

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРОЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗОНЕ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ

А. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ¹, П. А. ВЫДМЫШ², М. В. АГЕЕВА³

¹ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет».

87500, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7. E-mail: razmyshljaev@gmail.com

²ООО «Метинвест-Промсервис». 87500, г. Мариуполь, Никопольский просп., 113-а. E-mail: pstukmu@gmail.com

³Донбасская государственная машиностроительная академия.

84313, г. Краматорск, ул. Академическая, 72. E-mail: maryna_ah@ukr.net

Экспериментально установлено, что нормальная компонента индукции вдоль боковых поверхностей стержней устройства ввода поперечного магнитного поля распределена практически равномерно (имеет одинаковые значения). Некоторое повышение значений этой компоненты индукции наблюдается только в зонах у торцов стержней и у катушек, размещенных на этих стержнях. Для изучения распределения индукции поперечного магнитного поля в зоне сварочной ванны (у поверхности основного металла) предложено использовать известное положение о том, что между строением магнитоэлектростатического и электростатического полей имеется аналогия. На этой основе предложена методика, позволяющая рассчитать распределение поперечной и продольной компонент индукции магнитного поля, генерируемого устройством ввода поперечного магнитного поля, у поверхности свариваемой пластины из немагнитных материалов. При этом используются известные уравнения электростатики. В расчетах принято, что заряды электростатического поля на боковых поверхностях и торцах стержней устройства ввода поперечного магнитного поля размещены равномерно. Показано, что предложенный метод обеспечивает удовлетворительную сходимости расчетных и экспериментальных данных. Библиогр. 8, рис. 6.

Ключевые слова: поперечное магнитное поле, индукция, закон Кулона, напряженность электростатического поля

Использование поперечного магнитного поля (ПОМП) при дуговой сварке и наплавке позволяет управлять геометрией швов (валиков), повышать коэффициент расплавления электрода и измельчать структуру швов (наплавки) [1–4].

Изучение строения ПОМП в зоне сварочной ванны имеет теоретическое и практическое значение. Однако нет простых методик для расчета индукции магнитного поля, генерируемого двухстержневыми системами устройств ввода (УВ) ПОМП в зоне сварочной ванны.

Известная расчетная программа ANSYS позволяет определить значения индукции, генерируемой УВ ПОМП в этой зоне. Однако ее использование затруднено из-за чрезмерной сложности [5]. Чрезмерную сложность также имеет расчетная методика, основанная на использовании метода вторичных источников, когда также необходимо численное решение задачи методом конечных элементов [6, 7]. Необходима разработка более простой в использовании расчетной методики.

По литературным данным [6] имеется аналогия между строением магнитного поля, генерируемого УВ ПОМП, и строением электростатического поля, если бы последнее поле генерировалось аналогичными заряженными телами. По данным, приведенным, в частности, в работе [6], индукция B и напряженность электрического поля E ,

генерируемые соответственно электромагнитными и заряженными телами, в определенной точке окружающего пространства складываются как векторы. Математический аппарат для описания строения электростатического поля разработан более полно, чем для электромагнитного поля. Следует отметить, что применительно к расчету индукции магнитного поля, генерируемого УВ ПОМП, этот метод не использовался.

Целью настоящей работы является анализ возможности моделирования стационарного магнитного поля, генерируемого УВ ПОМП, стационарным электростатическим полем в зоне ванны при дуговой сварке и наплавке.

Ниже приведена разработанная расчетная методика моделирования пространственного распределения индукции управляющего ПОМП в зоне сварочной ванны путем использования уравнений электростатики.

Исследовали особенности строения магнитного поля, генерируемого одним стержнем с обмоткой. Сечение стержня из низкоуглеродистой стали составляло $F_c = 26 \times 16$ мм, длина стержня $L_{ст} = 130$ мм. На стержне размещали обмотку из медного провода диаметром 1,0 мм, с количеством витков $W = 100$. Обмотка была четырехслойной и имела высоту 30 мм. Обмотку располагали по центру длины стержня.

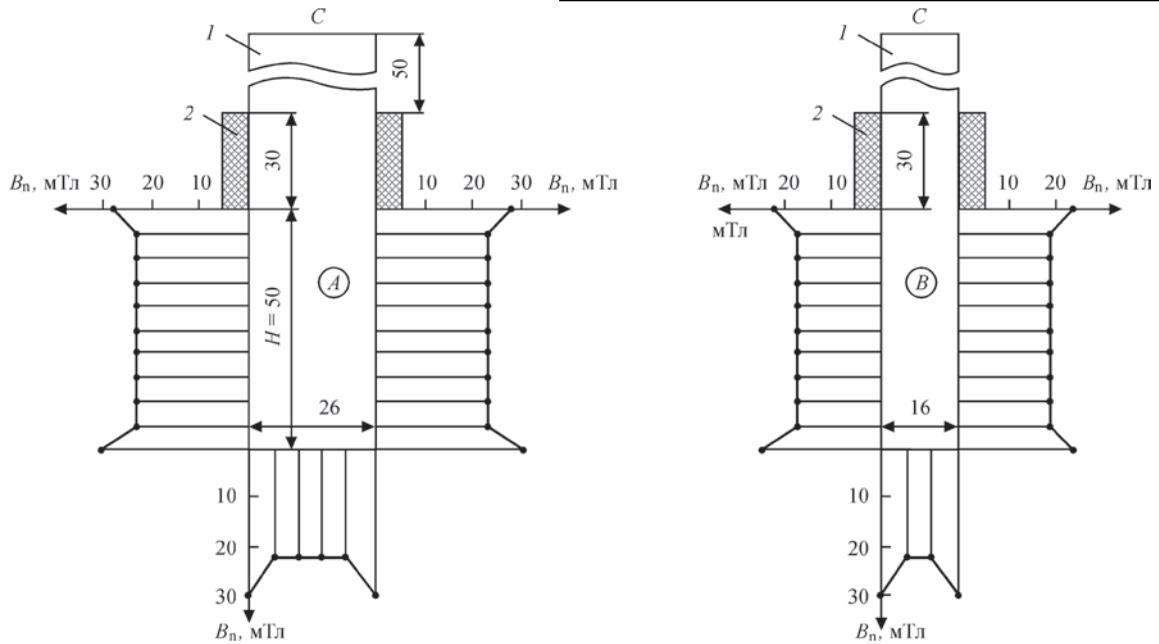


Рис. 1. Распределение индукции B_n вдоль поверхностей стержня ($W = 100, I_k = 8$ А): 1 — стержень; 2 — обмотка

Измеряли нормальную компоненту индукции B_n вдоль боковых поверхностей стержня, а также компоненту индукции B_n нормальную к торцу стержня на участке ниже обмотки. В катушке пропускали постоянный ток $I_k = 8$ А. Измерения индукции B_n выполняли миллитесламетром типа 43205 с датчиком Холла, имевшем измерительную базу $0,9 \times 0,9$ мм. Данные измерений приведены на рис. 1. Данные показали, что имеет место «всплеск» индукции B_n только у торца обмотки и внизу у торца стержня. «Всплеск» индукции B_n наблюдался на участках длиной примерно 5 мм, а по всей длине стержня и у его торца индукция B_n распределена достаточно равномерно. Касательная компонента индукции магнитного поля на всех поверхностях стержня практически была

равна нулю. Аналогичные данные были получены при использовании стержней сечением 26×32 мм и 32×52 мм. При уменьшении расстояния от катушек до торцов стержней от 60 до 20 мм характер изменения компонент индукции соответствовал установленному для стержня сечением 26×16 мм (рис. 1). Это положение сохранялось и для стержней, выполненных в виде набора из пластин электротехнической стали Э42 толщиной 0,5 мм.

Для разработки расчетной методики намагниченный участок стержня (ниже обмотки) заменяли диэлектрическим телом, которое имеет заряды на своей поверхности. Размеры такого диэлектрического тела такие же, как и рассматриваемый участок стержня электромагнита. При этом заряды на поверхностях (A, B, C) указанного тела распределяли равномерно.

В качестве примера на рис. 2 приведено разбиение поверхностей на участки одинаковой площади, в центре которых размещены заряды q . Необходимо, чтобы все малые участки (после разбиения) на всех боковых поверхностях и торцах стержней (A, B, C на рис. 2) имели одинаковую площадь. Целесообразно начинать разбиение на участки площади торцов стержней (C). Достаточным количеством участков на поверхностях C является 8...12. Чем больше количество участков, тем точнее будут в дальнейшем результаты вычислений, однако при этом возрастает объем вычислительной работы.

Как известно [6], по закону Кулона напряженность электростатического поля E от заряда q в точке на расстоянии R от заряда:

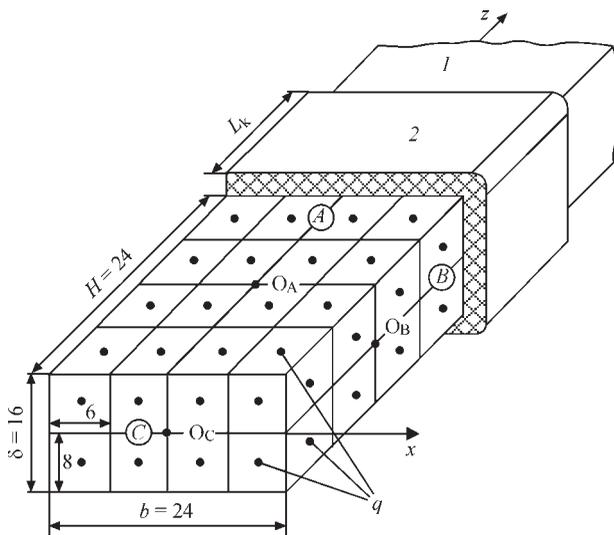


Рис. 2. Схема распределения зарядов q на поверхностях A, B, C стержня (1) ниже уровня катушки (2): H, b, δ — размеры участка стержня (м); L_k — длина катушки (м); (точки — места расположения зарядов q)

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2}, \quad (1)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Поскольку $q/(4\pi\epsilon_0) = \text{const}$, то в формуле (1), для оценки (расчета) E , генерируемого зарядом на боковой поверхности УВ ПОМП, можно принять любое численное (удобное для расчетов) значение $q/(4\pi\epsilon_0) = K$.

Тогда формула (1) примет вид:

$$E = \frac{K}{R^2}. \quad (2)$$

Расчет по формуле (2) удобен, поскольку в конечном итоге для оценки характера распределенности напряженности поля $E (E_x, E_y, E_z)$ вдоль какого-либо направления (осей X, Y, Z) необходимо выражать в относительных единицах, например, через параметр $E_x/E_{x\text{max}}$. В этом случае распределение компоненты поля электростатического $E_x/E_{x\text{max}}$, можно сравнить с распределенностью компонент индукции поля магнитного, генерируемого реальной конструкцией УВ ПОМП ($B_x/B_{x\text{max}}$). Кроме того, значения компонент поля $E (E_x, E_y, E_z)$ вдоль какого-либо направления позволяют численно (в делениях, единицах, полученных при расчете) оценить влияние размеров и расположения стержней УВ ПОМП в пространстве, наклона стержней к вертикальной оси на значение компонент поля $E (E_x, E_y, E_z)$, и тем самым позволяет определить оптимальные параметры УВ ПОМП, обеспечивающие максимальные значения компонент поля E_x, E_y, E_z в определенной точке (аналогов значений компонент магнитного поля B_x, B_y, B_z в точке).

Ранее установлено [8], что строение управляющего ПОМП, генерируемого различными конструкциями УВ П-образного типа в относительных единицах не зависит от того, как замыкаются магнитные силовые линии в верхней части двух-стержневых систем УВ ПОМП. Это явилось основанием для моделирования магнитного поля электростатическим полем для УВ ПОМП из двух

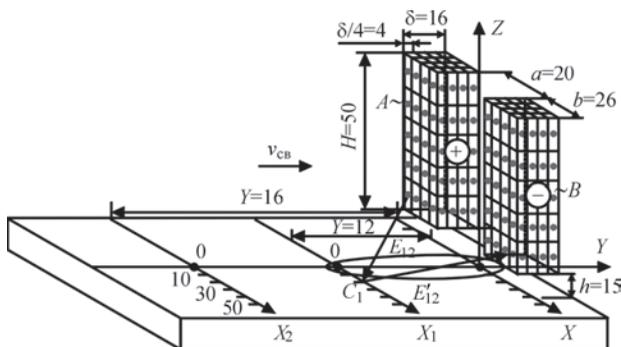


Рис. 3. Схема к расчету вектора E в точке C_1 у поверхности пластины

стержней (с обмотками), не связанных между собой перемычкой сверху.

В расчетах рассматривали нижнюю часть двух стержней сечением $F_c = b \times \delta = 26 \times 16$ мм, длиной $H = 50$ мм в зоне ниже катушек. На поверхностях стержней размещали точечные заряды одинаковой величины (на рис. 3 условно показаны в виде точек заряды, расположенные на вертикальных поверхностях каждого из двух стержней, но аналогичные заряды размещены и на нижних торцах стержней).

Векторы E каждого заряда раскладываются в пространстве на три составляющие, направленные вдоль координатных осей OX, OZ, OY через косинусы направляющих углов α, β, γ вектора E относительно этих осей (рис. 4).

Приняли, что из каждого заряда на поверхности A стержня — положительный полюс (+) «выходит» вектор напряженности поля E , а вектор E' «входит» в такую же точку стержня B — отрицательный полюс (-) (см. рис. 3).

Для каждого вектора напряженности можно составить уравнения:

$$E_{Y_i} = E \cos \beta = E_i \frac{y_i}{R_i}, \quad (3)$$

$$E_{Z_i} = E \cos \gamma = E_i \frac{z_i}{R_i}, \quad (4)$$

$$E_{X_i} = E \cos \alpha = E_i \frac{x_i}{R_i}, \quad (5)$$

где E — значение напряженности поля в рассматриваемой точке,

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r R^2}, \quad (6)$$

y_i, z_i, x_i — длина проекции вектора E на соответствующую ось, м; R_i — расстояние от заряда q_i до рассматриваемой точки C_1 , м.

В дальнейшем расчет выполняли по формуле (2), где K — постоянная величина:

$$K = \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r} = \text{const}. \quad (7)$$

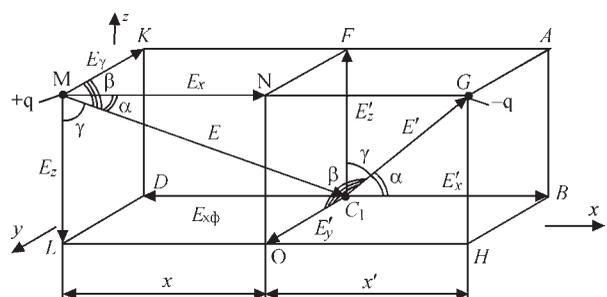


Рис. 4. Схема разложения вектора E в пространстве на его компоненты, параллельные осям X, Y, Z

Для получения численных значений векторов E_x, E_y, E_z в данной точке пространства (в частности, в точке C_1) выполняли суммирование всех компонент $E'_{xi}, E'_{yi}, E'_{zi}$ в этой точке от каждого заряда q_i , размещенного на поверхностях A и B стержней и на торце C .

При этом тела (стержни A и B на рис. 3), считаются условно непрозрачными, т.е. необходимо учитывать действие только тех зарядов q на поверхностях A, B и C стержней, которые «видны» из точки C_1 .

Для оценки возможности практического применения предложенной методики расчета необходимо сопоставить расчетные данные с соответствующими экспериментальными данными. Для этого исследовали распределение компонент B_z, B_x магнитных полей, генерируемых реальными УВ ПОМП. В исследованиях использовали электромагниты с сечением стержней из низкоуглеродистой стали $F_c = b \times \delta = 26 \times 16$ мм, длиной $L = 130$ мм с обмотками длиной $l = 30$ мм. Рас-

стояние от обмоток до торца стержня $H = 50$ мм. По катушкам пропускали постоянный ток $I = 8$ А. Индукцию измеряли универсальным тесламетром 43205 с датчиком Холла, имеющим базу $0,9 \times 0,9$ мм.

Для оценки структуры магнитного поля в ванне приняли расчетную схему из двух стержней $F_c = 26 \times 16$ мм и условное распределение зарядов по боковым поверхностям, приведенное на рис. 3. Расстояние между стержнями $a = 20$ мм; между осью OX (поверхностью изделия) и торцами стержней $h = 15$ мм. Угол наклона стержней к вертикали $\alpha = 0^\circ$. Расчеты выполнялись с учетом действия всех зарядов на поверхностях всех стержней (A, B и C), которые «видны» из точки C_1 . Для ускорения расчетов использовали программу Mathcad 15.

Расчетным путем определяли абсолютные значения напряженности поля E в точках, расположенных по оси OX с шагом 10 мм, с координатами по оси OY в направлении, обратном направлению сварки $Y_0 = 0$ мм, $Y_1 = 12$ мм, $Y_2 = 16$ мм и $Y_3 =$

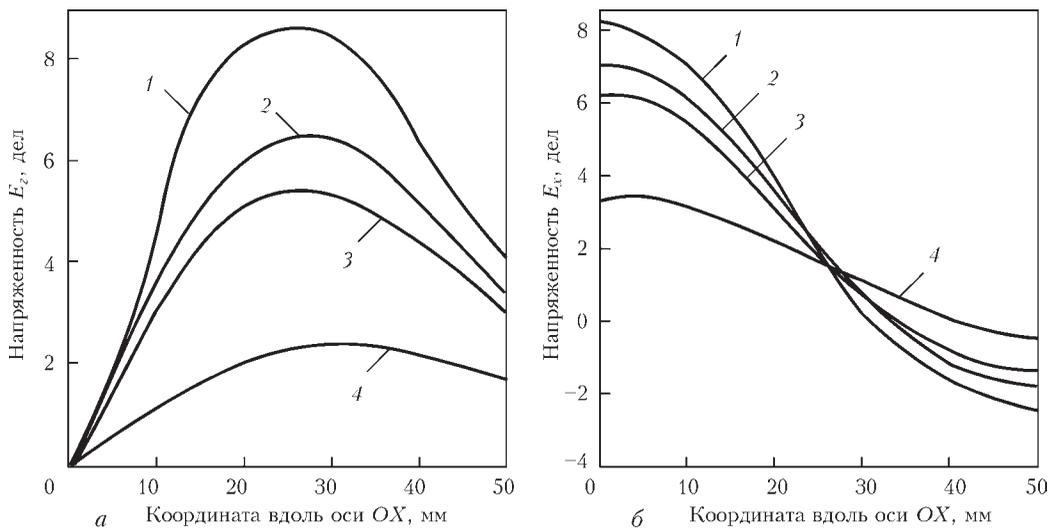


Рис. 5. Распределение расчетных значений E_z (а) и E_x (б) вдоль осей OX : 1-4 — соответственно при $y = 0$ мм; 12; 16; 32

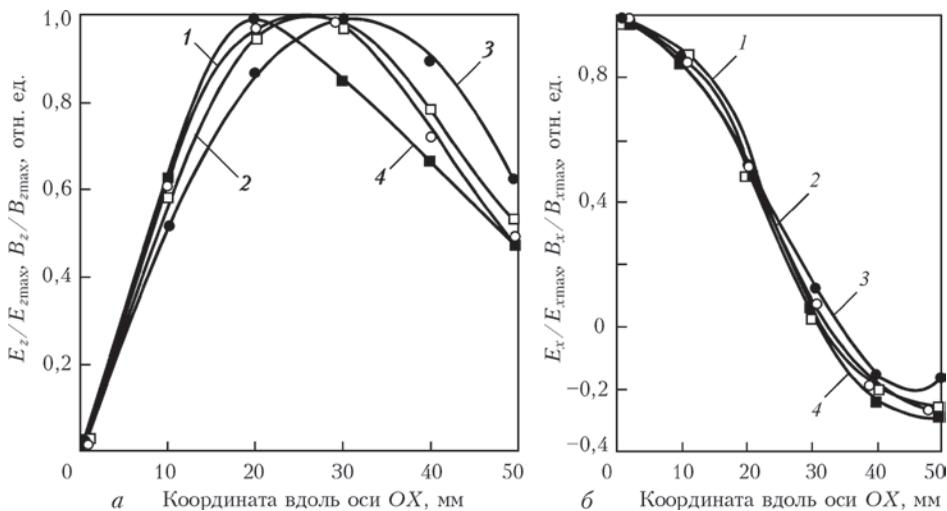


Рис. 6. Распределение относительных значений $E_z/E_{z\max}, B_z/B_{z\max}$ (а) и $E_x/E_{x\max}, B_x/B_{x\max}$ (б) вдоль осей OX : 1-4 — соответственно, при $y = 0$ мм; 12; 16; 32 (линиями обозначены расчетные относительные значения для $E_z/E_{z\max}$ (а) и $E_x/E_{x\max}$ (б); значками — экспериментальные данные для $B_z/B_{z\max}$ (а) и $B_x/B_{x\max}$ (б))

$= 32$ мм (рис. 3). В расчете использовали зависимость $E = 16/R^2$ (R измеряли в см). При этом получаются числа, являющиеся аналогами величин компонент напряженностей электростатического поля E_z, E_x . Численные значения E_z, E_x (в делениях) в принципе соответствуют значениям E_z, E_x , имеющим размерность В/м.

Данные показали, что характер распределенных расчетных значений продольной и поперечной компонент E_z и E_x (аналогов компонент индукций B_z и B_x) вдоль осей OX сохраняется при увеличении расстояния по оси OY (см. рис. 3) в направлении противоположном направлению сварки (рис. 5, а и б). Приведенные на рис. 6, а и б расчетные относительные значения $E_z/E_{z \max}$ и $E_x/E_{x \max}$, соответствующие экспериментальным отношениям индукций $B_z/B_{z \max}$ и $B_x/B_{x \max}$ для реальных стержней УВ ПОМП, практически совпадают между собой.

Таким образом, предложенный метод обеспечивает удовлетворительную сходимость расчетных данных о распределении компонент напряженности моделирующего электростатического поля и экспериментальных данных о распределении компонент индукции магнитного поля в зоне сварочной ванны. Метод может быть использован для оптимизации конструкции УВ ПОМП, чтобы обеспечить максимальные значения поперечной компоненты индукции в зоне сварочной ванны при неизменной величине намагничивающей силы обмоток на стержнях этого УВ.

Следует отметить, что все приведенные выше результаты исследований относятся к случаю, когда изделие изготовлено не из ферромагнитного материала. Чтобы получить численные значения компонент индукции, приведенные на рис. 6 в виде относительных их значений, необходимо знать их численные значения хотя бы для одной точки на этом графике. Метод расчетного определения численных значений компонент индукций, генерируемых УВ ПОМП, будет приведен в следующей публикации.

Выводы

1. Предложена расчетная методика с применением уравнений электростатики, которая адекватно отражает строение магнитных полей, генерируемых реальными УВ ПОМП, и позволяет оценивать распределение компонент индукции МП в зоне сварочной ванны.

2. Предложенный метод может быть использован для оптимизации конструкции УВ ПОМП,

чтобы обеспечить максимальные значения поперечной компоненты индукции в зоне сварочной ванны при неизменной величине намагничивающей силы обмоток на стержнях этого УВ.

Список литературы

1. Скиперский Н. А., Рыбачук А. М. (2000) Формирование шва поперечным магнитным полем при сварке немагнитных материалов. *Сварочное производство*, **7**, 53–55.
2. Иофинов П. А., Ибрагимов В. С., Дмитриенко А. К. и др. (1991) Влияние внешнего электромагнитного поля на скорость плавления электродной проволоки при автоматической наплавке под флюсом. *Там же*, **1**, 34–35.
3. Размышляев А. Д., Миронова М. В. (2011) Производительность расплавления электродной проволоки при дуговой наплавке под флюсом с воздействием поперечного магнитного поля. *Автоматическая сварка*, **5**, 39–42.
4. Рыжов Р. Н., Кузнецов В. Д. (2006) Внешние электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавки (Обзор). *Там же*, **10**, 36–44.
5. Андреева Е. Г., Шапец С. П., Колмогоров Д. В. (2005) Расчет стационарных магнитных полей и характеристик электротехнических устройств с помощью программного пакета ANSYS. *Electronic scientific journal «Oil and Gas Business»*, **1**. http://ogbus.ru/authors/Andreeva/Andreeva_1.pdf.
6. Бессонов Л. А. (2003) *Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле*. Москва, Гардарики.
7. Тозони О. В. (1975) *Метод вторичных источников в электротехнике*. Москва, Энергия.
8. Размышляев А. Д., Миронова М. В., Ярмонов С. В., Выдмыш П. А. (2013) Строение поперечного магнитного поля, генерируемого устройствами ввода для процесса дуговой сварки. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Зб. наук. пр., **26**, сс. 135–141.

References

1. Skipersky, N.A., Rybachuk, A.M. (2000) Weld formation by transverse magnetic field in welding of nonmagnetic materials. *Svarochn. Proizvodstvo*, **7**, 53-55 [in Russian].
2. Iofinov, P.A., Ibragimov, V.S., Dmitrienko, A.K. et al. (1991) Influence of external electromagnetic field on melting rate of electrode wire in submerged-arc welding. *Ibid.*, **1**, 34-35 [in Russian].
3. Razmyshlyayev, A.D., Mironova, M.V., Kuzmenko, K.G. (2011) Efficiency of melting of electrode wire in submerged-arc surfacing with influence of transverse magnetic field. *The Paton Welding J.*, **5**, 39-42.
4. Ryzhov, R.N., Kuznetsov, V.D. (2006) External electromagnetic effects in arc in processes of arc welding and surfacing (Review). *Ibid.*, **10**, 29-35.
5. Andreeva, E.G., Shamets, S.P., Kolmogorov, D.V. (2005) Calculation of stationary magnetic fields and characteristics of electric devices using program package ANSYS. *Electronic Sci. J. Oil and Gas Business*, **1**. http://ogbus.ru/authors/Andreeva/Andreeva_1.pdf.
6. Bessonov, L.A. (2003) *Theoretical fundamentals of electrical engineering. Electromagnetic field*. Moscow, Gardariki [in Russian].
7. Tozoni, O.V. (1975) *Method of secondary sources in electrical engineering*. Moscow, Energiya [in Russian].
8. Razmyshlyayev, A.D., Mironova, M.V., Yarmonov, S.V. et al. (2013) Structure of transverse magnetic field generated by input devices for arc welding process. *Visnyk Pryazov. DTU: Transact. Mariupol, PDTU*, 135-141 [in Russian].

ДО ПИТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ БУДОВИ
ПОПЕРЕЧНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ЗОНІ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ВАННИ

О. Д. РАЗМИШЛЯЕВ¹, П. О. ВИДМИШ², М. В. АГССВА³

¹ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет».

87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7. E-mail: razmyshljaev@gmail.com

²ТОВ «Метінвест-Промсервіс». 87500, м. Маріуполь, Нікопольський просп., 113-а. E-mail: pstukmu@gmail.com

³Донбаська державна машинобудівна академія.

84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72. E-mail: maryna_ah@ukr.net

Експериментально встановлено, що нормальна компонента індукції вздовж бічних поверхонь стрижнів пристрою введення поперечного магнітного поля розподілена практично рівномірно (має однакові значення). Деяке підвищення значень цієї компоненти індукції спостерігається тільки в зонах у торців стрижнів і котушок, розміщених на цих стрижнях. Для вивчення розподілу індукції поперечного магнітного поля в зоні зварювальної ванни (біля поверхні основного металу) запропоновано використовувати відоме положення про те, що між будовою магнітостатичного і електростатичного полів є аналогія. На цій основі запропонована методика, що дозволяє розрахувати розподіл поперечної і поздовжньої компоненти індукції магнітного поля, що генерується пристроєм введення поперечного магнітного поля, у поверхні зварювальної пластини з немагнітних матеріалів. При цьому використовуються відомі рівняння електростатики. У розрахунках прийнято, що заряди електростатичного поля на бічних поверхнях і торцях стрижнів пристрою введення поперечного магнітного поля розміщені рівномірно. Показано, що запропонований метод забезпечує задовільну збіжність розрахункових і експериментальних даних. Бібліогр. 8, рис. 6.

Ключові слова: поперечне магнітне поле, індукція, закон Кулона, напруженість електростатичного поля

TO THE ISSUE OF MODELING THE STRUCTURE OF TRANSVERSE MAGNETIC
FIELD IN THE AREA OF WELDING POOL

A.D. RAZMYSHLYAEV¹, P.A. VYDMYSH², M.V. AHIEIEVA³

¹State Higher Education Institute Pryazovskyi State Technical University 7, Universitetskaya Str., 87500, Mariupil, Ukraine.

E-mail: razmyshljaev@gmail.com

²OJSC «Metinvest-Promservis», 113-a Nikopol ave., 87500, Mariupil, Ukraine, E-mail: pstukmu@gmail.com

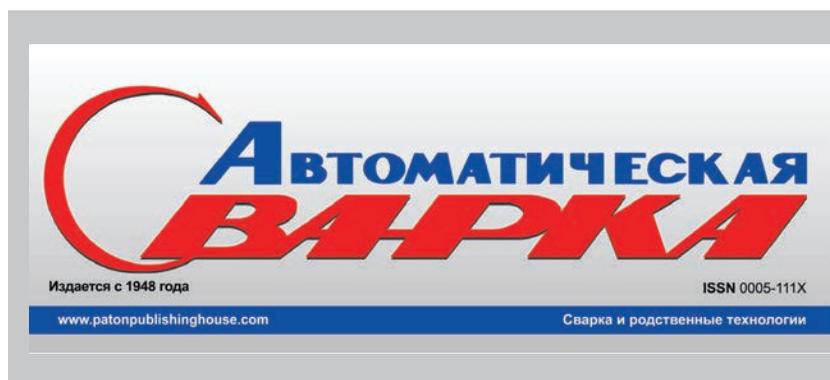
³Donbass State Machine Building Academy, 72 Akademicheskaya Str., 84313, Kramatorsk, Ukraine.

E-mail: maryna_ah@ukr.net

It was established experimentally that a normal component of induction along the side surfaces of rods of the device for input of transverse magnetic field is distributed almost uniformly (has the same values). A slight increase in the values of this induction component is observed only in the zones near the ends of the rods and near the coils, placed on these rods. To study the distribution of induction of a transverse magnetic field in the welding pool area (near the surface of the base metal) it was proposed to use the well-known assumption that there is an analogy between the structure of magnetostatic and electrostatic fields. On this basis, a procedure was proposed which allows calculating the distribution of transverse and longitudinal components of induction of the magnetic field generated by the device for input of the transverse magnetic field near the surface of the welded plate of non-magnetic materials. In this case, the known electrostatic equations are used. It was assumed in the calculations that the charges of electrostatic field on the side surfaces and ends of the rods of the device for input of the transverse magnetic field are uniformly distributed. It is shown that the proposed method provides a satisfactory convergence of calculated and experimental data. 8 Ref., 6 Fig.

Keywords: transverse magnetic field, induction, Coulomb's law, electrostatic field intensity

Поступила в редакцію 29.05.2018



Подписку на журнал
«Автоматическая сварка»
(подписной индекс 70031)
можно оформить через
редакцию журнала с любого
месяца и на любой срок,
включая выпуски журналов
прошлых лет.

Тел./факс: (38044) 200-82-77