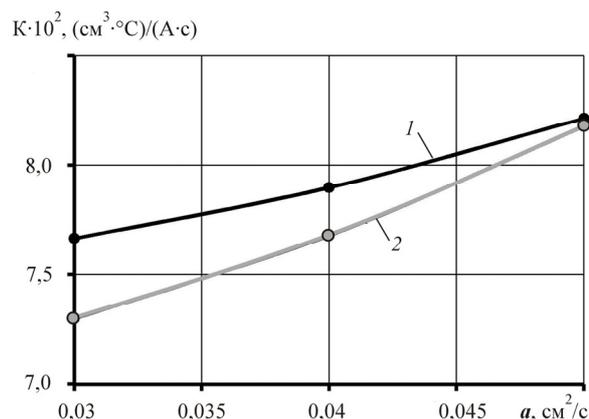


Рис. 4. Изолинии  $K$ – $a$  для эталонных  $H_0$  (кривая 1) и  $B_0$  (кривая 2)

Любая точка на кривой 1 дает эталонный провар  $H_0$ , а любая точка на кривой 2 дает эталонную ширину шва  $B_0$ . Поскольку сочетание  $H_0$ – $B_0$  для номинального режима единственное, изолинии 1 и 2 имеют одну точку пересечения, которая дает единственные значения искомым коэффициентов  $K$  и  $a$ . Эти значения необходимо использовать для расчета регулирующего параметра сварки по уравнению (2), что обеспечивает высокую точность регулирования глубины проплавления. Согласно рис. 4 можно принять  $a = 0,05$  см<sup>2</sup>/с,  $K = 8,4 \cdot 10^{-2}$  (см<sup>3</sup>·°C)/(А·с).

Построение изолиний фактически представляет графический способ решения системы 2 нелинейных уравнений, составленных по формуле (2). В этом случае в одном из уравнений координата  $y = 0$ , а  $z = H_0$ , в другом  $z = 0$ , и  $y = B_0/2$ .

При полученных коэффициентах  $K$  и  $a$  была построена изолиния ток–скорость сварки (рис. 5). Эта изолиния является регулировочной кривой по предлагаемой методике регулирования. Номинальным параметрам процесса соответствует точка  $A$  на изолинии, ток  $I_A$  и скорость сварки  $V_{cA}$ . При смещении, вследствие действия возмущений, рабочей точки процесса в точку  $B$  за пределами изолинии текущие значения тока  $I_B$  и скорости сварки  $V_{cB}$  имеют отклонения от номинальных значе-

ний. При регулировании по предлагаемой методике необходимо изменить только скорость или ток сварки. При регулировании скорости рабочей точки процесса станет точка  $C$  с измеренным током  $I_B$  и новым значением скорости сварки  $V_{cC}$ .

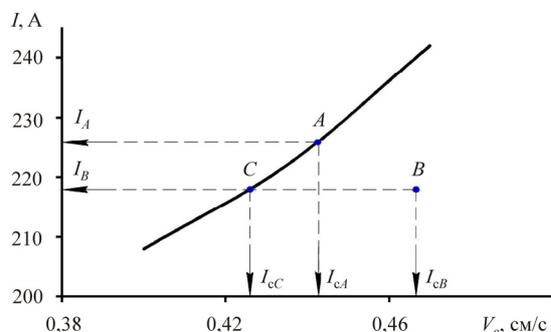


Рис. 5. Изолинии ток–скорость сварки

Для упрощения системы регулирования полученную изолинию можно с высокой точностью аппроксимировать и использовать для регулирования вместо уравнения (2). Это значительно сократит объем и время вычислений в процессе регулирования. Изолинию на рис. 5 аппроксимировали параболой

$$V_c = B_0 + B_1 I + B_2 I^2,$$

где  $B_0$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  – коэффициенты аппроксимации. В результате получили  $B_0 = 0,842$  см/с,  $B_1 = -5,72 \cdot 10^{-3}$  см/(с·А),  $B_2 = 17,28 \cdot 10^{-5}$  см/(с·А<sup>2</sup>). Аналитические и аппроксимирующие значения при этих коэффициентах совпадают с точностью 0,01 %.

**Пример.** Проводили определение регулирующего параметра сварки по предлагаемой методике.

Для расчетов выбрали сталь 20 толщиной 6 мм. Рассматривалось регулирование при сварке 1-го слоя 2-стороннего шва. Эталонный провар приняли  $H_0 = 0,6\delta = 3,6$  мм. Допускаемые отклонения от этой величины были выбраны  $\Delta H_0 = \pm 0,6$  мм. Эталонному провару соответствует режим аргонодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом без присадочной проволоки на прямой полярности дуги:  $U = 14,0$  В,  $I = 275$  А,  $V_c = 0,25$  см/с. Эталонная ширина шва  $B_0 = 6,53$  мм. В качестве регулирующего параметра была выбрана скорость сварки  $V_c$ .

Начальная температура пластин  $T_0 = 20$  °С. По опытным значениям эталонных провара  $H_0 = 0,36$  см и ширины шва  $B_0 = 0,653$  см и температуре плавления низкоуглеродистой стали  $T_L = 1520$  °С по уравнению (2) были построены изолинии коэффициент  $K$ –коэффициент температуропроводности  $a$  и на точке пересечения изо-

линий получены расчетные значения  $K = 5,39 \cdot 10^{-2}$  (см<sup>3</sup>·°С)/(А·с) и  $a = 0,08$  см<sup>2</sup>/с. Значение  $a$  совпало с рекомендуемым усредненным в работах [20, 21].

После этого уменьшили ток на 30 А до  $I = 245$  А, скорость сварки  $V_c$  не изменилась. Рассчитали изменение коэффициента  $K_1 = K \cdot 245$  А от уменьшения тока до  $K_1 = 13,2$  (см<sup>3</sup>·°С)/с. Расчетный провар уменьшился на  $\Delta H_0 = 0,5$  мм.

Задаваясь эталонным проваром, рассчитанными и принятыми коэффициентами, определяли с помощью уравнения (2) скорость сварки, позволяющую оставить провар  $H_0$  неизменным. Получили  $V_c = 0,20$  см/с. При сварке на новом режиме также получили эталонный провар.

## Выводы

Предложена методика определения коэффициентов математической модели точечного источника тепла, действующего на поверхности пластины, по размерам шва, позволяющая с высокой точностью автоматически регулировать процесс сварки.

Методику можно использовать при сварке стыковых соединений без разделки кромок без подачи и с подачей присадочной проволоки, так как при измерении провара и ширины шва учитывается влияние проволоки на распространение тепла при сварке.

## Список литературы

1. Пат. Японии № 50-3987, кл. 12В112.4, кл. В 23 К 9/12, опубли. 13.02.75.
2. Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. Методика определения требований к точности параметров сварки // Сварка и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 10–13.
3. Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. Исследование допустимых отклонений параметров дуговой двухсторонней сварки // Сварочное производство. – 2016. – № 3. – С. 11–15.
4. Sidorov V.P., Melzhitdinova A.V. Determination of permissible deviations of the two-sided arc welding conditions // Welding International. – 2016. – 1 December 2016. – P. 1–4.
5. Способ автоматического регулирования глубины проплавления при автоматической дуговой сварке: а.с. № 1013163 СССР, МКИ В 23К 9/10 / Сас А.В., Чернов А.В., Гладков Э.А., Ганюшин В.М., Бродягин В.Н. – Опубли. 23.04.83. Бюл. № 15.
6. Способ регулирования глубины проплавления при автоматической аргонодуговой сварке неплавящимся электродом без присадочной проволоки: а.с. 1123803 СССР, МКИ В23К9/10 / Патон Б.Е., Лебедев В.К., Подола Н.В., Руденко П.М. – Опубли. 15.11.84. Бюл. № 42.
7. Способ автоматического регулирования глубины проплавления при сварке неплавящимся электродом:

а.с. № 1346369 СССР, МКИ В 23К 9/10 / Гладков Э.А., Ширковский Н.А., Киселев О.Н., Кричевский Е.М., Бобылев Ю.Н. – Оpubл. 23.10.87. Бюл. № 39.

8. Гладков Э.А., Бродягин В.Н., Перковский Р.А. Автоматизация сварочных процессов. – М.: Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана, 2014. – 421 с.

9. Способ автоматического регулирования глубины проплавления при автоматической дуговой сварке: пат. 2613255 Рос. Федерация, МПК В23К 9/095 / Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. – Оpubл. 15.03.2017. Бюл. № 8.

10. Способ контроля отклонения дуги от стыка свариваемых кромок: пат. 2632751 Рос. Федерация, МПК В23К 9/095 / Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. – Оpubл. 09.10.2017. Бюл. № 28.

11. Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. Регулирование проплавления при сварке с учетом отклонения дуги от стыка // Наука – образование – производство: опыт и перспективы развития: материалы XIV Междунар. научн.-техн. конф., 8–9 февраля 2018 г.: в 2 т. / Урал. фед. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Нижний Тагил, 2018. – Т. 1. – С. 220–229.

12. Теория сварочных процессов / В.Н. Волченко [и др.]; под ред. В.В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1988. – 559 с.

13. Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.

14. Сидоров В.П., Бережко А.В., Комаров Е.Е. Определение вольтова эквивалента анодной мощности по характеристикам плавления электрода // Сварка и контроль – 2005: материалы 24-й научн.-техн. конф. – Челябинск, 2005. – С. 99–106.

15. Савинов А.В., Лапин И.Е., Лысак В.И. Дуговая сварка неплавящимся электродом. – М.: Машиностроение, 2011. – 477 с.

16. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.

17. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением. – М.: Машиностроение, 1973. – 448 с.

18. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. – М.: Наука, 1987. – 240 с.

19. Giedt W.H., Talerico L.N., P.W. Fuerschbah. GTA Welding Efficiency // Calorimetric and Temperature Field Measurements. Welding Research Supplement. – 1989. – № 1. – P. 28–32.

20. Коновалов А.В. Теория сварочных процессов / под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.

21. Кархин В.А. Тепловые процессы при сварке. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 572 с.

3. Sidorov V.P., Mel'zitinova A.V. Issledovanie dopustimyykh otklonenii parametrov dugovoi dvukhstoronnei svarki [Research of tolerances of parameters of arc bilateral welding]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2016, no. 3, pp. 11–15.

4. Sidorov V.P., Melzitinova A.V. Determination of permissible deviations of the two-sided arc welding conditions. *Welding International*, 2016, pp. 1–4.

5. Sas A.V., Chernov A.V., Gladkov E.A., Ganiushin V.M., Brodiagin V.N. Sposob avtomaticheskogo regulirovaniia glubiny proplavleniia pri avtomaticheskoi dugovoi svarke [A way of automatic control of depth of pro-melting at automatic arc welding]. *Avtorskoe svidetelstvo* no. 1013163 (1983).

6. Paton B.E., Lebedev V.K., Podo-la N.V., Rudenko P.M. Sposob regulirovaniia glubiny proplavleniia pri avtomaticheskoi argonodugovoi svarke neplaviashchimsia elektrodom bez prisadochnoi provoloki [A way of regulation of depth of pro-melting at automatic argonodugovy welding by not melting electrode without additive wire]. *Avtorskoe svidetelstvo* no. 1123803 (1984).

7. Sposob avtomaticheskogo regulirovaniia glubiny proplavleniia pri svarke neplaviashchimsia elektrodom [A way of automatic control of depth of pro-melting when welding by not melting electrode]. *Avtorskoe svidetelstvo* no. 1346369 (1987)

8. Gladkov E.A., Brodiagin V.N., Perkovskii R.A. Avtomatizatsiia svarochnykh protsessov [Automation of welding processes]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Bauman, 2014, 421 p.

9. Sidorov V.P., Mel'zitinova A.V. Sposob avtomaticheskogo regulirovaniia glubiny proplavleniia pri avtomaticheskoi dugovoi svarke [A way of automatic control of depth of pro-melting at automatic arc welding]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2613255 (2017).

10. Sidorov V.P., Mel'zitinova A.V. Sposob kontroliia otkloneniia dugi ot styka svarivaemykh kromok [Way of control of a deviation of an arch from a joint of the welded edges]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2632751 (2017).

11. Sidorov V.P., Mel'zitinova A.V. Regulirovanie proplavleniia pri svarke s uchetom otkloneniia dugi ot styka [Regulation of pro-melting when welding taking into account an arch deviation from a joint]. *Nauka – obrazovanie – proizvodstvo: opyt i perspektivy razvitiia: materialy XIV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, 8–9 fevralia 2018. Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina*. Nizhnii Tagil, 2018, vol. 1, pp. 220–229.

12. Teoriia svarochnykh protsessov [Theory of welding processes]. Ed. V.V. Frolova. Moscow: Vysshiaia shkola, 1988, 559 p.

13. Lenivkin V.A., Diurgerov N.G., Sagirov Kh.N. Tekhnologicheskie svoistva svarochnoi dugi v zashchitnykh gazakh [Technological properties of a welding arch in protective gases]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 264 p.

14. Sidorov V.P., Berezhko A.V., Komarov E.E. Opredelenie vol'tova ekvivalenta anodnoi moshchnosti po kharakteristikam plavleniia elektroda [Definition of a voltov of an equivalent of anode power according to characteristics of melting of an electrode]. *Svarka i kontrol' – 2005: materialy 24-i nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Cheliabinsk, 2005, pp. 99–106.

## References

1. Patent Iaponii no 50-3987(1975).  
2. Sidorov V.P., Mel'zitinova A.V. Metodika opredeleniia trebovaniia k tochnosti parametrov svarki [Technique of definition of requirements to the accuracy of parameters of welding]. *Svarka i diagnostika*, 2014, no. 3, pp. 10–13.

15. Savinov A.V., Lapin I.E., Lysak V.I. Dugovaia svarka neplaviashchimsia elektrodom [Arc welding by not melting electrode]. Moscow: Mashinostroenie, 2011, 477 p.

16. Leskov G.I. Elektricheskaia svarochnaia duga [Electric welding arch]. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 335 p.

17. Erokhin A.A. Osnovy svarki plavleniem [Welding bases melting]. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 448 p.

18. D'iakonov V.P. Spravochnik po algoritmam i programmam na iazyke Beisik dlia personal'nykh EVM [The reference book on algorithms and programs in the BASIC language for personal COMPUTERS]. Moscow: Nauka, 1987, 240 p.

19. Giedt W.H., Tallerico L.N., P.W. Fuersch-bah. GTA Welding Efficiency. *Calorimetric and Temperature Field Measurements. Welding Research Supplement*, 1989, no. 1, pp. 28–32.

20. Konovalov A.V. Teoriia svarochnykh protsessov [Theory of welding processes]. Ed. V.M. Nerovnogo. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universitetata imeni N.E. Baumana, 2007, 752 p.

21. Karkhin V.A. Teplovye protsessy pri svarke [Thermal processes when welding]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo Politekhniceskogo universiteta, 2015, 572 p.

#### Об авторах

**Сидоров Владимир Петрович** (Тольятти, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварки, обработки материалов давлением и родственных процессов Тольяттинского государственного университета; e-mail: vladimir.sidorov.2012@list.ru.

**Мельзитдинова Анна Викторовна** (Тольятти, Россия) – магистр, руководитель ОППС ЧОУ ДПО ТУЦ «Спектр»; e-mail: melzitdinova@gmail.com.

#### About the authors

**Vladimir P. Sidorov** (Togliatti, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding, Metal Forming and Associated Processes, Togliatti State University; e-mail: vladimir.sidorov.2012@list.ru.

**Anna V. Melzitdinova** (Togliatti, Russian Federation) – Master, Head of Training Department of Welders Before Attestation, Private Educational Agency Additional Professional Education Technical Teaching Center “Spectrum”; e-mail: melzitdinova@gmail.com.

Получено 08.08.2018