

ВЛИЯНИЕ СОБСТВЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДУГИ 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

Рассматривается влияние собственных магнитных полей на пространственное положение дуг, проявляющееся в отклонении их от осевых линий электродов при тандемной автоматической сварке. Основной целью работы является получение в аналитическом виде зависимостей указанных отклонений от длин дуг и сварочных токов. В рамках данной задачи найдены условия, ограничивающие соотношение между сварочными токами, невыполнение которых может привести к «слипанию» дуг или их обрыву в процессе сварки. В частности, при импульсной тандемной дуговой сварке плавящимися электродами соотношение между высотой («амплитудой») импульса сварочного тока одной дуги и базовым током другой не должно превышать определенного порога. Библиограф. 9, рис. 1.

Ключевые слова: тандемная дуговая сварка, плавящиеся электроды, электромагнитное взаимодействие дуг

Благодаря последним достижениям в области построения источников сварочного тока с микропроцессорным управлением стала возможной реализация дуговой автоматической сварки двумя последовательными дугами в защитном газе (Tandem Welding). Согласно работе [1] основное преимущество тандемной дуговой сварки по сравнению со сваркой одной дугой — существенное повышение ее производительности.

С технической точки зрения тандемная сварка представляет собой довольно сложный процесс, требующий обеспечения согласованного управления сваркой обеими дугами, горящими в непосредственной близости друг от друга. Кроме того, из-за близкого расположения электродов могут возникать нежелательные деформации дуг, приводящие к их «слипанию» или обрыву в процессе сварки. Основной причиной указанных деформаций является электромагнитное взаимодействие параллельных дуг с токами. Силы этого взаимодействия, как известно, определяются законом Ампера

$$F_{12} = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{i_1 i_2}{r} l_2, \quad F_{21} = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{i_1 i_2}{r} l_1. \quad (1)$$

В формулах (1) F_{12} — сила, действующая на вторую дугу со стороны первой дуги; F_{21} — сила, действующая на первую дугу со стороны второй; μ_0 — магнитная постоянная; μ — относительная магнитная проницаемость среды; i_1, i_2 — сварочные токи первой и второй дуги; l_1, l_2 — длина первой и второй дуги; r — расстояние между дугами.

Под воздействием сил F_{12} и F_{21} сварочные дуги с одинаково направленными токами будут искривляться в направлении друг к другу, как схематично показано на рисунке.

Также известно [2–6], что при искривлении сварочных дуг возникают так называемые восстанавливающие силы F_1^* и F_2^* , препятствующие указанному искривлению. При относительно небольших отклонениях дуг ξ_1 и ξ_2 от осевых линий своих электродов восстанавливающие силы пропорциональны самим отклонениям, т. е.

$$F_1^* = -G_1 \xi_1, \quad F_2^* = -G_2 \xi_2. \quad (2)$$

В выражениях (2) G_1 и G_2 — положительные коэффициенты, названные в работе [3] коэффициентами жесткости дуг; они связаны с токами i_1, i_2 и длинами дуг l_1, l_2 соотношениями

$$G_1 = N \frac{i_1^2}{l_1}, \quad G_2 = N \frac{i_2^2}{l_2}, \quad (3)$$

где $N = \text{const}$ — коэффициент, зависящий в основном от условий сварки.

Возникают следующие важные вопросы: насколько велико влияние собственных магнитных полей на электрические дуги при тандемной ду-

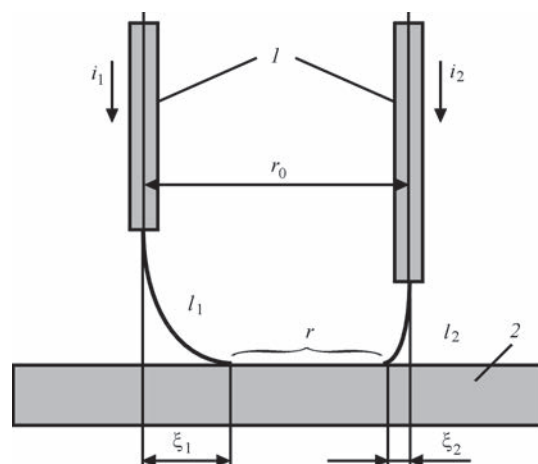


Схема магнитного взаимодействия двух дуг: 1 — плавящиеся электроды; 2 — свариваемое изделие

говой сварке плавящимися электродами, и какие ограничения необходимо налагать на сварочные токи i_1, i_2 , чтобы возможные отклонения ξ_1 и ξ_2 не нарушали стабильный режим сварки?

Судя по известным публикациям, на эти вопросы пока нет четкого ответа. В работе [7] проведено математическое моделирование электромагнитного взаимодействия двух дуг, используемых для выплавки металлов и сплавов в электропечах. Результаты моделирования представлены в виде нелинейных интегро-дифференциальных уравнений, которые для практического использования не очень удобны. В статье японских исследователей [8] получены простые соотношения между отклонениями ξ_1, ξ_2 , сварочными токами i_1, i_2 и длинами дуговых промежутков l_{10}, l_{20} . Однако эти соотношения не совсем пригодны в случае сварки плавящимися электродами, которая, как известно, имеет свои особенности.

В настоящей работе сделана попытка получить ответы на поставленные выше вопросы. Следует сразу заметить, что воздействие электромагнитных сил на дуги проявляется не только в явлениях макроскопического характера, к которым относятся изменение формы, размеров и положение дуг в пространстве. Под воздействием электромагнитных полей внутри самих дуг возникают силы Лоренца, придающие центростремительные ускорения заряженным частицам и приводящие к спиральным движениям этих частиц. Очевидно, указанные силы, а также силы иного характера влияют на пространственное положение дуг в значительно меньшей степени, чем силы F_{12}, F_{21}, F_1^* и F_2^* , и их в данной задаче учитывать не будем.

Для математического описания действия сил F_{12}, F_{21}, F_1^* и F_2^* на сварочные дуги в тандемной дуговой сварке примем следующую идеализацию:

столб дуги, как и в работах [2, 3], будем рассматривать в виде гибкого тонкого проводника тока, один конец которого «закреплен» у торца электрода, а другой конец, располагающийся у сварочной ванны, является «свободным», т. е. может перемещаться вдоль сварочной ванны;

силы F_{12}, F_{21}, F_1^* и F_2^* коллинеарны и перпендикулярны осевым линиям электродов.

В рамках принятой модели запишем уравнения баланса сил, действующих на «свободные» концы сварочных дуг

$$F_{21} + F_1^* = 0, \quad F_{12} + F_2^* = 0.$$

С учетом соотношений (1)–(3) эти уравнения примут вид

$$Pl_1 \frac{i_1 i_2}{r} - N \frac{i_1^2}{l_1} \xi_1 = 0, \quad Pl_2 \frac{i_1 i_2}{r} - N \frac{i_2^2}{l_2} \xi_2 = 0,$$

где $P = \mu_0 \mu / (2\pi)$.

Перепишем уравнения следующим образом:

$$\xi_1 = \lambda \delta \frac{l_1^2}{r}, \quad \xi_2 = \frac{\lambda}{\delta} \frac{l_2^2}{r}, \quad (4)$$

здесь $\lambda = P/N$, $\delta = i_2/i_1$ — безразмерные параметры. Суммируя уравнения (4), получим

$$\xi_1 + \xi_2 = \frac{\lambda}{r} \left(l_1^2 \delta + \frac{l_2^2}{\delta} \right). \quad (5)$$

С другой стороны, из рисунка следует, что

$$\xi_1 + \xi_2 = r_0 - r, \quad (6)$$

где $r_0 = \text{const}$ — расстояние между осевыми линиями электродов.

Приравняв правые части равенств (5) и (6), получим квадратное уравнение относительно расстояния между концами дуг r :

$$r^2 - r_0 r + a = 0.$$

Свободный член этого уравнения

$$a = \lambda \left(l_1^2 \delta + \frac{l_2^2}{\delta} \right) = \text{const}, \quad (7)$$

а его корни равны

$$r_* = \frac{r_0}{2} + \sqrt{\frac{r_0^2}{4} - a}, \quad r_{**} = \frac{r_0}{2} - \sqrt{\frac{r_0^2}{4} - a}. \quad (8)$$

Корни (8) вещественны, если выполняется условие

$$a \leq \frac{r_0^2}{4}. \quad (9)$$

Очевидно, физический смысл имеет лишь корень r_* (с увеличением расстояния r_0 увеличивается и расстояние r_*).

Если записать условие (9) в развернутом виде

$$\delta^2 - \frac{r_0^2}{4\lambda l_1^2} \delta + \frac{l_2^2}{l_1^2} \leq 0, \quad (10)$$

то решение неравенства (10) определит область допустимых значений отношения δ :

$$\delta_m \leq \delta \leq \delta_M, \quad (11)$$

где

$$\delta_m = \frac{r_0^2}{8\lambda l_1^2} - \sqrt{\left(\frac{r_0^2}{8\lambda l_1^2} \right)^2 - \frac{l_2^2}{l_1^2}},$$

$$\delta_M = \frac{r_0^2}{8\lambda l_1^2} + \sqrt{\left(\frac{r_0^2}{8\lambda l_1^2} \right)^2 - \frac{l_2^2}{l_1^2}}.$$

Возвратимся теперь к выражениям (4) и подставим вместо переменной r значение r_* , найденное в (8). В результате получим искомые оценки ξ_1 и ξ_2 :

$$\xi_1 = \lambda \delta \frac{l_1^2}{r_*}, \quad \xi_2 = \frac{\lambda}{\delta} \frac{l_2^2}{r_*}. \quad (12)$$

Оценки (12) носят приближенный характер, так как параметр λ , вернее — коэффициент N , входящий в соотношение $\lambda = P/N$, точно неизвестен и может быть определен лишь опытным путем. В

статье [3] приведено приближенное значение $N \approx 5,6\mu_0\mu/(4\pi)$ (в наших обозначениях), полученное в результате экспериментального исследования, в котором определялась жесткость дуги G по измерениям отклонений «свободного» конца дуги ξ от осевой линии электрода при воздействии на дугу специально создаваемого поперечного магнитного поля.

Если воспользоваться этим результатом, то параметр λ получит следующее числовое значение:

$$\lambda = \frac{P}{N} = \frac{\mu_0\mu 4\pi}{2\pi 5,6\mu_0\mu} \approx 0,35,$$

а искомые оценки (12) примут вид расчетных формул

$$\xi_1 = 0,35\delta \frac{l_1^2}{r_*}, \quad \xi_2 = \frac{0,35}{\delta} \frac{l_2^2}{r_*}. \quad (13)$$

Сравнивая формулы (13) с формулами

$$\xi_1 = 0,5\delta \frac{l_{10}^2}{r_0}, \quad \xi_2 = \frac{0,5}{\delta} \frac{l_{20}^2}{r_0}. \quad (14)$$

полученными в работе [8] более сложным путем, видим, что они одинаковы по форме, но отличаются входящими в них параметрами. Во-первых, длины дуг l_1 и l_2 , фигурирующие в формулах (13), при сварке плавящимися электродами не равны начальным значениям l_{10} и l_{20} , а зависят от сварочных токов следующим образом [9]:

$$l_1 = \frac{u_x - u_0}{E} - T v_{e1}, \quad l_2 = \frac{u_x - u_0}{E} - T v_{e2}. \quad (15)$$

В этих выражениях u_x — напряжение холостого хода источников сварочного тока; u_0 — сумма приэлектродных падений напряжений; E — напряженность электрического поля в сварочных дугах; v_{e1} и v_{e2} — скорости подачи первого и второго электродов соответственно; $T = R/(EM)$, где R — сопротивление сварочных контуров, M — параметр, характеризующий электрические, теплофизические и геометрические свойства плавящихся электродов (предполагается, что оба сварочных контура идентичны).

Во-вторых, в формулах (13), в отличие от (14), значится не расстояние между электродами $r_0 = \text{const}$, а расстояние между концами дуг r_* , которое, согласно выражениям (8) и (7), зависит от длин дуг l_1 и l_2 , и от соотношения между сварочными токами δ .

В работе [8, рис. 3] приведены графики, изображающие формы дуг, полученные в результате моделирования отклонений концов дуг от осевых линий своих электродов при следующих параметрах: $i_1 = i_2 = 9 \cdot 10^3$ А, $(\delta = 1)$, $r_0 = 800$ мм, $l_1 = l_2 = 400$ мм. Из графика, построенного для случая, когда формы дуг аппроксимированы полино-

мами второй степени, следует, что при указанных параметрах

$$\xi_1 = \xi_2 \approx 80 \text{ мм}. \quad (16)$$

Теперь сделаем расчет отклонений ξ_1 и ξ_2 по формуле (13). Для этого сначала по формуле (7) находим параметр $a = 11,2 \cdot 10^4$ мм². Далее проверяем условие (9): $a \leq r_0^2/4 = 16 \cdot 10^4$ мм². Условие выполняется. Затем по формуле (8) вычисляем $r_* = 619$ мм и по формулам (13) получаем

$$\xi_1 = \xi_2 = 0,35 \frac{(400 \text{ мм})^2}{619 \text{ мм}} \approx 90 \text{ мм}. \quad (17)$$

Сравнение оценок (16) и (17) позволяет заключить, что их числовые значения достаточно близки, хотя сами оценки получены различными способами. Заметим лишь, что для получения оценки (17) не требуется проводить сложные вычислительные процедуры и графические построения.

Эффективность полученных результатов проиллюстрируем на примере роботизированной тандемной дуговой сварки плавящимися электродами в среде защитного газа, выполняемой при следующих значениях параметров: $u_x = 30$ В, $u_0 = 16$ В, $E = 2$ В/мм, $M = 0,37$ мм/(с·А), $R = 0,04$ Ом, $r_0 = 10$ мм, $H = 17$ мм (H — расстояние между торцом горелки и свариваемым изделием).

Рассмотрим отдельно три случая.

1. Скорости подачи электродов v_{e1} и v_{e2} невелики. Пусть $v_{e1} = v_{e2} = 35$ мм/с. В этом случае $i_1 = i_2 = v_{e1}/M = 35/0,37 = 95$ А, $(\delta = 1)$. По формулам (15) находим $l_1 = l_2 = 5,1$ мм, а по формуле (7) вычисляем $a = 18,2$ мм². Согласно (9) должно выполняться условие $a \leq r_0^2/4 = 25$ мм². Условие выполняется. Далее, по формуле (8) определяем расстояние между концами дуг $r_* = 7,6$ мм, а по формулам (13) вычисляем отклонения

$$\xi_1 = \xi_2 = 0,35 \frac{(5,1 \text{ мм})^2}{7,6 \text{ мм}} = 1,2 \text{ мм}.$$

2. Увеличим скорости v_{e1} и v_{e2} . Пусть $v_{e1} = v_{e2} = 80$ мм/с. Тогда $i_1 = i_2 = 216$ А, $(\delta = 1)$, $l_1 = l_2 = 2,7$ мм, $a = 5,1$ мм², $r_* = 9,5$ мм. Следовательно,

$$\xi_1 = \xi_2 = 0,35 \frac{(2,7 \text{ мм})^2}{9,5 \text{ мм}} = 0,3 \text{ мм}.$$

3. Рассмотрим теперь случай, когда скорости v_{e1} и v_{e2} различны. Пусть $v_{e1} = 35$ мм/с, $v_{e2} = 80$ мм/с. В этом случае $i_1 = 95$ А, $i_2 = 216$ А, $(\delta = 2,3)$, $l_1 = 5,1$ мм, $l_2 = 2,7$ мм, $a = 22,0$ мм², $r_* = 6,7$ мм. По формулам (13) находим

$$\xi_1 = 0,35 \cdot 2,3 \frac{(5,1 \text{ мм})^2}{6,7 \text{ мм}} = 3,1 \text{ мм}.$$

$$\xi_2 = \frac{0,35}{2,3} \frac{(2,7 \text{ мм})^2}{6,7 \text{ мм}} = 0,2 \text{ мм}.$$

Анализ полученных результатов позволяет сделать несколько важных выводов, которые, вообще говоря, не являются очевидными.

1. Если сварочные токи обеих дуг равны, то с увеличением токов отклонения дуг ξ не увеличиваются, как это может показаться на первый взгляд, а уменьшаются. Этот факт физически объясняется тем, что увеличение сварочных токов (путем увеличения скорости подачи плавящихся электродов v_e при $H = \text{const}$) приводит к уменьшению длин дуг. При этом притягивающие силы F_{12} и F_{21} , пропорциональные длинам дуг, уменьшаются, а восстанавливающие силы F_1^* и F_2^* , обратно пропорциональные длинам дуг, увеличиваются. В результате точки, характеризующие положение концов дуг относительно осевых линий своих электродов, смещаются в сторону осевых линий, уменьшая тем самым отклонения дуг ξ от указанных линий.

2. Если сварочные токи различны, то отклонение ξ будет больше у той дуги, сварочный ток которой меньше. Это также обусловлено тем, что дуга с меньшим током имеет большую длину. Следовательно, притягивающая сила, действующая на более длинную дугу, превосходит притягивающую силу, действующую на более короткую. Кроме того, жесткость более длинной дуги и, соответственно, ее восстанавливающая сила значительно меньше, чем жесткость и восстанавливающая сила более короткой дуги.

3. Отклонения дуг ξ существенным образом зависят от соотношения между сварочными токами δ , причем с увеличением δ , как видно из выражений (12), резко увеличивается отклонение ξ более длинной дуги и уменьшается более короткой. Отсюда следует, что соотношение δ не может выбираться произвольно; оно должно быть выбрано в соответствии с ограничением (11). Это важный для практики момент.

В заключение следует отметить, что оценки отклонения дуг (12) под воздействием собственных магнитных полей получены нами, опираясь на упрощенную математическую модель, описывающую эти воздействия. Тем не менее, сравнение их с результатами, приведенными в работах [7, 8], убедительно показывает, что оценки (12) достаточно полно раскрывают функциональные зависимости между отклонениями дуг, их длинами, сварочными токами и расстоянием между дугами и при этом более удобны для практического использования. Потребность именно в таких простых оценках возникает уже на этапе разработки специального сварочного оборудования (в частности, сварочной горелки с двумя изолированными электродами) и самих технологий автоматизированной тандемной дуговой сварки плавящимися электродами.

Список литературы

1. Дилтай У., Штайн Л., Весте К., Райх Ф. (2003) Состояние и перспективы применения высокоэффективных сварочных технологий. *Автоматическая сварка*, **10-11**, 151–157.
2. Тиходеев Г. М. (1961) *Энергетические свойства электрической сварочной дуги*. Москва-Ленинград, Издательство Академии наук СССР.
3. Бачелис И. А. (1963) О расчете отклонения сварочной дуги в постоянном поперечном магнитном поле. *Сварочное производство*, **7**, 8–11.
4. Ковалев И. М. (1965) Отклонение сварочной дуги в поперечном магнитном поле. *Там же*, **10**, 4–6.
5. Лесков Г. И. (1970) *Электрическая сварочная дуга*. Москва, Машиностроение.
6. Ленивкин В. А. и др. (1989) *Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах*. Москва, Машиностроение.
7. Ячиков И. М., Костылева Е. М. (2014) Математическое моделирование формы дуг при их электромагнитном взаимодействии. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, **1**, 59–64.
8. Ueyama T., Ohnawa T., Yamazaki K., Tanaka M., Ushio M., Nakata K. (2005) High-Speed Welding of Steel Sheets by the Tandem Pulsed Gas Metal Arc Welding System. *Transactions of JWRI*, **34**, 1, 11–18.
9. Цыбулькин Г. А. (2014) *Адаптивное управление в дуговой сварке*. Киев, Сталь.

References

1. Dilthey, U., Stein, L., Woeste, K. et al. (2003) Latest developments and trends in high-efficient welding technologies. *The Paton Welding J.*, **10-11**, 146-152.
2. Tikhodeev, G.M. (1961) *Energy properties of welding electric arc*. Moscow-Leningrad, Izd-vo AN SSSR [in Russian].
3. Bachelis, I.A. (1963) On calculation of welding arc deviation in constant transverse magnetic field. *Svarochn. Proizvodstvo*, **7**, 8-11 [in Russian].
4. Kovalev, I.M. (1965) Welding arc deviation in constant transverse magnetic field. *Ibid.*, **10**, 4-6 [in Russian].
5. Leskov, G.I. (1970) *Welding electric arc*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
6. Lenivkin, V.A. et al. (1989) *Technological properties of welding arc in shielding gases*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Yachikov, I.M., Kostilyova, E.M. (2014) Mathematical modeling of arcs shape in their electromagnetic interaction. *Izv. Vuzov. Chyorn. Metallurgiya*, **1**, 59-64 [in Russian].
8. Ueyama, T., Ohnawa, T., Yamazaki, K. et al. (2005) High-speed welding of steel sheets by the tandem pulsed gas metal arc welding system. *Transact. of JWRI*, **34**(1), 11-18.
9. Tsybulkin, G.A. (2014) *Adaptive control in welding*. Kiev, Stal [in Russian].

Г. О. Цибулькин

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

ВПЛИВ ВЛАСНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ДУГИ ПРИ ТАНДЕМНОМУ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

Розглядається вплив власних магнітних полів на просторове положення дуг, що проявляється у відхиленні їх від осевих ліній електродів при тандемному автоматичному зварюванні. Основною метою роботи є отримання в аналітичному вигляді залежностей зазначених відхилень від довжин дуг і зварювальних струмів. В рамках даного завдання знайдено умови,

що обмежують співвідношення між зварювальними струмами, невиконання яких може призвести до «злипання» дуг або їх обриву в процесі зварювання. Зокрема, при імпульсному тандемному дуговому зварюванні плавкими електродами співвідношення між висотою («амплітудою») імпульсу зварювального струму однієї дуги і базовим струмом іншої не має перевищувати певного порогу. Бібліогр. 9, рис. 1.

Ключові слова: тандемне дугове зварювання, плавкі електроди, електромагнітна взаємодія дуг

G. A. Tsybulkin

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

EFFECT OF OWN MAGNETIC FIELDS ON ELECTRIC ARCS IN TANDEM-ARC WELDING

Considered is an effect of own magnetic fields on spatial position of arcs appearing in their deviation from electrode axial lines in automatic tandem-arc welding. The main aim of work is obtaining the dependencies of indicated deviations on arc lengths and welding currents in analytical form. In scope of this problem the conditions were found that limit a relationship between welding currents. Their neglecting can result in arc «adhesion» or their extinction in process of welding. In particular, the relationship between height («amplitude») of welding current of one arc and basic current of another one should not exceed specific limit in pulse tandem-arc consumable electrode welding. 9 Ref., 1 Fig.

Keywords: tandem-arc welding, consumable electrode, electromagnetic interaction of arcs

Поступила в редакцію 15.06.2018

Национальная академия наук Украины ♦ Институт электросварки им. Е.О. Патона
♦ Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики
♦ Международная Ассоциация «Сварка»

**Двадцать вторая международная конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ»**

10-14 сентября 2018 г.

г. Одесса, Аркадия, отель «Курортный»

Генеральный спонсор —
ЧАО «УкрНИИНК»



Спонсоры



Подача заявок и тезисов докладов для участия в конференции — до 30.06.2018 г.

Рассылка второго информационного сообщения — до 15.07.2018 г.

Оплата регистрационного взноса — до 10.09.2018 г.

Для участия в конференции необходимо заполнить регистрационную карту участника и направить ее в Оргкомитет до 30 июня 2018 г.

Адрес организационного комитета:
Международная Ассоциация «Сварка», ул. К. Малевича 11, г. Киев, 03150.
Тел.: (+38044) 200-82-77; 205-22-49. E-mail: journal@paton.kiev.ua