

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.791.75

**ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ИЗДЕЛИИ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ
НОРМАЛЬНО-ЭЛЛИПТИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКОМ**

© 2015 Ц. Гу, А.М. Рыбачук

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В статье рассмотрено распределение сварочного тока в изделии и ванне при дуговой сварке для эффективного использования способов формирования шва магнитным полем. Выбрана модель нормально-эллиптического распределения теплового потока и модель нормально-эллиптического распределения сварочного тока на поверхности контакта дуги с жидким металлом. В работе поверхность контакта дуги с жидким металлом была принята эквипотенциальной и одновременно изотермической с температурой, равной температуре кипения жидкого металла, при пренебрежении влиянием теплоотвода через наружные поверхности свариваемого изделия. При этом рассчитано распределение плотности сварочного тока в изделии, которое зависит от распределения плотности теплового потока в изделии. Выведено соотношение между электрическим током и тепловым потоком.

Ключевые слова: дуговая сварка, электрическое поле, плотность сварочного тока, тепловой поток, нормально-эллиптический источник тепла.

Поступила в редакцию 19.11.2015 г.

Для управления качеством металла сварного шва при сварке и пайке с использованием дуги перспективно использование магнитных полей, взаимодействующих с дугой или с жидким металлом сварочной ванны. Использование магнитных полей позволяет бесконтактно и оперативно управлять качеством сварочных процессов.

При дуговой сварке широко применяются внешние магнитные поля, взаимодействующие со сварочным током в жидком металле сварочной ванны, для управления качеством металла и формы шва. На этом принципе основаны способы управления кристаллизацией и формой шва продольным относительно оси дуги магнитным полем [1,2] и способы формирования шва поперечным магнитным полем [3-5].

Для создания поперечного магнитного поля в области сварочной ванны и сохранения устойчивого горения дуги используется квадрупольное магнитное поле. Такое магнитное поле используется не только для формирования шва, но и для деформирования дуги, изменяя её технологические свойства [6,7]. При этом дуга деформируется, превращаясь из осесимметричной конусной в эллипсную [8].

Для эффективного использования этих методов необходимо уметь рассчитывать электрическое поле в сварочной ванне и изделии.

В работе [9] получено общее решение дифференциального уравнения, выражающее связь потенциала и температуры в изделии при дуговой сварке:

$$U = c_1 T^2 + c_2 \quad (1)$$

Это выражение справедливо при аналогичных граничных условиях для электрического и температурного полей в случае, если не применяется ориентированный токоподвод к свариваемому изделию, расположенный вблизи сварочной ванны [9]. В этой работе поверхность контакта дуги с жидким металлом была принята эквипотенциальной и одновременно изотермической с температурой, равной температуре кипения жидкого металла, при пренебрежении влиянием теплоотода через наружные поверхности свариваемого изделия.

Найдем частное решение дифференциального уравнения (1).

Определим граничные условия на поверхности контакта дуги с жидким металлом, на которой температура достигает температуры кипения металла. Зададим на ней потенциал $U = U_1$. Найдем значение dU / dT на этой поверхности. Так как:

$$\frac{\partial U}{\partial n} = \frac{dU}{dT} \frac{\partial T}{\partial n}$$

получим:

$$\frac{\partial U}{\partial T} = \frac{dU / \partial n}{dT / \partial n}.$$

Из уравнений $j = -\sigma \text{grad}U$ и $q = -\lambda \text{grad}T$ найдем:

$$\frac{\partial U}{\partial n} = \frac{j}{\sigma} \text{ и } \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{q}{\lambda}.$$

Следовательно,

$$\frac{dU}{dT} = \frac{\lambda j}{\sigma q}.$$

По закону Видемана – Франца:

$$\frac{\lambda}{\sigma} = LT_{\text{КИП}}$$

поэтому:

$$\frac{dU}{dT} = LT_{\text{КИП}} \frac{j}{q} \quad (2)$$

Для нормально-эллиптического распределения теплового потока (рис. 1) удельный тепловой поток дуги:

$$q(x, y) = q_0 e^{-\left(\frac{x^2}{a_T^2} + \frac{y^2}{b_T^2}\right)} \quad (3)$$

где q_0 – наибольший удельный тепловой поток в центре пятна нагрева;

a_T – большая полуось эллипса;

b_T – малая полуось эллипса.

Эффективная тепловая мощность нагрева изделия дугой равна:

$$q_u = \iint q dx dy = \iint q_0 e^{-\left(\frac{x^2}{a_T^2} + \frac{y^2}{b_T^2}\right)} dx dy = 2q_0 a_T b_T \text{arctg} \frac{a_T}{b_T}.$$

Отсюда получаем наибольший удельный тепловой поток в центре пятна нагрева:

$$q_0 = \frac{q_u}{2a_T b_T \operatorname{arctg} \frac{a_T}{b_T}} \quad (4)$$

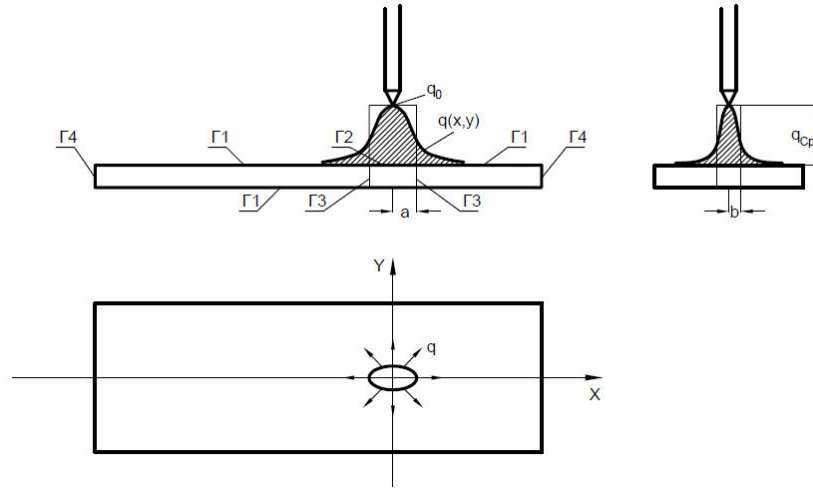


Рис. 1. – Нормально-эллиптическое распределение теплового потока

Г1 – адиабатические границы: $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ и $\frac{\partial U}{\partial n} = 0$; Г2 – поверхности ввода теплового потока и электрического тока: $T = T_{кин} = const$ и $U = U_1 = const$; Г3 – изотерма плавления: $T = T_{пл}$; Г4 – поверхности вывода теплового потока и электрического тока: $T = const$ и $U = const$.

Используя уравнения (3) и (4), получим выражение удельного теплового потока дуги:

$$q(x, y) = \frac{q_u}{2a_T b_T \operatorname{arctg} \frac{a_T}{b_T}} e^{-\left(\frac{x^2}{a_T^2} + \frac{y^2}{b_T^2}\right)}$$

Эффективная тепловая мощность нагрева изделия дугой q_u равна:

$$q_u = \eta_u U_D I,$$

где η_u – эффективный КПД дуги;

U_D , I – напряжение на дуге и сварочный ток.

Средний удельный тепловой поток равен наибольшему удельному тепловому потоку в центре пятна нагрева при нормально-эллиптическом распределении теплового потока:

$$q_{Cp} = q_0 = \frac{q_u}{2a_T b_T \operatorname{arctg} \frac{a_T}{b_T}} = \frac{\eta_u U_D I}{2a_T b_T \operatorname{arctg} \frac{a_T}{b_T}} \quad (5)$$

Плотность тока при нормально-эллиптическом распределении сварочного тока на поверхности контакта дуги с жидким металлом:

$$j(x, y) = j_0 e^{-\left(\frac{x^2}{a_3^2} + \frac{y^2}{b_3^2}\right)}$$

где j_0 – значение плотности тока в центре дуги;
 $a_{\text{Э}}$ – большая полуось эллипса;
 $b_{\text{Э}}$ – малая полуось эллипса.

Сварочный ток равен:

$$I = \iint j dx dy = \iint j_0 e^{-\left(\frac{x^2}{a_{\text{Э}}^2} + \frac{y^2}{b_{\text{Э}}^2}\right)} dx dy = 2j_0 a_{\text{Э}} b_{\text{Э}} \operatorname{arctg} \frac{a_{\text{Э}}}{b_{\text{Э}}}.$$

Отсюда получаем значение плотности тока в центре дуги:

$$j_0 = \frac{I}{2a_{\text{Э}} b_{\text{Э}} \operatorname{arctg} \frac{a_{\text{Э}}}{b_{\text{Э}}}}.$$

Средняя плотность тока равна значению плотности тока в центре при нормально-эллиптическом распределении теплового потока:

$$j_{\text{Ср}} = j_0 = \frac{I}{2a_{\text{Э}} b_{\text{Э}} \operatorname{arctg} \frac{a_{\text{Э}}}{b_{\text{Э}}}}. \quad (6)$$

Используя уравнения (5) и (6), получаем соотношение:

$$\frac{j_{\text{Ср}}}{q_{\text{Ср}}} = \frac{a_{\text{Г}} b_{\text{Г}} \operatorname{arctg} \frac{a_{\text{Г}}}{b_{\text{Г}}}}{\eta_{\text{и}} U_{\text{Д}} a_{\text{Э}} b_{\text{Э}} \operatorname{arctg} \frac{a_{\text{Э}}}{b_{\text{Э}}}}.$$

Подставив это соотношение в (2), найдем значение производной потенциала по температуре на поверхности контакта дуги с жидким металлом:

$$\frac{dU}{dT} = LT_{\text{кун}} \frac{j}{q} = \frac{LT_{\text{кун}} a_{\text{Г}} b_{\text{Г}} \operatorname{arctg} \frac{a_{\text{Г}}}{b_{\text{Г}}}}{\eta_{\text{и}} U_{\text{Д}} a_{\text{Э}} b_{\text{Э}} \operatorname{arctg} \frac{a_{\text{Э}}}{b_{\text{Э}}}}.$$

Исходя из найденных граничных условий на поверхности контакта дуги с жидким металлом при: $T = T_{\text{кун}}$, $U = U_1$,

$$\frac{dU}{dT} = \frac{LT_{\text{кун}} a_{\text{Г}} b_{\text{Г}} \operatorname{arctg} \frac{a_{\text{Г}}}{b_{\text{Г}}}}{\eta_{\text{и}} U_{\text{Д}} a_{\text{Э}} b_{\text{Э}} \operatorname{arctg} \frac{a_{\text{Э}}}{b_{\text{Э}}}},$$

из системы уравнений:

$$\begin{cases} C_1 T_{\text{кун}}^2 + C_2 = U_1 \\ 2C_1 T_{\text{кун}} = \frac{LT_{\text{кун}} a_{\text{Г}} b_{\text{Г}} \operatorname{arctg} \frac{a_{\text{Г}}}{b_{\text{Г}}}}{\eta_{\text{и}} U_{\text{Д}} a_{\text{Э}} b_{\text{Э}} \operatorname{arctg} \frac{a_{\text{Э}}}{b_{\text{Э}}}}. \end{cases}$$

определим произвольные постоянные уравнения (1):

$$C_1 = \frac{La_{\text{Г}} b_{\text{Г}} \operatorname{arctg} \frac{a_{\text{Г}}}{b_{\text{Г}}}}{2\eta_{\text{и}} U_{\text{Д}} a_{\text{Э}} b_{\text{Э}} \operatorname{arctg} \frac{a_{\text{Э}}}{b_{\text{Э}}}},$$

$$C_2 = -\frac{LT_{кун}^2 a_T b_T \operatorname{arctg} \frac{a_T}{b_T}}{2\eta_u U_{д} a_{\mathcal{E}} b_{\mathcal{E}} \operatorname{arctg} \frac{a_{\mathcal{E}}}{b_{\mathcal{E}}}} + U_1.$$

Подставив C_1 и C_2 в уравнение (1), получим уравнение распределения потенциала при дуговой сварке:

$$U = \frac{La_T b_T \operatorname{arctg} \frac{a_T}{b_T} (T^2 - T_{кун}^2)}{2\eta_u U_{д} a_{\mathcal{E}} b_{\mathcal{E}} \operatorname{arctg} \frac{a_{\mathcal{E}}}{b_{\mathcal{E}}}} + U_1.$$

Плотность тока в свариваемом изделии:

$$\vec{j} = -\sigma \operatorname{grad} U.$$

Подставив значение градиента электрического потенциала в это выражение, найдем:

$$\vec{j} = -\sigma \left(\bar{i} \frac{\partial U}{\partial x} + \bar{j} \frac{\partial U}{\partial y} + \bar{k} \frac{\partial U}{\partial z} \right).$$

Если среда однородна и распределение потенциала зависит только от температуры, то:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{dU}{dT} \frac{\partial T}{\partial x} \quad \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{dU}{dT} \frac{\partial T}{\partial y} \quad \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{dU}{dT} \frac{\partial T}{\partial z}.$$

Тогда:

$$\vec{j} = -\sigma \left(\bar{i} \frac{dU}{dT} \frac{\partial T}{\partial x} + \bar{j} \frac{dU}{dT} \frac{\partial T}{\partial y} + \bar{k} \frac{dU}{dT} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -\sigma \frac{dU}{dT} \left(\bar{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \bar{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \bar{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right),$$

$$\vec{j} = -\sigma \frac{dU}{dT} \operatorname{grad} T.$$

Из уравнения (1) найдем производную потенциала по температуре:

$$\frac{dU}{dT} = 2C_1 T$$

и, подставив ее в предыдущее уравнение, получим:

$$\vec{j} = -2C_1 \sigma T \operatorname{grad} T.$$

С учетом значения C_1 запишем формулу, определяющую распределение тока в изделии:

$$\vec{j} = -\frac{L\sigma T \operatorname{grad} T a_T b_T \operatorname{arctg} \frac{a_T}{b_T}}{\eta_u U_{д} a_{\mathcal{E}} b_{\mathcal{E}} \operatorname{arctg} \frac{a_{\mathcal{E}}}{b_{\mathcal{E}}}}.$$

Так как $\operatorname{grad} T = -\bar{q} / \lambda$, получим:

$$\vec{j} = \frac{L\sigma T \bar{q} a_T b_T \operatorname{arctg} \frac{a_T}{b_T}}{\lambda \eta_u U_{д} a_{\mathcal{E}} b_{\mathcal{E}} \operatorname{arctg} \frac{a_{\mathcal{E}}}{b_{\mathcal{E}}}}.$$

Зная, что $\frac{\sigma}{\lambda} = \frac{1}{LT}$, получим выражение, связывающее плотность тока с плотностью теплового потока, в виде:

$$\bar{j} = \frac{\bar{q} a_T b_T \operatorname{arctg} \frac{a_T}{b_T}}{\eta_u U_{д} a_{Э} b_{Э} \operatorname{arctg} \frac{a_{Э}}{b_{Э}}}.$$

По полученному выражению можно рассчитывать плотность сварочного тока в изделии по известному температурному полю при указанных граничных условиях.

ВЫВОД

Получено выражение, связывающее плотность тока с плотностью теплового потока в изделии, при сварке дугой эллиптической формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Завьялов, В.Е. и др. Использование продольного магнитного поля при наплавке под флюсом [Текст] / В.Е. Завьялов, Я.П. Звороно, А.Б. Петраков // Сварочное производство. – 1990. – №2 – С. 3–6.
2. Рыжов Р.М. Влияние импульсных электромагнитных воздействий на процессы формирования и кристаллизации швов [Текст] / Р.М. Рыжов // Автоматическая сварка. – 2007. – №2. – С. 56–58.
3. Акулов, А.И. и др. Удержание жидкого металла сварочной ванны поперечным магнитным полем [Текст] / А.И. Акулов, А.М. Рыбачук // Сварочное производство. – 1972. – №2. – С. 9–10.
4. Акулов, А.И. и др. Особенности формирования шва при сварке в поперечном магнитном поле [Текст] / А.И. Акулов, А.М. Рыбачук, Г.Г. Чернышов // Сварочное производство. – 1979. – №7. – С. 11–14.
5. Кубарев, В.Ф. и др. Магнитогидродинамическое торможение расплава в сварочной ванне [Текст] / В.Ф. Кубарев, А.М. Рыбачук, А.И. Акулов, Г.Г. Чернышов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1984. – №9. – С. 134–136.
6. Nomura K., Ogino Y., Haga T., Hitara Y. Influence of magnet configuration on magnetic controlled TIG arc welding // Transactions of JWRI. 2010. Vol. 39, № 2. pp. 209–210.
7. Nomura K., Morisaki K., Hitara Y. Magnetic control of arc plasma and its modelling // Welding in the word. 2009. Vol. 53, №7/8, pp. 181–187.
8. Рыбачук, А.М. и др. Деформация дуги в квадрупольном магнитном поле [Текст] / А.М. Рыбачук, Ц. Гу, Н.В. Крысько // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – №8-1. – С. 72–78.
9. Рыбачук, А.М. и др. Распределение сварочного тока в изделии и ванне при дуговой сварке [Текст] / А.М. Рыбачук, Г.Г. Чернышов // Сварка и диагностика. – 2011. – №6 – С. 16–20.

REFERENCES

- [1] Zavyalov V.Ye., Zvorono Ya.P., Petrakov A.B. Ispolzovaniye prodolnogo magnitnogo polya pri naplavke pod flyusom [Using the longitudinal magnetic field in surfacing Submerged]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding fabrication], 1990, №2, ISSN 0491-6441, pp. 3–6. (in Russian)
- [2] Ryzhov R.M. Vliyaniye impulsnykh elektromagnitnykh vozdeystviy na protsessy formirovaniya i kristallizatsii shvov [Effect of pulsed electromagnetic effects on the formation and crystallization of seam]. Avtomaticheskaya svarka [Automatic welding], 2007, №2, ISSN 0005-111X, pp. 56–58. (in Russian)
- [3] Akulov A.I., Rybachuk A.M. Podderzhaniye zhidkogo metalla svarochnoy vannы poperechnym magnitnym polem [Maintaining a liquid metal of the weld pool by a transverse magnetic field]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding fabrication], 1972, №2, ISSN 0491-6441, pp. 9–10. (in Russian)
- [4] Akulov A.I., Rybachuk A.M., Chernyshov G.G. Osobennosti formirovaniya shva pri svarke v poperechnom magnitnom pole [Features of formation of the welding seam in a transverse magnetic field]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding fabrication], 1979, №7, ISSN 0491-6441, pp. 11–14. (in Russian)
- [5] Kubarev V.F., Rybachuk A.M., Akulov, A.I., Chernyshov G.G. Magnitogidrodinamicheskoye tormozheniye raspлава v svarochnoy ванне [Magnetohydrodynamic deceleration of the melt in the weld puddle]. Izvestiya vuzov, Mashinostroyeniye [Proceedings of the universities, Mechanical

- engineering], 1984, №9, ISSN 0536-1044, pp. 134–136. (in Russian)
- [6] Nomura K., Ogino Y., Haga T., Hitara Y. Influence of magnet configuration on magnetic controlled TIG arc welding // Transactions of JWRI. 2010. Vol. 39, №2, ISSN 0387-4508, pp. 209-210. Available at: <http://hdl.handle.net/11094/5373> (in English)
- [7] Nomura K., Morisaki K., Hitara Y. Magnetic control of arc plasma and its modelling // Welding in the world. 2009. Vol. 53, №7/8, ISSN 0043-2288, DOI 10.1007/BF03266730, pp. 181–187. (in English)
- [8] Rybachuk A.M., Gu J., Krysko N.V. Deformatsiya dugi v kvadropolnom magnitnom pole [The deformation of the arc in the quadrupole magnetic field]. Aktualnyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk [Actual problems of humanities and natural sciences], 2015, №8-1, ISSN 2073-0071, pp. 72–78. (in Russian)
- [9] Rybachuk A.M., Chernyshov G.G. Raspredeleniye svarochnogo toka v izdelii i vanne pri dugovoy svarke [Welding current distribution in the product and the bath during arc welding]. Svarka i Diagnostika [Welding and Diagnostics], 2011, №6, ISSN 2071-5234, pp. 16-20. (in Russian)

The Electric Field in the Work-piece in Arc Welding Normally Elliptical Source

Jieren Gu, A.M. Rybachuk

*Bauman Moscow State Technical University,
5 Vtoraja Baumanskaya St., Moscow, Russia 105005
e-mail: amrybachuk@mail.ru*

Abstract – In the paper the distribution of welding current in the workpiece and the pool in arc welding is considered, in order to effectively use the methods of weld formation controlled magnetic field. We choose normally elliptical distribution heat source model and choose normally elliptical distribution welding current model on the contact surface between arc and liquid metal. In the work the contact surface between arc and liquid metal has been adopted equipotential and isothermal at a temperature equal to the boiling point of liquid metal, neglecting the influence of heat sinks through the outer surface of the workpiece. In this case we calculate the distribution of welding current density in the workpiece, which depends on the distribution of heat flux density. The relation between the electric current and heat flux is derived from the calculation.

Keywords: arc welding, electric field, welding current density, heat flux, normally elliptical heat source.