

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ МАГНИТНОГО МЕТАЛЛА

© 2018 Гу Ц., Рыбачук А.М., Козырев М.Е.

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

В статье выполнены экспериментальные измерения индукции магнитных полей в зоне дуговой сварки низкоуглеродистой стали толщиной 10 мм. Для учёта искажения магнитных полей магнитным материалом был выполнен расчёт немагнитной зоны, ограниченной изотермой Кюри. Измерения магнитных полей было выполнено без сварки, цифровым гауссметром GM2. В результате были получены данные о деформации четырёхполюсного магнитного поля в направлении сварки и по толщине изделия. Определено, что смещение оси магнитного поля и нарушение симметрии магнитных полей четырехполюсной магнитной системы происходит в направлении сварки.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, четырёхполюсная магнитная система, ферромагнитный металл, смещение магнитного поля.

Поступила в редакцию: 25.05.2018

Дуговая сварка находит наиболее широкое использование в сварочных технологиях. Качественное формирование шва всегда являлась одной из основных проблем при автоматической дуговой сварке. 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 [1-3]. 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 [4-8].

При дуговой сварке широко применяются внешние магнитные поля, взаимодействующие со сварочным током в жидком металле сварочной ванны, для управления качеством металла и формы шва. В результате использования внешних магнитных полей различного направления можно изменять положение, форму, характер горения дуги, изменять металлургические и геометрические параметры сварного шва и много другое.

Наиболее простым способом регулирования массовых сил в сварочной ванне является создание массовых электромагнитных сил в жидком металле путем введения в сварочную ванну поперечного магнитного поля. Через жидкий металл сварочной ванны проходит растекающийся по свариваемому изделию сварочный ток. При вводе в сварочную ванну поперечного магнитного поля, пронизывающего жидкий металл, взаимодействие сварочного тока с магнитным полем создает в жидком металле массовые электромагнитные силы, направленные вверх или вниз в зависимости от взаимного направления магнитного поля и сварочного тока.

Для создания поперечного магнитного поля в области сварочной ванны и сохранения устойчивого горения дуги используется квадрупольное магнитное поле. Квадрупольное магнитное поле используется не только для формирования шва, но и для деформирования дуги, изменяя её технологические свойства [9-13].

В работе выполнены экспериментальные измерения индукции магнитных полей в зоне дуговой сварки низкоуглеродистой стали толщиной 10 мм.

Для учёта искажения магнитных полей магнитным материалом был выполнен расчёт немагнитной зоны, ограниченной изотермой Кюри. В расчёте были использованы параметры режима автоматической сварки под флюсом пластины с полным

проплавлением. Расчеты проведены по модели подвижного точечного источника в полубесконечном теле, используя выражение [14]:

$$T(R, x) = \frac{q}{2\pi\lambda R} \exp\left(-\frac{v}{2a}(R+x)\right),$$

где  $T$  – температура;

$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  – длина радиус-вектора рассматриваемой точки полубесконечного тела в подвижной системе координат;

$x$  – абсцисса точки в подвижной системе координат;

$q$  – эффективная тепловая мощность дуги, Вт;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м. град);

$v$  – скорость сварки, м/с;

$a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

Так как при сварке пластины определить распределение магнитного поля в зоне сварки невозможно, по данным расчёта была вырезана в пластине немагнитная зона (изотерма Кюри) (рис. 1).

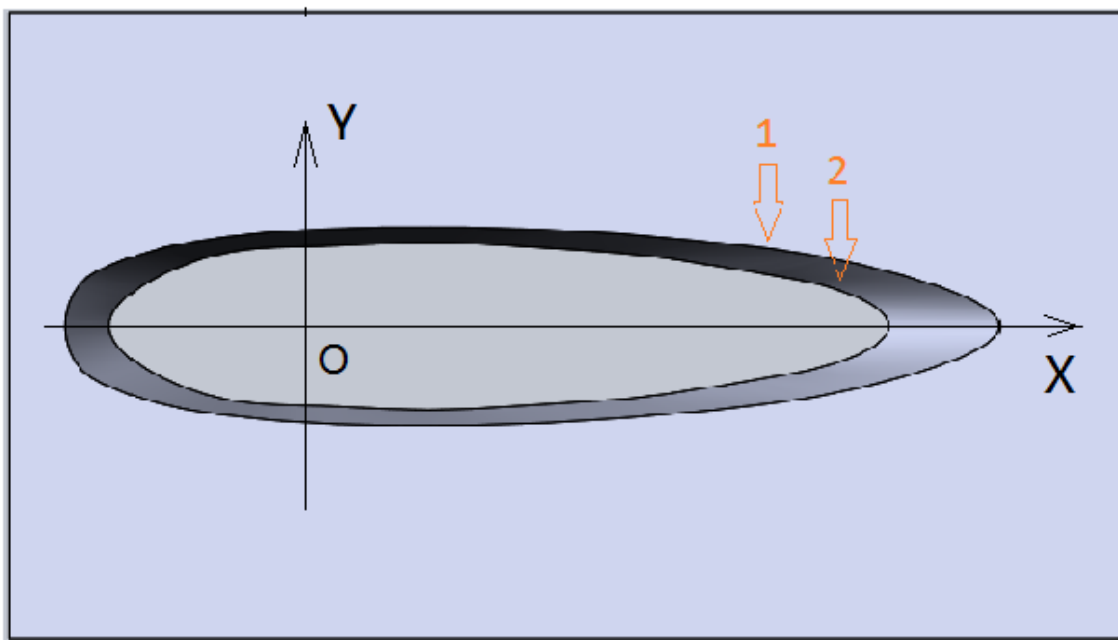


Рисунок 1 – Пластина с немагнитной зоной: 1 – изотерма Кюри на верхней поверхности, 2 – изотерма Кюри на нижней поверхности [Nonmagnetic zone plate : 1 - Curie isotherm on the upper surface, 2 - Curie isotherm on the lower surface]

Измерения проводили цифровым гауссметром GM2, оснащенный поперечным ST щупом с размерами 66x3,6x0,8 мм с установленным на конце датчиком Холла размерами 0,2x0,2 мм [15]. Датчик Холла перемещали вдоль оси  $OX$  с помощью суппортов с погрешностью  $\pm 0,05$  мм. Погрешность измерения индукции магнитного поля гауссметром GM2 составляла не более 1%.

В результате были получены данные о деформации четырёхполюсного магнитного поля в направлении сварки и по толщине изделия. На рисунках 2 и 3 показаны значения индукции магнитных полей при разных токах в катушках магнитной системы и разных расстояниях от полюсов.

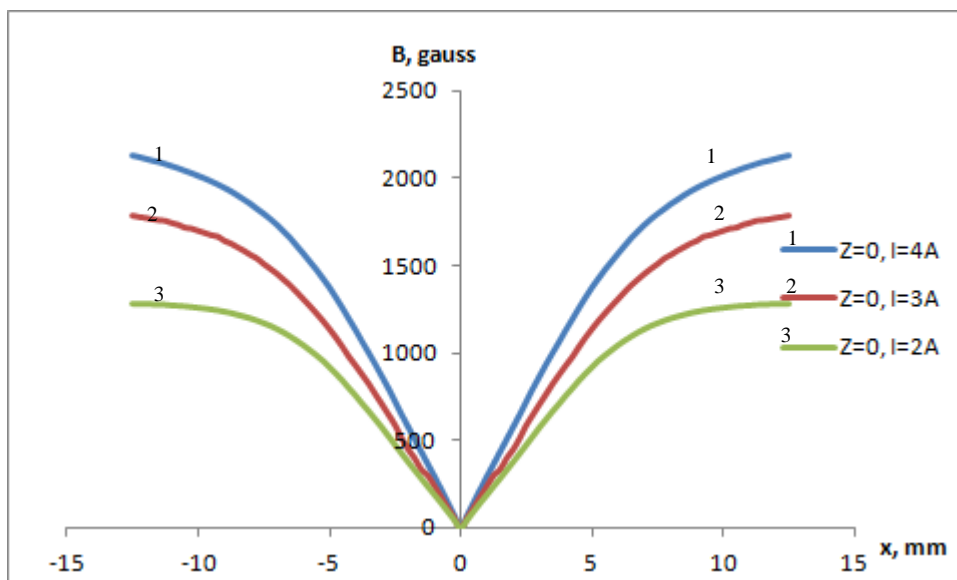


Рисунок 2 – Распределение магнитного поля при разных токах без пластины [The distribution of the magnetic field at different currents without a plate]

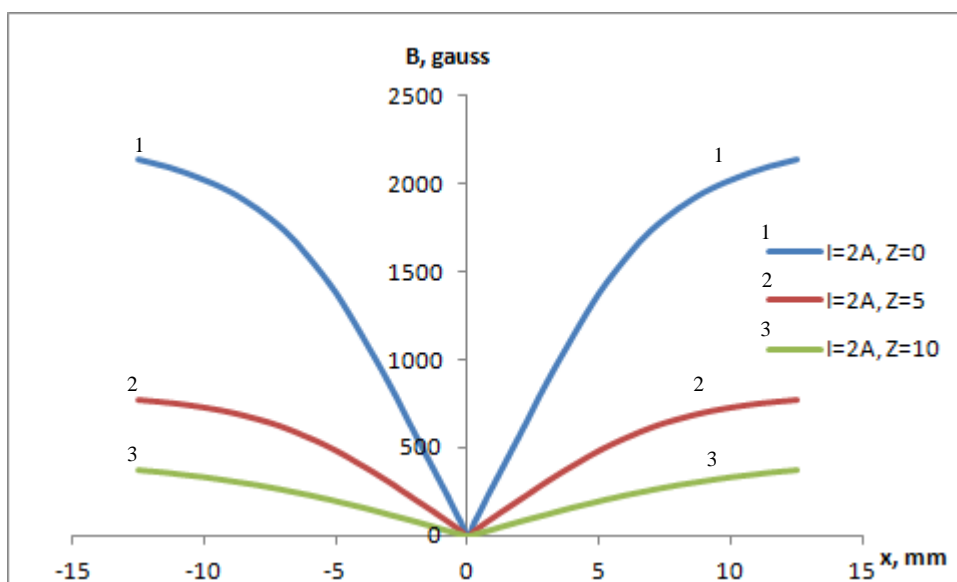


Рисунок 3 – Распределение магнитного поля при разных расстояниях от полюсов без пластины [The distribution of the magnetic field at different distances from the poles without a plate]

В процессе сварки ферромагнитных деталей, при одной и той же величине тока магнитное поле в области сварочной ванны уменьшается. Кроме этого происходит уменьшение вводимого магнитного поля по толщине свариваемого изделия. Определено, что смещение оси магнитного поля и нарушение симметрии магнитных полей четырехполюсной магнитной системы происходит в направлении сварки (рис. 4 и 5).

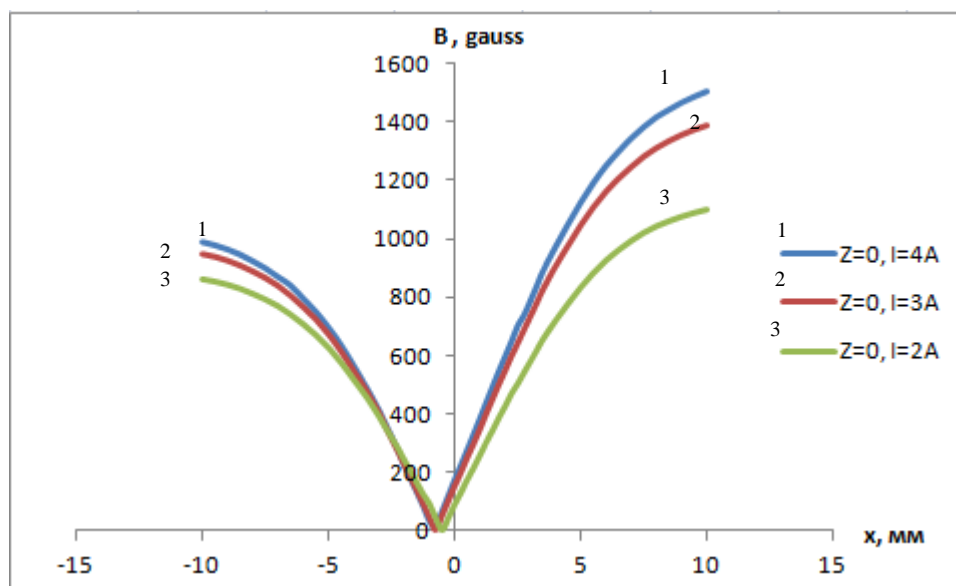


Рисунок 4 – Распределение магнитного поля при разных токах в изделии [The distribution of the magnetic field at different currents in the product]

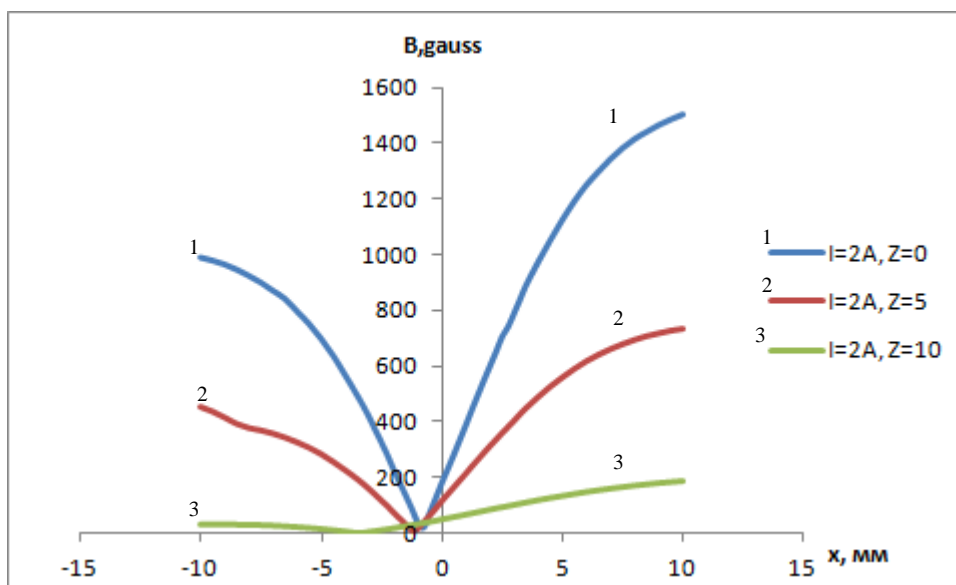


Рисунок 5 – Распределение магнитного поля по толщине свариваемого изделия [Distribution of the magnetic field along the thickness of the welded part]

Из-за наличия несимметричной относительно оси электрода вдоль линии сварки немагнитной зоны ось магнитного поля смещается в направлении сварки (рис. 6). На рисунке 7 показана зависимость величины смещения от тока в катушках магнитной системы и расстояния от поверхности изделия. При увеличении тока в катушках смещение оси магнитного поля увеличивается. Но когда тока более 3А, смещение почти не меняется. И по толщине изделия смещение оси магнитного поля увеличивается.

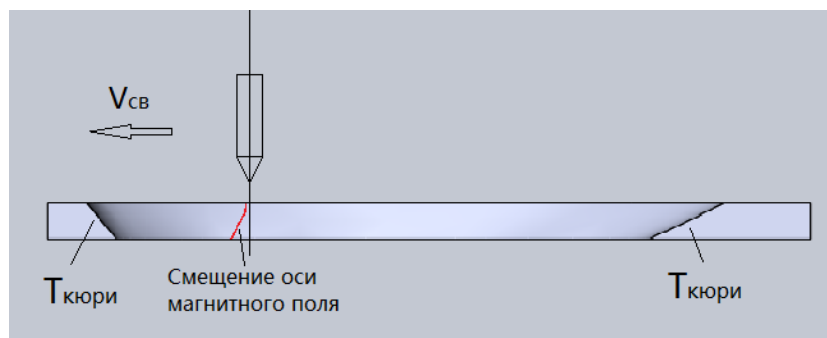


Рисунок 6 – Смещение оси магнитного поля при дуговой сварке магнитных металлов [Displacement of the axis of the magnetic field during arc welding of magnetic metals]

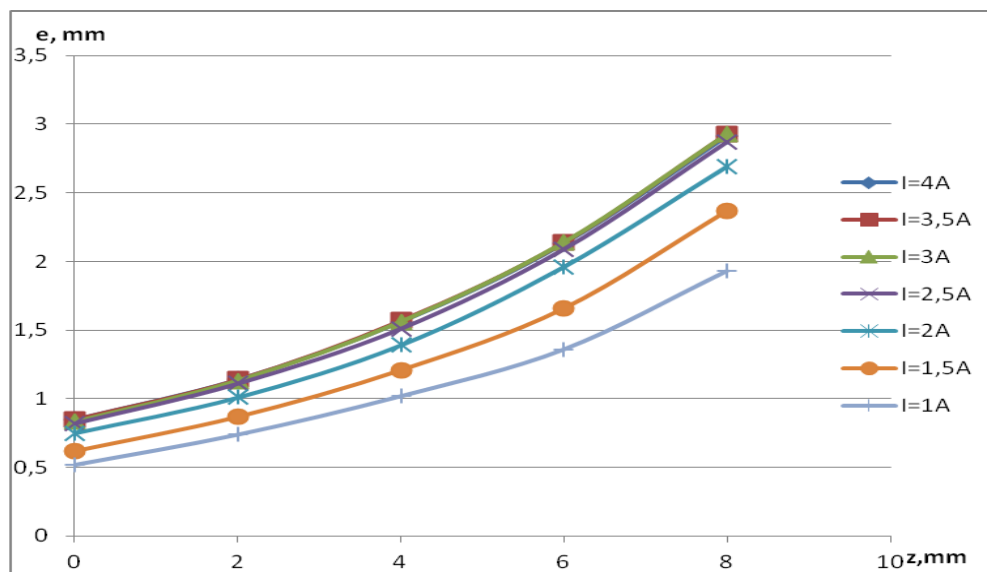


Рисунок 7 – Смещение оси магнитного поля при разных токах в катушках магнитной системы и по толщине изделия [The axis displacement of the magnetic field at different currents in the magnetic system coils and along the product thickness]

## ВЫВОДЫ

- 1) Наличие ферромагнитного свариваемого металла уменьшает магнитное поле в сварочной ванне. Магнитное поле уменьшается по толщине свариваемого изделия.
- 2) Ось четырёхполюсного магнитного поля смещается в направлении сварки.
- 3) Величина смещения оси магнитного поля зависит от тока в катушках магнитной системы и расстояния от поверхности изделия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыжов, Р.М. Влияние импульсных электромагнитных воздействий на процессы формирования и кристаллизации швов [Текст] / Р.М. Рыжов // Автоматическая сварка. – 2007. – №2. – С. 56-58.
2. Завьялов, В.Е. 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.
3. Акулов, А.И. Удержание жидкого металла сварочной ванны поперечным магнитным полем [Текст] / А.И. Акулов, А.М. Рыбачук // Сварочное производство. – 1972. – №2. – С. 3-4.
4. Акулов, А.И. 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. Коновалов, А.В. Теория сварочных процессов [Текст] / А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Макаров, В.М. Неровный, Б.Ф. Якушин; под ред. В.М. Неровного. – Москва : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2007. – 752 с.

6. Куркин, А.С. Обоснование исключения послесварочной термической обработки кольцевых стыков магистральных газопроводов с толщиной стенки свыше 30 мм из стали к65 [Текст] / А.С. Куркин, С.А. Королев, П.А. Пономарев // Наука и образование. – 2013. – № 5. – С. 61-74.
7. Райчук, Ю.И. Распределение тока по пластине при дуговой сварке [Текст] / Ю.И. Райчук // Автоматическая сварка. – 1967. – № 4. – С. 19-22.
8. Рыбачук, А.М. 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.
9. Рыбачук, А.М. 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. 73-78.
10. Крысько, Н.В. Область, чувствительная к внешним магнитным полям при сварке в CO<sub>2</sub> [Текст] / Н.В. Крысько, А.М. Рыбачук // Сварка и диагностика. – 2013. – № 5. – С. 36-40.
11. Крысько, Н.В. Особенности области, чувствительной к внешним магнитным полям при сварке в аргоне и смесях [Текст] / Н.В. Крысько, А.М. Рыбачук // Сварка и диагностика. – 2014. – № 5. – С. 54-56.
12. Гу, Ц. Электрическое поле в изделии при дуговой сварке нормально-эллиптическим источником [Текст] / Ц. Гу, А.М. Рыбачук // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 4. – С. 77-83.
13. Гу, Ц. Анализ магнитного поля квадрупольной магнитной системы численным моделированием [Текст] / Ц. Гу, Н.В. Крысько, А.М. Рыбачук // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2016. – № 11 (ч. 1). – С. 74-79.
14. Рыкалин, Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке [Текст] / Н.Н. Рыкалин. – Москва : МАШГИЗ, 1951. – 296 с.
15. Гу, Ц. Деформация магнитного поля при дуговой сварке магнитных металлов [Текст] / Ц. Гу, А.М. Рыбачук // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 4. – С. 70-77.

#### REFERENCES

- [1] 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. P. 56-58 (in Russian).
- [2] Zavyalov V.Ye., Zvorono Ya.P., Petrakov A.B. Ispolzovaniye prodolnogo magnitnogo polya pri naplavke pod flyusom [Using the Longitudinal Magnetic Field in Submerged Surfacing]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Fabrication]. 1990. № 2. P. 3-6 (in Russian).
- [3] Akulov A.I., Rybachuk A.M. Uderzhaniye zhidkogo metalla svarochnoy vanny poperechnym magnitnym polem [Maintaining a Liquid Metal of Weld Pool by a Transverse Magnetic Field]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Fabrication]. 1972. № 2. P. 3-4 (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 Transverse Magnetic Field]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Fabrication]. 1979. №7. P. 11-14 (in Russian).
- [5] Konovalov A.V., Kurkin A.S., Makarov E.L., Nerovny V.M., Yakushin B.F. Teoriya svarochnykh protsessov [Theory of Welding Processes]. M. Pub. "Izdatelstvo MGTU im. N.E. Baumana" [Bauman Moscow State Technical University Publishing House]. 2007. 752 p. (in Russian).
- [6] Kurkin A.S., Korolev A.S., Ponomarev P.A. Obosnovaniye isklyucheniya poslesvarochnoy termicheskoy obrabotki kol'tsevykh stykov magistral'nykh gazoprovodov s tolshchinoy stenki svyshe 30 mm iz stali k65 [Justification of Elimination of Post-Weld Heat Treatment of Welded Circular Butts in Gas Pipelines Made of X80 Steel with Wall Thickness over 30 mm]. Nauka i obrazovaniye [Science and education]. 2013. № 5. P. 61-74 (in Russian).
- [7] Raychuk YU.I. Raspredeleniye toka po plastine pri dugovoy svarke [Current Distribution over the Plate During Arc Welding]. Avtomaticheskaya svarka [Automatic Welding]. 1967. №4. P. 19-22 (in Russian).
- [8] Rybachuk A.M., Chernyshov G.G. Raspredeleniye svarochnogo toka v izdelii i vanne pri dugovoy svarke [Welding Current Distribution in the Product and Tub during Arc Welding]. Svarka i diagnostika [Welding and Diagnostics]. 2011. № 6. P. 16-20 (in Russian).
- [9] Rybachuk A.M., Gu J., Krysko N.V. Deformatsiya dugi v kvadropolnom magnitnom pole [The Deformation of Arc in the Quadrupole Magnetic Field]. Aktualnyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk [Actual Problems of Humanities and Natural Sciences]. 2015. № 8-1. P. 73-78 (in Russian).
- [10] Krysko N.V., Rybachuk A.M. Oblast, chuvstvitelnaya k vneshnim magnitnym polyam pri svarke v CO<sub>2</sub> [Sensitive Area to External Magnetic Fields when Welding in CO<sub>2</sub>]. Svarka i diagnostika [Welding and Diagnostics]. 2013. № 5. P. 36-40 (in Russian).
- [11] Krysko N.V., Rybachuk A.M. Osobennosti oblasti, chuvstvitelnoy k vneshnim magnitnym polyam pri svarke v argone i smesyakh [Features of Region Sensitive to External Magnetic Fields during Welding in Argon and Mixtures].

- in Argon and Mixtures]. Svarka i diagnostika [Welding and Diagnostics]. 2014. № 5. P. 54-56 (in Russian).
- [12] Gu J., Rybachuk A.M. Elektricheskoye pole v izdelii pri dugovoy svarke normalno-ellipticheskim istochnikom [The Electric Field in the Work-Piece in Arc Welding by Elliptical Source]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety]. 2015. № 4. P. 77-83 (in Russian).
- [13] Gu J., Krysko N.V., Rybachuk A.M. Analiz magnitnogo polya kvadropolnoy magnitnoy sistemy chislennym modelirovaniyem [Analysis of Magnetic Field of Quadrupole Magnetic System by Numerical Modeling]. Aktualnyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk [Actual Problems of Humanities and Natural Sciences]. 2016. № 11 (I). P. 74-79 (in Russian).
- [14] Rykalin N.N. Raschety teplovykh protsessov pri svarke [Calculations of Thermal Processes during Welding]. Moscow. MASHGIZ. 1951. 296 p. (in Russian).
- [15] Gu J., Rybachuk A.M. Deformatsiya magnitnogo polya pri dugovoy svarke magnitnykh metallov [External Magnetic Field Deformation in Arc Welding of Magnetic Metals]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2017. № 4. P. 70-77 (in Russian).

## **Investigation of Four-pole Magnetic Field Deformation during Magnetic Metal Arc Welding**

**Jieren Gu<sup>1</sup>, A.M. Rybachuk<sup>2</sup>, M.E. Kozyrev<sup>3</sup>**

*Bauman Moscow State Technical University, Build 1, Vtoraja Baumanskaya St., 5, Moscow, Russia 105005*

*<sup>1</sup>ORCID iD: 0000-0001-6287-1379*

*Wos Researcher ID: S-4188-2017*

*e-mail: gujieren12345@163.com*

*<sup>2</sup>ORCID iD: 0000-0002-9078-2653*

*Wos Researcher ID: O-6229-2017*

*e-mail: amrybachuk@mail.ru*

*<sup>3</sup>ORCID iD: 0000-0003-2508-4215*

*Wos Researcher ID: J-9653-2018*

*e-mail: mikhail1000@mail.ru*

**Abstract** – The article performs experimental measurements of the induction of magnetic fields in the arc welding zone of 10 mm thick low-carbon steel. Calculation nonmagnetic zone bounded Curie isotherm is performed to account the magnetic field distortion of the magnetic material. Measurements of magnetic fields were performed without welding, with a digital gaussometer GM2. As a result, data of deformation of a four-pole magnetic field in the direction of welding and in the thickness of the part are obtained. It is determined that the displacement of the axis of the magnetic field and the violation of the magnetic field symmetry of the four-pole magnetic system takes place in the direction of welding.

**Keywords:** arc welding, four-pole magnetic system, ferromagnetic metal, displacement of magnetic field.