

УДК 621.791.75

## **Распределение сварочного тока в изделии и ванне при дуговой сварке**

**Рыбачук А. М.<sup>1</sup>, Гу Ц.<sup>1,\*</sup>**

[\\*gujieren12345@163.com](mailto:gujieren12345@163.com)

<sup>1</sup>МГТУ 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-кругового распределения теплового потока и модель нормально-кругового 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-круговой источник тепла

---

Дуговая сварка находит наиболее широкое использование в сварочных технологиях. 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 [1,2].

Использование магнитных полей позволяет бесконтактно и оперативно управлять качеством сварочных процессов. Поэтому постоянно проводятся исследования возможностей эффективного использования магнитных полей при дуговой сварке и наплавке [3,4].

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 [5,6] и способы формирования шва поперечным магнитным полем [7-9]. Для эффективного использования этих методов необходимо уметь рассчитывать электрическое поле в сварочной ванне и изделии.

При дуговой сварке происходит деформация температурного поля при движении дуги [10,11]. Поэтому происходит деформация электрического поля в изделии [12]. Эта

деформация связана с деформацией температурного поля в изделии при движении дуги со скоростью сварки. Удельная электропроводность металлов и сплавов сильно зависит от температуры, снижается с увеличением её, а при температуре плавления уменьшается скачком [13].

Исследование распределения тока по изделию при дуговой сварке было выполнено в работах [12,14] моделированием на электропроводной бумаге. Были построены линии тока для случая автоматической сварки под слоем флюса для конкретного режима сварки и показано, что плотность теплового потока и плотность сварочного тока перед дугой выше, чем за дугой.

В работе [15] получено общее решение дифференциального уравнения, выражающее связь потенциала  $U$  и температуры  $T$  в изделии при дуговой сварке:

$$U = C_1 T^2 + C_2, \quad (1)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – произвольные постоянные.

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 [15]. 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 теплоотвода через наружные поверхности свариваемого изделия.

Задача работы является в получении частного решения дифференциального уравнения (1), которое выражает связь потенциала и температуры для того, чтобы можно было по известному распределению температуры рассчитать распределение плотности тока в свариваемом изделии.

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

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

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

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

где  $j$  - плотность тока;  $q$  - удельный тепловой поток;  $\sigma$  - удельная электропроводность;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности. Следовательно,

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

По закону Видемана – Франца

$$\lambda / \sigma = LT_{кип},$$

поэтому

$$\frac{dU}{dT} = LT_{кип} \frac{j}{q}, \quad (2)$$

где  $T_{кип}$  - температур кипения;  $L$  - число Лоренца.

Для нормально-кругового распределения теплового потока удельный тепловой поток дуги

$$q(r) = q_0 e^{-K_T r^2}, \quad (3)$$

где  $q_0$  – наибольший удельный тепловой поток в центре пятна нагрева, равный

$$q_0 = \frac{K_T}{\pi} q_H; \quad (4)$$

$K_T$  – коэффициент сосредоточенности теплового потока дуги ;

$q_H$  – эффективная тепловая мощность нагрева изделия дугой, равный

$$q_H = \eta_H U_d I; \quad (5)$$

$\eta_H$  – эффективный КПД дуги ;

$U_d, I$  – напряжение на дуге и сварочный ток.

Для оценки коэффициента сосредоточенности введем фиктивный источник с той же мощностью  $q_H$ , что и заданный нормальный, но распределенный равномерно по пятну радиуса  $r_0$  с удельным тепловым потоком, равным наибольшему удельному тепловому потоку  $q_0$  нормального источника [10]. Эффективная мощность  $q_H$  выражается объемом, ограниченным поверхностью удельного теплового потока  $q(r)$ . Построим равновеликий цилиндр с объемом  $q_H$  и с ординатой  $q_0$ .

Объем цилиндра

$$q_H = \pi r_{0T}^2 q_0,$$

Отсюда

$$r_{0T}^2 = \frac{q_H}{\pi q_0}. \quad (6)$$

Сравнивая (6) с выражением (4), получим

$$r_{0T}^2 = \frac{1}{K_T}, r_{0T} = \frac{1}{\sqrt{K_T}}.$$

Средний удельный тепловой поток в пятне нагрева равен

$$q_{cp} = \frac{q_{II}}{\pi r_{0T}^2} = \frac{K_T q_{II}}{\pi} = \frac{K_T \eta_{II} U_d I}{\pi}. \quad (7)$$

Плотность тока при нормально-круговом распределении сварочного тока на поверхности контакта дуги с жидким металлом описывается выражением

$$j(r) = j_0 e^{-K_{\text{э}} r^2}, \quad (8)$$

где  $j_0$  – значение плотности тока в центре дуги равно

$$j_0 = \frac{K_{\text{э}} I}{\pi};$$

$K_{\text{э}}$  – коэффициент сосредоточенности тока.

Для оценки коэффициента сосредоточенности введем фиктивный источник с тем же током  $I$ , что и заданный нормальный, но распределенный равномерно по пятну радиуса  $r_{0\text{э}}$ .

Средняя плотность тока в дуге равна

$$j_{cp} = \frac{I}{\pi r_{0\text{э}}^2} = \frac{K_{\text{э}} I}{\pi}. \quad (9)$$

Используя уравнения (7) и (9), получаем соотношение

$$\frac{j_{cp}}{q_{cp}} = \frac{K_{\text{э}}}{\eta_{II} U_d K_T}.$$

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

$$\frac{dU}{dT} = LT_{\text{кип}} \frac{j}{q} = \frac{LT_{\text{кип}} K_{\text{э}}}{\eta_{II} U_d K_T}.$$

Исходя из найденных граничных условий на поверхности контакта дуги с жидким металлом при:  $T = T_{\text{кип}}$ ,  $U = U_1$ ,  $\frac{dU}{dT} = \frac{LT_{\text{кип}} K_{\text{э}}}{\eta_{II} U_d K_T}$ ,

из системы уравнений

$$\begin{cases} C_1 T_{\text{кип}}^2 + C_2 = U_1; \\ 2C_1 T_{\text{кип}} = \frac{LT_{\text{кип}} K_{\text{э}}}{\eta_{II} U_d K_T} \end{cases}$$

определим произвольные постоянные уравнения (1)

$$C_1 = \frac{LK_{\text{э}}}{2\eta_{II} U_d K_T};$$

$$C_2 = -\frac{LT_{\text{кип}}^2 K_{\text{э}}}{2\eta_{II} U_d K_T} + U_1.$$

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

$$U = \frac{LK_{\text{э}}(T^2 - T_{\text{кип}}^2)}{2\eta_{II} U_d K_T} + U_1.$$

Определим распределение плотности тока в свариваемом изделии:

$$\bar{j} = -\sigma \text{grad}U.$$

Подставив значение градиента электрического потенциала в это выражение, найдем

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

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

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

Из уравнения (1) найдем производную потенциала по температуре

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

и, подставив ее в предыдущее уравнение, получим

$$\bar{j} = -2C_1 \sigma T \text{grad}T.$$

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

$$\bar{j} = -\frac{L\sigma K_3 T \text{grad}T}{\eta_{II} U_d K_T}.$$

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

$$\bar{j} = \frac{L\sigma K_3 T \bar{q}}{\lambda \eta_{II} K_T U_d}.$$

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

$$\bar{j} = \frac{K_3 \bar{q}}{\eta_{II} K_T U_d}.$$

Это уравнение показывает, что векторы плотности тока и теплового потока совпадают по направлению в каждой точке, линии тока совпадают с линиями теплового потока, следовательно, тепловые и электрические поля подобны при указанных граничных условиях.

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

Научной новизной является установление взаимосвязи поля плотности электрического тока с полем удельного теплового потока.

## Список литературы

1. Неровный В.М. Способы стабилизации и управления тепловыми характеристиками дугового разряда при пайке в вакууме // Сварка и диагностика. 2013. № 2. С. 34-40.
2. Неровный В.М. Теплоэнергетические характеристики сварочной дуги низкого давления // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 8-1. С. 46-49.
3. Крысько Н.В., Рыбачук А.М. Область, чувствительная к внешним магнитным полям при сварке в  $\text{CO}_2$  // Сварка и диагностика. 2013. № 5. С. 36-40.
4. Крысько Н.В., Рыбачук А.М. Особенности области, чувствительной к внешним магнитным полям при сварке в аргоне и смесях // Сварка и диагностика. 2014. № 5. С. 54-56.
5. Завьялов В. Е., Звороно Я. П., Петраков А. Б. Использование продольного магнитного поля при наплавке под флюсом // Сварочное производство. 1990. № 2. С. 3-6.
6. Рыжов Р. М. Влияние импульсных электромагнитных воздействий на процессы формирования и кристаллизации швов // Автоматическая сварка. 2007. № 2. С. 56-58.
7. Акулов А.И., Рыбачук А.М. Удержание жидкого металла сварочной ванны поперечным магнитным полем // Сварочное производство. 1972. № 2. С. 9-10.
8. Акулов А.И., Рыбачук А.М., Чернышов Г.Г. Особенности формирования шва при сварке в поперечном магнитном поле // Сварочное производство. 1979. № 7. С. 11-14.
9. Кубарев В.Ф., Рыбачук А.М., Акулов А.И., Чернышов Г.Г. Магнитогидродинамическое торможение расплава в сварочной ванне // Известия вузов. Машиностроение. 1984. № 9. С. 134-136.
10. Коновалов А.В., Куркин А.С., Макаров Э.Л., Неровный В.М., Якушин Б.Ф. Теория сварочных процессов: учебник для вузов / под. ред. В.М. Неровного. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 752 с.
11. Куркин А.С., Королев С.А., Пономарев П.А. Обоснование исключения послесварочной термической обработки кольцевых стыков магистральных газопроводов с толщиной стенки свыше 30 мм из стали к65 // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 5. С. 10-13. DOI: [10.7463/0513.0552162](https://doi.org/10.7463/0513.0552162)
12. Райчук Ю.И. Распределение тока по пластине при дуговой сварке // Автоматическая сварка. 1967. № 4. С. 19-22.
13. Микрюков В.Е. Теплопроводность металлов и сплавов. М.: Металлургиздат, 1959. 260 с.
14. Зернов А.В., Кубрин В.С., Пацкевич И.Р. Моделирование распределения тока на электропроводной бумаге // Сварочное производство. 1980. № 12. С. 35-36.  
Рыбачук А.М., Чернышов Г.Г. Распределение сварочного тока в изделии и ванне при дуговой сварке // Сварка и Диагностика. 2011. № 6. С. 16-20.

## **Welding Current Distribution in the Work-piece and Pool in Arc Welding**

A.M. Rybachuk<sup>1</sup>, J. Gu<sup>1,\*</sup>

[\\*gujieren12345@163.com](mailto:gujieren12345@163.com)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** arc welding, electric field, welding current density, heat flux, Gauss heat source

---

In order to select the optimal configuration of controlling magnetic fields and build rational construction of magnetic systems, we need to know the distribution of welding current in the molten metal of the weld pool. So the objective of the work is to establish the calculated methods for determining current density in the weld pool during arc welding. The distribution of welding current in the pool depends on the field of the electrical resistance, which is determined by the deformed temperature field while arc moves with the welding speed. The previous works have shown experimentally and by simulation on the conductive paper that deformation of temperature field defines deformation of electric field. On the basis thereof, under certain boundary conditions the problem has been solved to give a general solution of differential equation, which relates the potential distribution to the temperature in the product during arc welding. This solution is obtained under the following boundary conditions: 1) metal is homogeneous; 2) input and output surfaces of heat flux and electric current coincide; 3) input and output surfaces of heat flux and electric current are insulated and equipotential; 4) other (lateral) surfaces are adiabatic boundaries. Therefore, this paper pays basic attention to obtaining the analytical solution of a general differential equation, which relates distribution of potential to the temperature in the product. It considers the temperature field of the heat source, which moves at a welding speed with normal-circular distribution of the heat flow at a certain concentration factor. The distribution of current density is calculated on the assumption that the welding current is introduced through the same surface as the heat flux and the distribution of current density corresponds to the normally circular at a certain concentration factor. As a result, we get an expression that allows us to calculate the current density from the known distribution of heat flux density in the product. Using the results we can define the desired configuration of magnetic fields to create the necessary electromagnetic forces in the weld pool.

## References

1. Nerovnyi V.M. Methods for the stabilization and control of thermal characteristics of arc when soldering in vacuo. *Svarka i diagnostika = Welding and Diagnostics*, 2013, no. 2, pp. 34-40. (in Russian).
2. Nerovnyi V.M. Heat and power characteristics of the low-pressure arc. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk = Actual problems of the humanities and the natural sciences*, 2014, no. 8-1, pp. 46-49. (in Russian).
3. Krys'ko N.V., Rybachuk A.M. The dimensions of sensible to the outward magnetic field during GMAW. *Svarka i diagnostika = Welding and Diagnostics*, 2013, no. 5, pp. 36-40. (in Russian).
4. Krys'ko N.V., Rybachuk A.M. The dimensions of sensible to the outward magnetic field during welding in argon and mixtures. *Svarka i diagnostika = Welding and Diagnostics*, 2014, no. 5, pp. 54-56. (in Russian).
5. Zav'yalov V. E., Zvorono Ya. P., Petrakov A. B. The use of longitudinal magnetic field in surfacing Submerged. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1990, no. 2, pp. 3-6. (in Russian).
6. Ryzhov R. M. Effect of pulsed electromagnetic actions on formation and crystallization of welds. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*, 2007, no. 2, pp. 56-58. (in Russian).
7. Akulov A.I., Rybachuk A.M. Retention of the molten metal in molten pool using transverse magnetic field. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1972, no. 2, pp. 9-10. (in Russian).
8. Akulov A.I., Rybachuk A.M., Chernyshov G.G. Features of the formation of seam during welding in transverse magnetic field. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1979, no. 7, pp. 11-14. (in Russian).
9. Kubarev V.F., Rybachuk A.M., Akulov A.I., Chernyshov G.G. Magnetohydrodynamic deceleration of the melt in the weld pool. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1984, no. 9, pp. 134-136. (in Russian).
10. Konovalov A.V., Kurkin A.S., Makarov E.L., Nerovnyi V.M., Yakushin B.F. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2007. 752 p. (in Russian).
11. Kurkin A.S., Korolev S.A., Ponomarev P.A. Justification of elimination of post-weld heat treatment of welded circular butts in a gas pipelines made of X80 steel with wall thickness over 30 mm. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 5, pp. 10-13. DOI: [10.7463/0513.0552162](https://doi.org/10.7463/0513.0552162) (in Russian).
12. Raichuk Yu.I. The current distribution across the plate during arc welding. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*, 1967, no. 4, pp. 19-22. (in Russian).
13. Mikryukov V.E. *Teploprovodnost' metallov i splavov* [The thermal conductivity of metals and alloys]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1959. 260 p. (in Russian).



14. Zernov A.V., Kubrin V.S., Patskevich I.R. Simulation of current distribution on the conductive paper. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1980, no. 12, pp. 35-36. (in Russian).
15. Rybachuk A.M., Chernyshov G.G. Welding current distribution in the workpiece and the pool in arc welding. *Svarka i Diagnostika = Welding and Diagnostics*, 2011, no. 6, pp. 16-20. (in Russian).