

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНДУКЦИИ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗОНЕ ВАННЫ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Размышляев А. Д., Агеева М. В.

Показано, что для создания поперечного магнитного поля (ПОМП) в зоне ванны при дуговой сварке используют устройство ввода (УВ) в виде электромагнита с двумя катушками, размещенными на стержнях УВ ПОМП. Предложена методика расчета индукции ПОМП в зоне сварочной ванны, основанная на аналогии между строением магнитного поля и генерируемого УВ ПОМП и строением электростатического поля. Поскольку изделие выполнено из ферромагнитного материала, то в расчетной методике использован метод отражений. Показано, что разработанный расчетный метод обеспечивает удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных о величине индукции ПОМП в зоне сварочной ванны, и может быть использован для оптимизации конструкции УВ ПОМП применительно к дуговой сварке стыковых соединений пластин из ферромагнитных сталей.

Показано, що для створення поперечного магнітного поля (ПОМП) в зоні ванни при дуговому зварюванні використовують пристрій введення (ПВ) у вигляді електромагніта з двома котушками, розміщеними на стрижнях ПВ ПОМП. Запропонована методика розрахунку індукції ПОМП в зоні зварювальної ванни, заснована на аналогії між будовою магнітного поля та генерованого ПВ ПОМП і будовою електростатичного поля. Оскільки виріб виконано з ферромагнітного матеріалу, то в розрахунковій методиці використаний метод відображень. Показано, що розроблений розрахунковий метод забезпечує задовільну збіжність розрахункових і експериментальних даних про величину індукції ПОМП в зоні зварювальної ванни, і може бути використаний для оптимізації конструкції ПВ ПОМП стосовно дуговому зварюванні стикових з'єднань пластин з ферромагнітних сталей.

The article demonstrates that an input device (ID) in the form of an electromagnet with two coils placed on rods ID TMF is used for creating a transverse magnetic field (TMF) in the pool zone at arc welding. The method of calculating the induction of TMF in the welding pool area, based on the analogy between the structure of a magnetic field and the generated ID TMF and the structure of the electrostatic field is suggested. Since the product is made of a ferromagnetic material, the reflection method is used in the calculating method. It is determined that the developed calculating method provides a satisfactory agreement between the calculated and experimental data on the magnitude of the TMF induction in the welding pool area, and can be used to optimize the design of the ID TMF as applied to arc welding of butt joints of plates made of ferromagnetic steels.

Размышляев А. Д.

д-р техн. наук, проф.
каф. АиМСП ГВУЗ ПГТУ

Агеева М. В.

канд. техн. наук, доц. каф. ОиТСП ДГМА

ГВУЗ ПГТУ – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь;

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.791.75

Размышляев А. Д., Агеева М. В.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНДУКЦИИ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗОНЕ ВАННЫ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Для создания поперечного магнитного поля (ПОМП) обычно используют устройство ввода (УВ) в виде двух стержней с обмотками на стержнях с перемычкой либо без перемычки сверху [1–3].

В работе [4] показано, 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 двухстержневых систем УВ ПОМП. Это явилось основанием для моделирования магнитного поля электростатическим полем для УВ ПОМП из двух стержней с обмотками не связанных между собой перемычкой сверху.

Известная расчетная программа ANSYS позволяет определить значения индукции в указанных зонах ниже торцев стержней УВ ПОМП. Однако её использование затруднено из-за чрезмерной сложности. Необходима разработка более простой в использовании расчетной методики (инженерной методики).

Целью настоящей работы является разработка расчетной методики моделирования пространственного распределения индукции управляющего ПОМП в зоне сварочной ванны путем использования уравнений электростатики.

По литературным данным [4] 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 [4], индукция (B) и напряженность электрического поля (E), генерируемые соответственно электромагнитами 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 ПОМП, этот метод не использовался. В настоящем исследовании поставлена задача по использованию возможности моделирования стационарного магнитного поля стационарным электростатическим полем.

Как известно [4], по закону Кулона напряженность электростатического поля E от заряда q в точке, на расстоянии R от заряда:

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

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

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

Тогда формула (1) примет вид:

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

Расчет по формуле (2) удобен (и возможен), поскольку в конечном итоге для оценки характера распределенности напряженности поля E (E_x , E_y , E_z) вдоль какого либо направле-

ния (осей X, Y, Z) необходимо выражать в относительных единицах, например, через параметр E_x/E_{xmax} . В этом случае распределение компоненты поля, электростатического E_x/E_{xmax} , можно сравнить с распределенностью поля магнитного, генерируемого реальной конструкцией УВ ПОМП (B_x/B_{xmax}). Кроме того, значения компонент поля E (E_x, E_y, E_z) вдоль какого либо направления позволяет 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).

В расчетах рассматривали нижнюю часть стержней двухстержневого электромагнита с сечением $F_c = b \times \delta = 26 \times 16$ (мм), длиной $L = 50$ мм, расположенную в зоне ниже катушек. На поверхностях стержней размещали точечные электрические заряды одинаковой величины, распределенные равномерно на всех поверхностях.

При сварке пластин из ферромагнитных материалов (например, из малоуглеродистой стали) у поверхности такой пластины касательная компонента индукции ПОМП равна нулю.

Определение индукции ПОМП в области над поверхностью таких пластин возможно при использовании уравнений электростатики и метода отражений. Однако, в зоне сварочной ванны, представляющей собой углубления в пластине, и в которой стенки обладают ферромагнитными свойствами, решение задачи с использованием метода отражений усложняется.

Рассматривали метод решения такой задачи на более простом варианте, а именно: определяли компоненты напряженности моделирующего электростатического поля в зоне разделки двух торцов пластин (под сварку). Рассмотрим решение такой задачи, когда толщина свариваемых встык пластин $S = 12$ мм, разделка имеет угол $\alpha = 45^\circ$; при вводе постоянно ПОМП расстояние от торцов стержней УВ ПОМП до поверхности пластин $h = 15$ мм, расстояние между вертикальными стержнями (с катушками) – $a = 20$ мм (рис. 1). Рассмотрим метод определения компонент напряженности электростатического (моделирующего) поля E_x, E_z в точке B стыка, которая расположена на правой кромке разделки (рис. 1).

При моделировании разместим на поверхности левого стержня (N) 5 зарядов, одинаковой величины: q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 ($q = 16$ каждый). Аналогично разместим такой же величины, но противоположного знака («-») заряды $q_1', q_2', q_3', q_4', q_5'$ на правом стержне (S). Нормальная к поверхности кромки в точке B компонента напряженности поля E_n определится как сумма E_n от действия положительных зарядов (на левом стержне N) и отрицательных зарядов

(на правом стержне S). При этом расчеты E будем выполнять по формуле: $E_i = \frac{q_i}{R_i^2}$; q_i – за-

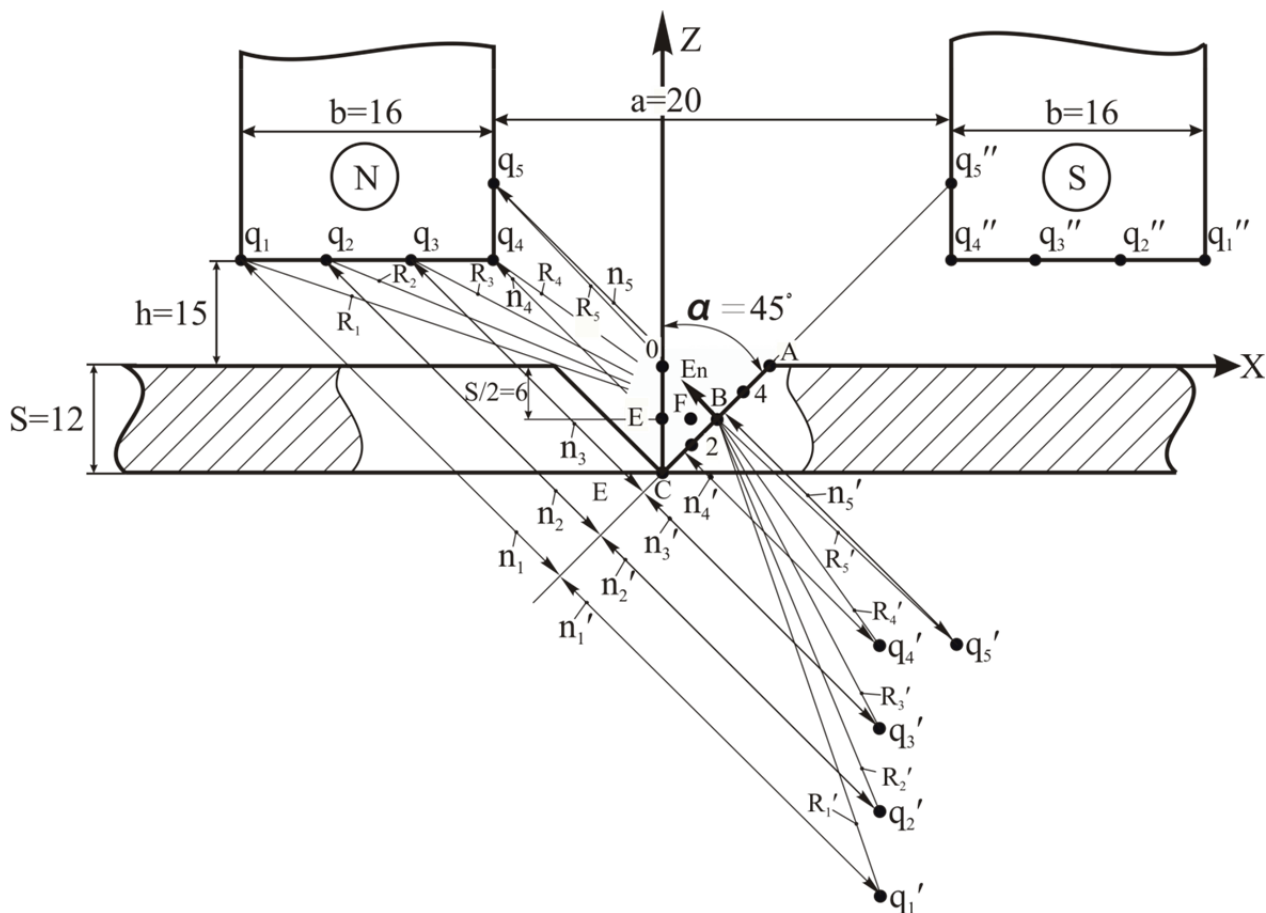
ряд; $q_i = 16$; R_i – расстояние от i -го заряда до точки B ; см). Например, от действия заряда q_1 ;

$E_1 = \frac{16}{R_1^2}$. Нормальная составляющая E_{n1} от заряда q_1 в точке B : $E_{n1} = E_1 \frac{n_1}{R_1}$ (n_1 – расстояние

от заряда q_1 до линии ABC (см. рис. 1).

Отраженные заряды $q_1', q_2', q_3', q_4', q_5'$ размещены на линиях, перпендикулярных к линии ABC (рис. 1). При этом, например, для q_1 – размер n_1 , а для q_1' – размер n_1' , при этом $n_1 = n_1'$. Если учесть действия отраженных зарядов ($q_1' \dots q_5'$), то касательная компонента напряженности поля E_τ – в точке B будет равна нулю ($E_\tau = 0$), а нормальная компонента напряженности увеличится в 2 раза (по отношению к определенной от действия всех зарядов $q_1 \dots q_5$). Значение компонент E_x и E_z через E_n определяется через направляющие косинусы,

либо синусы угла α (B данном примере $\cos \alpha = \sin \alpha = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$).

Рис. 1. К расчету напряженности поля E в точке B

Расчет компонент напряженности поля E_x , E_z в точке F (рис. 2), не расположенной на стенке из ферромагнитного материала (при моделировании не расположенной на электропроводной стенке), выполняется несколько иначе. Для расчета проведем через точку F луч DE , параллельной линии кромки AC (рис. 2). Сначала определяются значения компонент E_n (в точке F) от действия зарядов $q_1 \dots q_5$, расположенных на поверхностях левого стержня N (при этом $q_1 = q_2 = \dots = q_5 = 16$).

Например, от действия заряда q_1 ; $E_1 = \frac{16}{R_1^2}$; $E_{n1} = E_1 = \frac{n_1}{R_1}$. В точке F в дальнейшем суммируем значения E_n от действия всех зарядов на левом стержне (N). Далее учитываем действие отраженных от стенки AC зарядов $q_1' \dots q_5'$ (рис. 2). При этом, $E_1' = \frac{16}{(R_1')^2}$;

$E_{1n}' = E_1' = \frac{n_1'}{R_1'}$ (следует учесть, что $R_1' > R_1$; $n_1' > n_1$). Если в точку F «падают» лучи (векторы)

от зарядов, расположенных на правом стержне S (векторы поля направлены от точки F к этим зарядам), то действия этих зарядов (составляющих поля E_n) определяют аналогично по методу, изложенному выше (необходимо определять расстояния n_5'' и n_5''' от DE , как это указано на рис. 2).

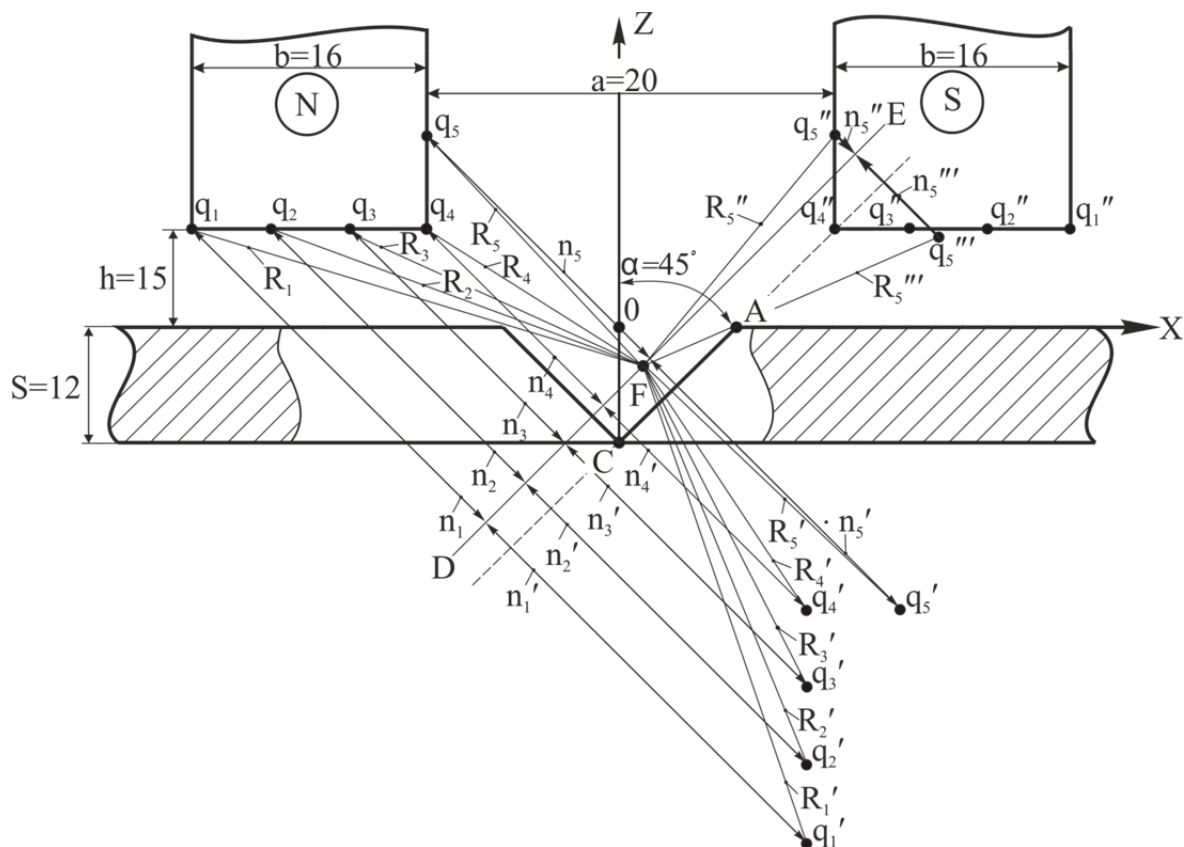


Рис. 2. К расчету компонент напряженности поля E в точке F

Выполняли расчет по приведенной методике для точек C , 2 , B , 4 , A , E , O , F , G (рис. 1 и рис. 2). Контур сварочной ванны в поперечном сечении (углубление в пластине) имеет более сложную конфигурацию, чем рассмотренная форма в виде разделки в свариваемых пластинах. Однако, расчет компонент напряженности поля E_x , E_z (аналогов компонент индукции B_x , B_z магнитного поля) можно выполнить по предложенной методике. При этом необходимо криволинейные боковые стенки ванны заменить участками прямолинейных (рис. 3) и находить составляющие напряженности поля E_x , E_z (через E_n) в любой точке поперечного сечения (полости). При этом необходимо учитывать действие зарядов, расположенных на поверхности левого и правого стержня УВ ПОМП, а также – отраженных зарядов от прямоугольных участков стенок ванны: AB , BC , CD (рис. 3).

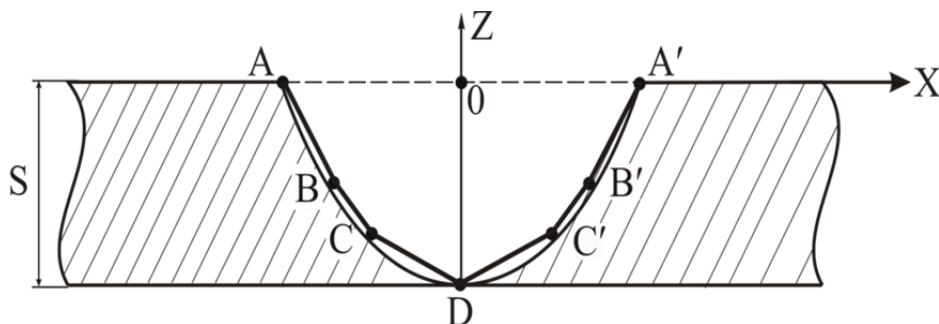


Рис. 3. Форма поперечного сечения ванны

При выполнении расчетов использовали программу Mathcad 15.

Определяли также и экспериментальные данные при использовании двухстержневого УВ ПОМП с сечением стержней 26×16 мм, расположенных вертикально, пластины из стали

ВМСтЗсп толщиной $S = 12$ мм с разделкой кромок под углом $\alpha = 45^\circ$. При этом расчетные данные удовлетворительно совпадают с данными эксперимента (в относительных значениях).

Данные вычислений в абсолютных значениях (делениях) приведены на рис. 4, а на рис. 5 – в относительных значениях. Установлено хорошее совпадение расчетных значений E_x/E_{xmax} , E_z/E_{zmax} с экспериментальными значениями индукции B_x/B_{xmax} , B_z/B_{zmax} .

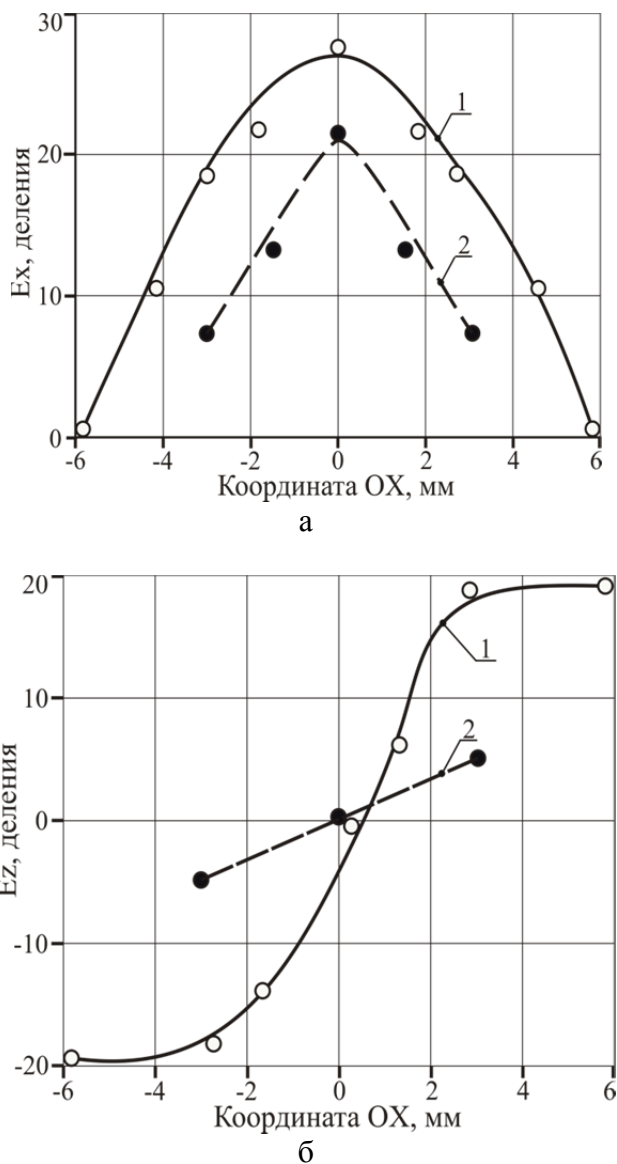


Рис. 4. Распределение напряженностей поля E_x (а) и E_z (б) вдоль оси OX : 1 – $Z = 0$ мм; 2 – $Z = -6$ мм

Поскольку напряженность поля (E) обратно пропорциональна квадрату расстояния от заряда (q) до исследуемой точки, то максимальный вклад в значения E вносят заряды, расположенные на минимальном расстоянии от исследуемой точки. То есть, максимальное влияние на значения E оказывают заряды, размещенные на торцах стержней УВ ПОМП.

Следует отметить, что точность получаемых расчетных результатов увеличивается при увеличении числа зарядов, размещаемых на поверхностях участков стержней УВ ПОМП, расположенных ниже катушек. Кроме того, предложенный метод расчета применим для варианта сварки стыковых соединений пластин из ферромагнитных сталей, когда в стыке пластин имеется зазор (внизу разделки типов соединений С18, С25, либо зазор, как это характерно для соединений типа С4).

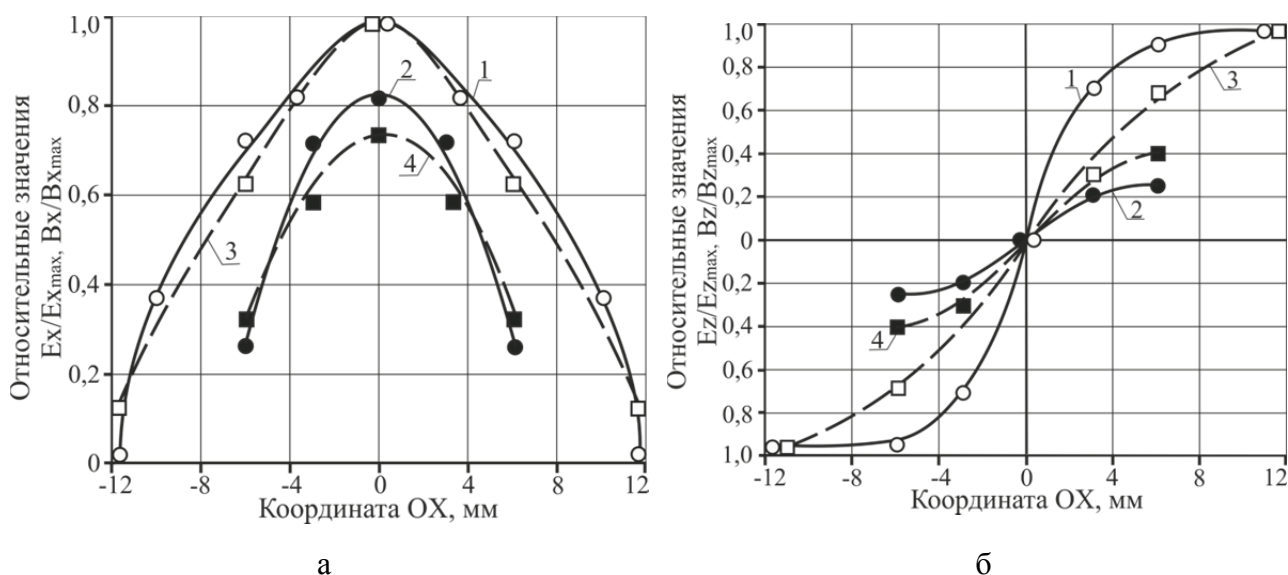


Рис. 5. Распределение относительных значений E_x/E_{xmax} , B_x/B_{xmax} (а) и E_z/E_{zmax} , B_z/B_{zmax} (б) вдоль оси OX : а) 1 – E_x/E_{xmax} , $Z = 0$ мм; 2 – E_x/E_{xmax} , $Z = -6$ мм; 3 – B_x/B_{xmax} , $Z = 0$ мм; 4 – B_x/B_{xmax} , $Z = -6$ мм; б) 1 – E_z/E_{zmax} , $Z = 0$ мм; 2 – E_z/E_{zmax} , $Z = -6$ мм; 3 – B_z/B_{zmax} , $Z = 0$ мм; 4 – B_z/B_{zmax} , $Z = -6$ мм

Предположенный расчетный метод можно рекомендовать к использованию при анализе строения ПОМП в зоне разделки кромок стыковых сварных соединений и в зоне сварочной ванны.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что для оценки строения управляющих магнитных полей, генерируемых УВ ПОМП, искажаемых наличием ферромагнитного изделия, возможно, использовать уравнения электростатики и метод зеркальных изображений.

2. Разработанный расчетный метод обеспечивает удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных о величине индукции ПОМП в зоне сварочной ванны, и может быть использован для оптимизации конструкции УВ ПОМП применительно к дуговой сварке стыковых соединений пластин из ферромагнитных сталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пацкевич И.Р. Распределение индукции наведенного магнитного поля в зоне горения сварочной дуги / Пацкевич И.Р., Зернов А.В., Иванцов В.Я. // Сварочное производство. – 1970. – № 2. – С. 9–10.
2. Скиперский Н.А. Формирование шва поперечным магнитным полем при сварке немагнитных материалов / Н.А. Скиперский, А.М. Рыбачук // Сварочное производство. – 2000. – № 7. – С. 53–55.
3. Размышляев А.Д. Устройства ввода поперечного магнитного поля для процессов дуговой сварки и наплавки (Обзор) / А.Д. Размышляев, М.В. Миронова, С.В. Ярмонов // Автоматическая сварка. – 2013. – № 1. – С. 40–44.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Гардарики, 2003. – 317 с.
5. Андреева Е.Г. Расчет стационарных магнитных полей и характеристик электротехнических устройств с помощью программного пакета ANSYS / Е.Г. Андреева, С.П. Шамец, Д.В. Колмогоров // Electronic scientific journal «Oil and Gas Business». – 2005. – № 1.

Статья поступила в редакцию 26.01.2017 г.