

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

УДК 621.791.75.053

ДЕФОРМАЦИЯ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ МАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ

© 2017 Ц. Гу, А.М. Рыбачук

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

В статье рассмотрен способ формирования швов во внешнем поперечном магнитном поле четырехполюсной магнитной системы при дуговой сварке. Исследована деформация магнитного поля при сварке ферромагнитных металлов. Показана зависимость величины смещения оси магнитного поля от тока в катушках магнитной системы.

Ключевые слова: дуговая сварка, четырёхполюсная магнитная система, ферромагнитный металл, магнитное поле.

Поступила в редакцию: 05.12.2017

Одним из простых способов формирования шва при дуговой сварке является создание массовых электромагнитных сил в жидком металле введением в сварочную ванну поперечного магнитного поля [1-4](рис. 1).

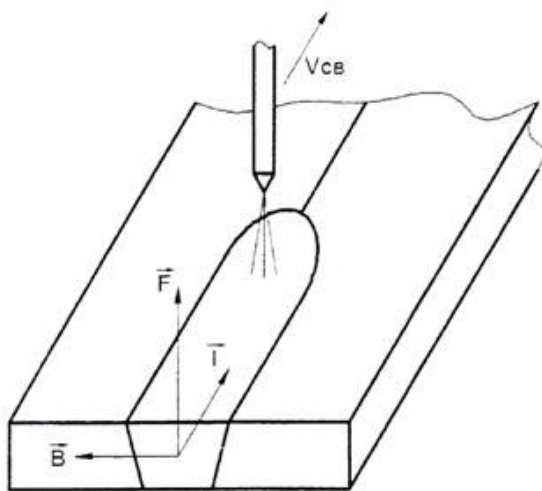


Рис. 1. – Схема удержания сварочной ванны поперечным магнитным полем
[Scheme of holding the weld pool by a transverse magnetic field]

При дуговой сварке происходит деформация температурного поля при движении дуги [5, 6]. В результате происходит деформация электрического поля в изделии [7, 8]. Через жидкий металл сварочной ванны протекает растекающийся по свариваемому изделию сварочный ток. При вводе в сварочную ванну поперечного магнитного поля, пронизывающего жидкий металл, взаимодействие сварочного тока с магнитным полем создаёт в жидком металле массовые электромагнитные силы, направленные вверх или вниз в зависимости от взаимного направления магнитного поля и сварочного тока. Созданием в сварочной ванне электромагнитных сил можно компенсировать или

превышать силы тяжести.

Такой способ создания электромагнитных сил в жидком металле позволяет располагать устройство, создающее магнитное поле с любой стороны изделия. В том числе и со стороны дуги. Данный способ даёт возможность управлять формой шва и при сварке изделий, не имеющих доступа к обратной стороне шва [3].

При введении поперечного магнитного поля в область сварочной ванны поле взаимодействует не только со сварочным током в жидком металле, но и со сварочным током в дуге [9-11]. Ввести магнитное поле только в жидкий металл, не вводя в область расположения сварочной дуги, практически не удаётся из-за выпучивания его в зазоре между полюсами магнитной системы. Поэтому при вводе магнитного поля в хвостовую часть сварочной ванны дуга оказывается под воздействием магнитного поля почти такой же величины, как и в сварочной ванне.

При взаимодействии магнитного поля с дугой происходит отклонение дуги, меняются её технологические свойства и при индукции магнитного поля, недостаточной для формирования шва, она обрывается.

Для обеспечения устойчивого горения дуги при использовании больших магнитных полей в сварочной ванне предложено ввести два поперечных магнитных поля: одно позади дуги в область сварочной ванны, а другое, такое же по величине, но противоположного направления, перед дугой [3].

В результате одно поперечное поле будет воздействовать на дугу в одном направлении, а другое – в противоположном, и дуга будет сохранять устойчивость. Для введения двух поперечных магнитных полей необходима четырёхполюсная магнитная система (рис. 2).

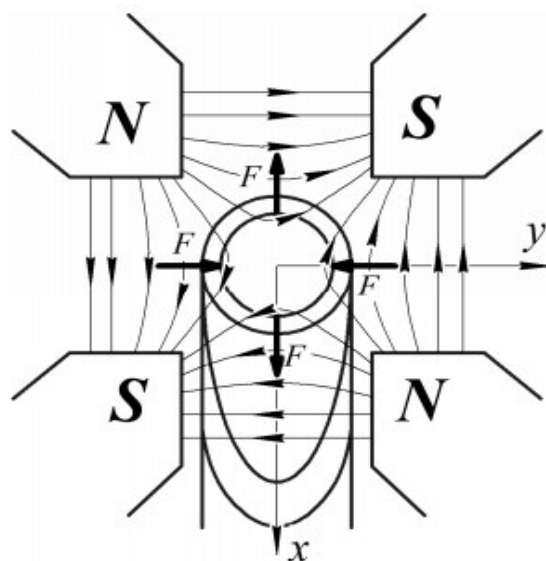


Рис. 2. – Дуга в четырёхполюсном магнитном поле [Arc in a four-pole magnetic field]

Четырёхполюсное магнитное поле, взаимодействуя с током в дуге, создаёт электромагнитные силы в дуге, которые сдавливают дугу в поперечном направлении и растягивают её в направлении сварки при удержании сварочной ванны (рис. 2).

Такой способ формирования швов во внешнем поперечном магнитном поле четырёхполюсной магнитной системы при дуговой сварке (рис. 2), позволяет формировать швы с нулевой выпуклостью с обратной стороны при односторонней сварке изделий из немагнитных материалов [3]. На рисунке 3 показано направление магнитных полей в сварочной ванне при сварке на обратной полярности.

В этом случае при сварке стыковых швов с полным проплавлением или корневых швов можно получать требуемую форму обратной стороны шва (рис. 4).

При сварке немагнитных металлов при совпадении оси электрода и оси магнитной системы и, следовательно, оси магнитного поля, дуга деформируется симметрично [12-14] (рис. 5).

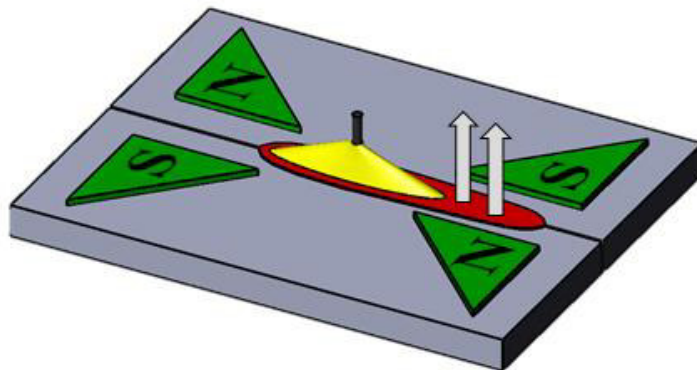


Рис. 3. – Схема удержания сварочной ванны четырёхполюсным магнитным полем при сварке на обратной полярности [Scheme of holding the welding bath with a four-pole magnetic field when welding on the reverse polarity]

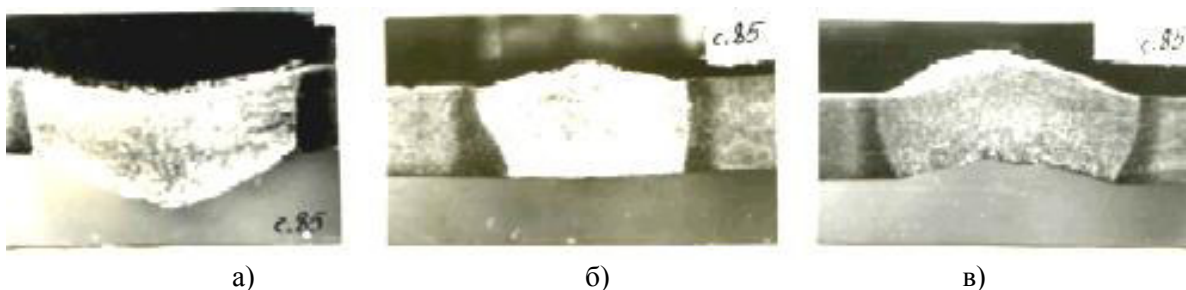


Рис. 4. – Макрошлифы швов, выполненных при разной величине индукции магнитного поля в сварочной ванне [Macroscale stitches made at different values of magnetic field induction in the weld pool]:
а) $B=0$; б) $B=0,08$ Т; в) $B=0,1$ Т

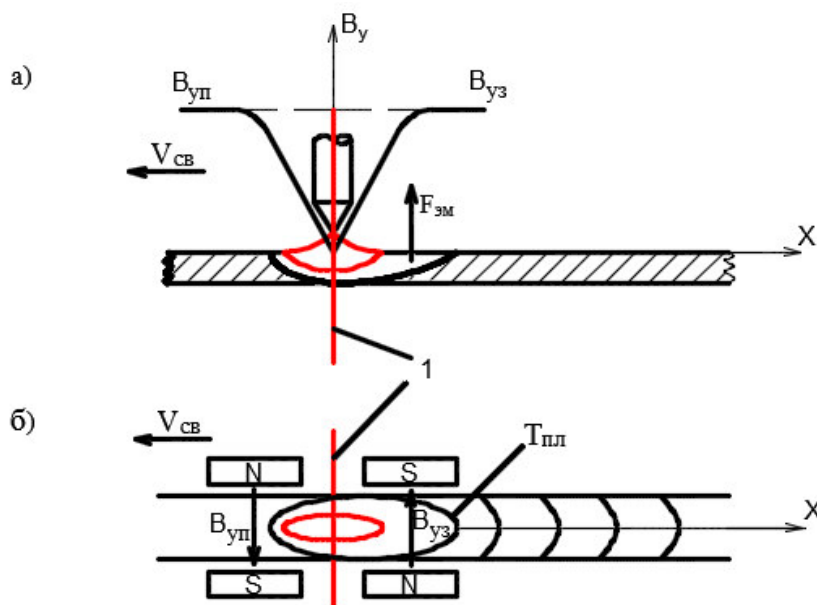


Рис 5. – Дуга в квадрупольном магнитном поле при сварке немагнитных металлов при удержании сварочной ванны:

а) – вид сбоку; б) – вид сверху; 1- ось магнитного поля
[Arc in a quadrupole magnetic field when welding non-magnetic metals while holding a weld pool:
а) - side view; б) top view; 1- magnetic field axis]

Поперечные магнитные поля перед дугой $B_{уп}$ и за дугой $B_{уз}$ равны.

При сварке ферромагнитных металлов возникает немагнитная область, ограниченная изотермой Кюри (рис. 6).

В этом случае магнитное поле, созданное квадрупольной магнитной системой шунтируется металлом свариваемого изделия. Это приводит к уменьшению магнитного поля в сварочной ванне. Боковые шунтирующие магнитные потоки $\Phi_{шб}$ равны, а шунтирующие магнитные потоки перед дугой $\Phi_{шп}$ и за дугой $\Phi_{зп}$ не равны из-за несимметричности немагнитной зоны относительно оси дуги. В результате происходит смещение оси магнитного поля в направлении сварки (рис. 6,а) при совпадении оси магнитной системы с осью электрода. Индукция магнитного поля перед дугой оказывается меньше индукции магнитного поля за дугой. Большая часть столба дуги оказывается под воздействием магнитного поля за дугой, и дуга отклоняется в сторону сварочной ванны при удержании жидкого металла (рис. 6,а).

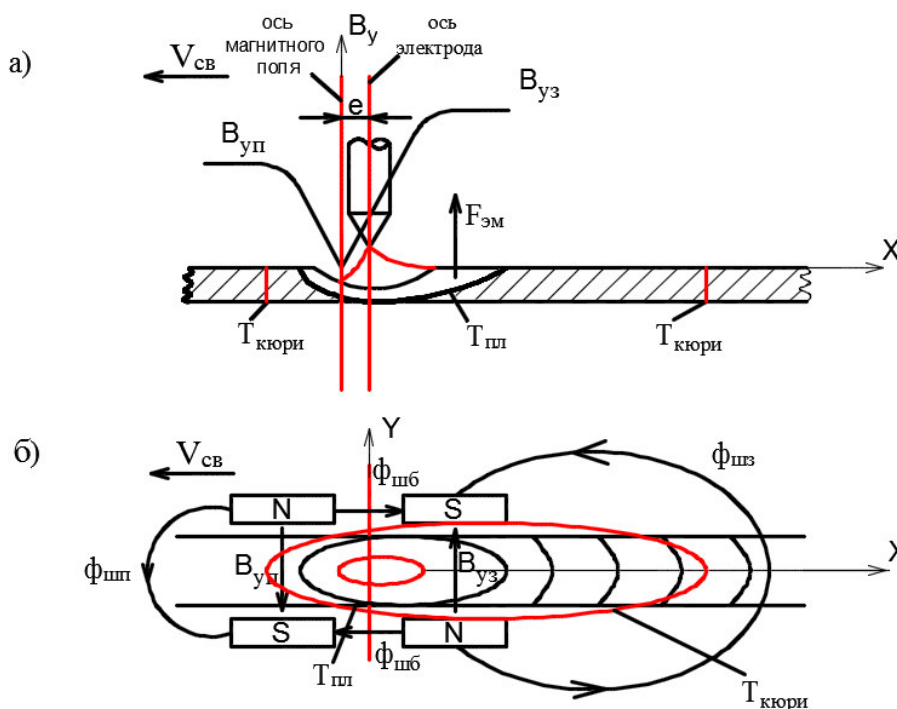


Рис. 6. – Дуга в квадрупольном магнитном поле при сварке ферромагнитных металлов при удержании сварочной ванны:

а) – вид сбоку; б) – вид сверху

[Arc in a quadrupole magnetic field when welding ferromagnetic metals while holding a weld pool:

a) - side view; b) top view]

Величину смещения e оси магнитного поля от оси электрода и оси магнитной системы оценивали измерением величины индукции поперечного магнитного поля B_y вдоль оси x .

Исследования магнитного поля проводили на пластине из низкоуглеродистой стали толщиной 3 мм с вырезанной немагнитной зоной. Размеры немагнитной зоны рассчитывали для случая дуговой сварки неплавящимся электродом на режиме: $I = 300A$, $U = 22V$, $V_{св} = 0,51$ м/ч. Для определения области, ограниченной изотермой Кюри, использовали расчёт температурного поля предельного состояния применяя схему линейного источника в бесконечной пластине [15]:

$$T(r, x) = \frac{q}{2\pi\lambda s} \exp\left(-\frac{v_{св}x}{2a}\right) k_0 \left(r \sqrt{\frac{v_{св}^2}{4a^2} + \frac{b}{a}} \right) + 273$$

где T – температура, К;

q – эффективная тепловая мощность дуги, Вт;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град);

s – толщина пластины, м;

$v_{св}$ – скорость сварки, м/с;

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

k_0 – функция Бесселя от мнимого аргумента второго рода нулевого порядка;

b – коэффициент, учитывающий теплоотдачу боковой поверхности пластины, с⁻¹.

Измерения проводили цифровым гауссметром GM2, оснащенным поперечным ST щупом с размерами 66x3,6x0,8 мм с установленным на конце датчиком Холла размерами 0,2x0,2 мм. 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%.

На рисунке 7 представлены результаты измерений при изменении величины магнитного поля током в катушках магнитной системы. Из-за наличия несимметричной относительно оси электрода вдоль линии сварки немагнитной зоны ось магнитного поля смещается в направлении сварки. Магнитное поле перед дугой становится меньше магнитного поля за дугой.

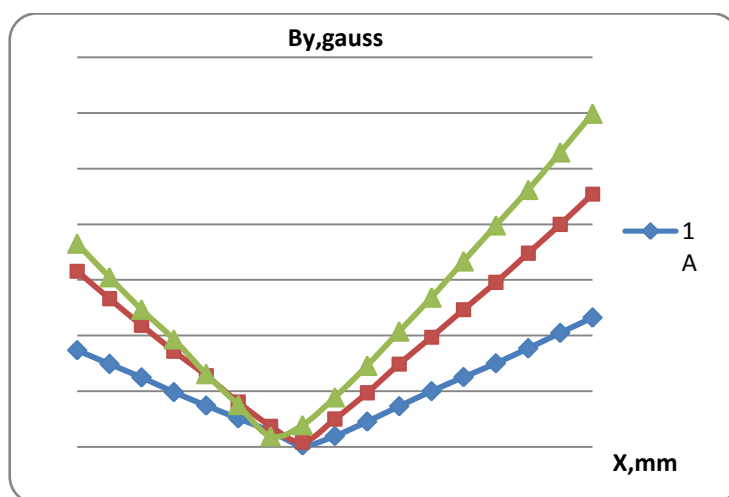


Рис. 7. – Распределение поперечной составляющей индукции магнитного поля вдоль оси шва
[Distribution of the magnetic field induction transverse component along the axis of the seam]

Величина смещения растёт с увеличением тока в катушках магнитной системы (рис. 8).

ВЫВОДЫ

1. Наличие ферромагнитного свариваемого металла уменьшает магнитное поле в сварочной ванне.

2. Использование симметричного четырехполюсного магнитного поля при дуговой сварке ферромагнитных металлов приводит к искажению магнитного поля, определяемому наличием в сварочной ванне несимметричной немагнитной зоны, ограниченной изотермой Кюри.

3. Деформация магнитного поля приводит к смещению оси магнитного поля и деформации дуги.

4. Смещение оси магнитного поля зависит от величины используемого магнитного поля.

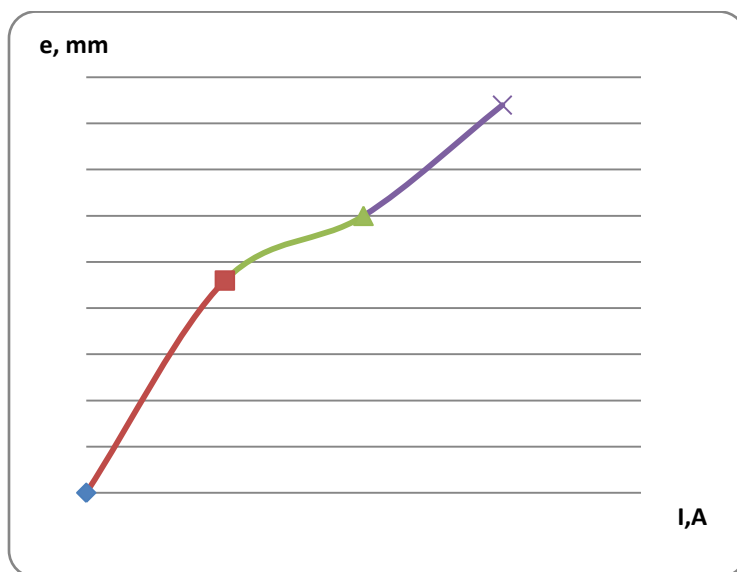


Рис. 8. – Зависимость величины смещения от тока в катушках магнитной системы [Dependence of the displacement magnitude on the current in the magnetic system coils]

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. 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.
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. 3–4.
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. Коновалов А.В. и др. Теория сварочных процессов [Текст] / А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Макаров, В.М. Неровный, Б.Ф. Якушин; Под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2007. – 752 с.
6. Куркин А.С. и др. 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. 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.
9. 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. 73–78.
10. Крысько Н.В. и др. Область, чувствительная к внешним магнитным полям при сварке в CO_2 [Текст] / Н.В. Крысько, А.М. Рыбачук // Сварка и диагностика. – 2013. – №5. – С. 36–40.
11. Крысько Н.В. и др. 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. 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.
13. Гу Ц. и др. Электрическое поле в изделии при дуговой сварке нормально-эллиптическим источником [Текст] / Ц. Гу, А.М. Рыбачук // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – №4. – С. 77–83.
 14. Гу Ц. и др. Анализ магнитного поля квадрупольной магнитной системы численным моделированием [Текст] / Ц. Гу, Н.В. Крысько, А.М. Рыбачук // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2016. – №11-1. – С. 74–79.
 15. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке [Текст] / Н.Н. Рыкалин. – М.: МАШГИЗ, 1951. – 296 с.

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, ISSN 0005-111X, pp. 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 surfacing Submerged]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding fabrication], 1990, №2, ISSN 0491-6441, pp. 3–6. (in Russian)
- [3] Akulov A.I., Rybachuk A.M. Uderzhaniye 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. 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 a transverse magnetic field]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding fabrication], 1979, №7, ISSN 0491-6441, pp. 11–14. (in Russian)
- [5] Kononov 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, ISBN 978-5-7038-3020-8, 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 tolshchiny stenki svyshe 30 mm iz stali k65 [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 obrazovaniye [Science and education], 2013, №5, eISSN 2587-9278, pp. 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, ISSN 0005-111X, pp. 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 the bath during arc welding]. Svarka i Diagnostika [Welding and Diagnostics], 2011, №6, ISSN 2071-5234, pp. 16-20. (in Russian)
- [9] 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. 73–78. (in Russian)
- [10] Krysko N.V., Rybachuk A.M. Oblast, chuvstvitelnaya k vneshnim magnitnym polyam pri svarke v CO2 [Area sensitive to external magnetic fields when welding in CO2]. Svarka i diagnostika [Welding and diagnostics], 2013, №5, ISSN 2071-5234, pp. 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 a region sensitive to external magnetic fields during welding in argon and mixtures]. Svarka i diagnostika [Welding and diagnostics], 2014, №5, ISSN 2071-5234, pp. 54–56. (in Russian)
- [12] 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)
- [13] 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 normally elliptical source]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2015, №4, ISSN 2305-414X, pp. 77–83. (in Russian)
- [14] Gu J., Krysko N.V., Rybachuk A.M. Analiz magnitnogo polya kvadropolnoy magnitnoy sistemy

- chislennym modelirovaniyem [Analysis of the magnetic field of a quadrupole magnetic system by numerical modeling]. Aktualnyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk [Actual problems of humanities and natural sciences], 2016, №11-1, ISSN 2073-0071, pp. 74–79. (in Russian)
- [15] Rykalin N.N. Raschety teplovykh protsessov pri svarke [Calculations of thermal processes during welding]. M. MASHGIZ [MASHGIZ], 1951, 296 p. (in Russian)

External Magnetic Field Deformation in Arc Welding of Magnetic Metals

Jieren Gu*, **A.M. Rybachuk****

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

** ORCID: 0000-0001-6287-1379*

Wos ResearcherID: S-4188-2017

e-mail: gujieren12345@163.com

*** ORCID: 0000-0002-9078-2653*

Wos ResearcherID: O-6229-2017

e-mail: amrybachuk@mail.ru

Abstract – The paper considers the method of forming joints in an external transverse magnetic field of a four-pole magnetic system in arc welding. The deformation of the magnetic field in the welding of ferromagnetic metals is investigated. The dependence of the axis displacement of the magnetic field on the current in the magnetic system coils is shown.

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