

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФОРМЫ ИЗДЕЛИЯ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ СВАРОЧНОГО ТОКА

В. В. ЧИГАРЕВ, В. И. ЩЕТИНИНА, доктора техн. наук, **С. В. ЩЕТИНИН**, канд. техн. наук, **В. И. ФЕДУН**, инж. (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Получены уравнения для расчета индукции электромагнитного поля при сварке пластин и труб. Расчетно-экспериментальным путем установлено влияние формы изделия на электромагнитное поле сварочного тока и разработан способ предотвращения магнитного дутья при сварке труб.

Ключевые слова: дуговая сварка, труба, пластина, электромагнитное поле, индукция, электромагнитная сила, электромагнитное давление, магнитное дутье, двухсторонний токоподвод

При односторонней высокоскоростной дуговой сварке качество формирования швов определяется стабильностью процесса, которая при магнитном дутье снижается. Замкнутый контур труб усиливает магнитное дутье, вследствие чего нарушается стабильность процесса сварки и ухудшается качество формирования шва. Во избежание этого следует уменьшать магнитное дутье.

Большой вклад в исследование и использование электромагнитного поля и магнитогидродинамических явлений при сварке труб внесли Б. Е. Патон, В. К. Лебедев и С. Л. Мандельберг [1–3].

Электромагнитное поле, возникающее при протекании тока по проводнику, исследовали Р. М. Уайт [4], Д. Маттис [5], В. Гильберт [6], Дж. Максвелл [7]. Электромагнитное поле применяется для удержания горячей плазмы, в ускорителях заряженных частиц в обычной и квантовой электронике, энергетике, физике твердого тела, химии, биологии и др. [4]. Особый интерес представляет исследование и использование электромагнитных полей при сварке.

Электромагнитное поле сварочного контура создается током, протекающим по электроду, дуге и свариваемому изделию. Электромагнитное поле тока, протекающего по электроду и дуге, создает пинч-эффект, под действием которого возникают мощные плазменные потоки и давление сварочной дуги [8–10], обеспечивающее заданную глубину проплавления. Электромагнитное поле тока, протекающего по изделию, является поперечным и приводит к возникновению силы Ампера, под действием которой плазма отклоняется в сторону поля с меньшей напряженностью, и к магнитному дутью. Следует заметить, что электромагнитное поле при сварке исследовано недостаточно [1–3, 11].

Цель проведенных исследований — изучение воздействия формы изделия на электромагнитное поле сварочного тока и разработка способа предотвращения магнитного дутья при односторонней высокоскоростной сварке труб.

Измерение электромагнитного поля сварочного тока в околосварочном пространстве затруднено наличием здесь высокой температуры: при приближении к дуге и сварочной ванне на расстояние менее $16 \cdot 10^{-3}$ м изолированный кварцем зонд измерителя магнитной индукции Ш1-7 сгорает. В связи с этим целесообразно исследовать распределение электромагнитного поля сварочного тока в околосварочном пространстве расчетным путем.

При расчете индукции B электромагнитного поля тока в прямолинейном проводнике малого сечения бесконечной длины [12, 13] влияние формы проводника на электромагнитное поле не учитывается. При сварке ток протекает по проводникам больших сечений, форма которых влияет на индукцию электромагнитного поля сварочного тока и характер ее распределения. Поскольку пространственными сварными конструкциями являются полотнища котлов и трубы, то получены уравнения для определения индукции электромагнитного поля тока, протекающего именно по пластинам и трубе.

Расчет электромагнитного поля тока, протекающего по изделию, выполняется на основании закона Био-Савара – Лапласа и принципа суперпозиции магнитных полей [12–14]. Для определения электромагнитного поля в зазоре пластин (без учета краевых эффектов) разобьем их на бесконечно длинные тонкие проводники сечением $dx dy$.

Индукция B электромагнитного поля, создаваемого элементом бесконечно длинного проводника тока, протекающего через площадку с координатами x, y сечением $dx dy$, в точке (x_0, y_0) (рис. 1) составляет

$$dB = \mu\mu_0 \frac{I dx dy}{2\pi\sqrt{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]}4\delta b} \text{ [Тл]},$$

где μ — относительная магнитная проницаемость ферромагнетика; μ_0 — магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; I — ток, протекающий по двум пластинам (или по трубе), А; δ — половина толщины пластин, м; b — ширина пластины, м.

Индукция электромагнитного поля

$$dB = \sqrt{dB_x^2 + dB_y^2} \text{ [Тл]},$$

где $dB_x = dB \frac{y-y_0}{r}$ — поперечная составляющая;

$dB_y = dB \frac{x-x_0}{r}$ — продольная составляющая; r — расстояние от точки измерения до элемента тока, м.

Индукция поперечного электромагнитного поля

$$dB_x = \mu\mu_0 \frac{I(y-y_0) dx dy}{8\pi\delta b(x-x_0)^2 + (y_0-y)^2} \text{ [Тл]}. \quad (1)$$

Индукция продольного электромагнитного поля

$$dB_y = \mu\mu_0 \frac{I(x-x_0) dx dy}{8\pi\delta b(x-x_0)^2 + (y_0-y)^2} \text{ [Тл]}. \quad (2)$$

Индукция поперечного и продольного электромагнитных полей в точке (x_0, y_0) определяется интегрированием соответственно выражений (1) и (2):

$$B_x = \mu\mu_0 \frac{I}{8\pi\delta b} \times \int_{-\delta}^{\delta} \left(\int_{-\delta-s}^{-s} \frac{(y-y_0) dy}{(y_0-y)^2 + (x-x_0)^2} + \int_s^{s+b} \frac{(y-y_0) dy}{(y_0-y)^2 + (x-x_0)^2} \right) dx \text{ [Тл]};$$

$$B_y = \mu\mu_0 \frac{I}{8\pi\delta b} \times \int_{-\delta}^{\delta} \left(\int_{-\delta-s}^{-s} \frac{(x-x_0) dy}{(x-x_0)^2 + (y_0-y)^2} + \int_s^{s+b} \frac{(x-x_0) dx}{(x-x_0)^2 + (y_0-y)^2} \right) dy \text{ [Тл]}.$$

Индукцию рассчитывали на персональном компьютере. Ее расчетные значения хорошо согласуются с экспериментальными, полученными при моделировании процесса сварки (рис. 2) и измерении магнитной индукции в зазоре s стыка по всей его толщине и на расстоянии от изделия тесламетром Ф 4355, в котором используется эффект Холла. Для адекватности модели реальным условиям измерения индукции выполняли при пропускании через изделие тока 2100 А, как и в

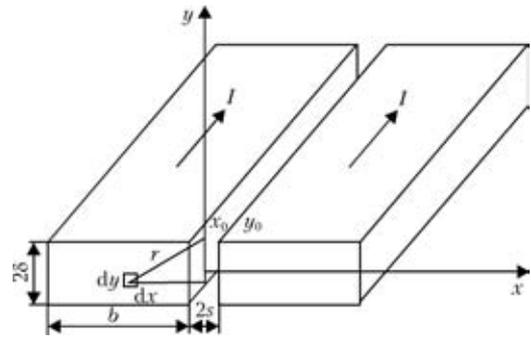


Рис. 1. Схема расчета индукции при протекании тока по пластинам

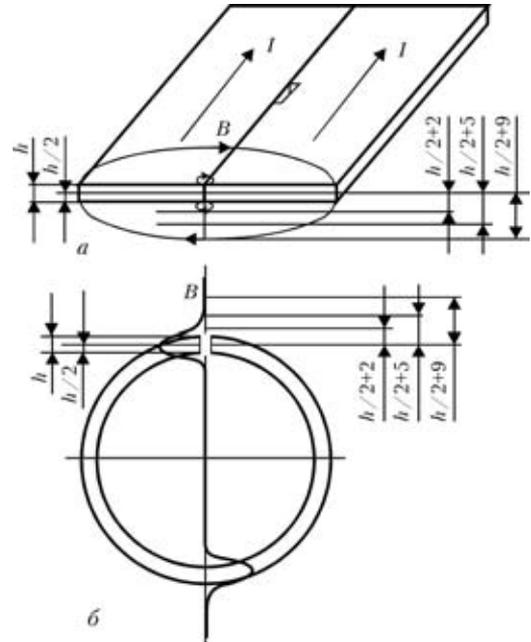


Рис. 2. Моделирование процесса сварки при протекании тока по пластинам (а) и трубе (б)

случае сварки составным электродом. В качестве источника питания использовали сварочный выпрямитель ВМГ-5000.

В результате расчета зависимости $B_x(y)$ при $x = 0$ и проведенных исследований установлено, что в случае протекания тока по пластинам электромагнитная индукция в середине толщины пластины равна нулю, ближе к ее поверхности она возрастает, а максимального значения достигает на самой поверхности пластины (рис. 3). При удалении от поверхности индукция электромагнитного поля сначала резко уменьшается вследствие низкой магнитной проницаемости воздуха, а затем незначительно изменяется. В соответствии с направлением силовых линий электромагнитного поля при переходе от середины к нижней части поверхности пластин направление индукции меняется на противоположное.

Распределение индукции в зазоре стыка пластин является результатом равномерного распределения тока по сечению изделия. Согласно принципу суперпозиции, магнитное поле, создаваемое несколькими токами, равно сумме полей, создава-

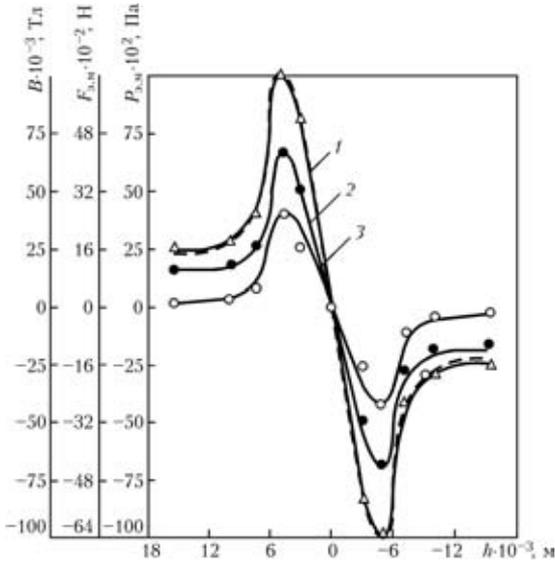


Рис. 3. Распределение электромагнитного поля при протекании тока $I = 2100$ А по пластине размером $10 \times 40 \times 300$ мм и зазоре в стыке 2 мм: 1 — индукция электромагнитного поля B ; 2 — электромагнитная сила $F_{э.м.}$; 3 — электромагнитное давление $P_{э.м.}$; штриховая кривая — расчетные значения индукции; h — точка измерения

емых каждым током в отдельности. Согласно закону Био-Савара, магнитное поле, создаваемое прямолинейным током проводника бесконечной длины, прямо пропорционально току и обратно пропорционально расстоянию от проводника с током.

В середине толщины пластины токи, протекающие по верхней и нижней ее поверхностям, создают равные по значению, но противоположные по направлению электромагнитные поля, которые взаимно уничтожаются. Поэтому индукция здесь равна нулю.

В случае приближения к поверхности пластины расстояние от другой ее поверхности увеличивается, вследствие чего компенсирующее действие токов уменьшается, а значения индукции электромагнитного поля возрастают. Наличие максимальной индукции на поверхности пластин свидетельствует о том, что максимальные электромагнитные силы межатомного взаимодействия определяют прочность сварного соединения.

Хорошая сходимость расчетных и экспериментальных данных, полученных при моделировании процесса сварки, подтверждает достоверность уравнений для определения индукции электромагнитного поля тока, протекающего по пластинам.

Известно, что при протекании тока по трубе без зазора электромагнитное поле внутри нее равно нулю [14]. Сварку труб выполняют с зазором в стыке, влияющим на электромагнитное поле сварочного тока. Расчетные формулы для определения закономерности распределения индукции в зазоре стыка трубы получены на основании следующих предположений.

Поскольку при сварке толстостенных труб их толщина 2δ больше зазора в стыке $2s$ (рис. 4),

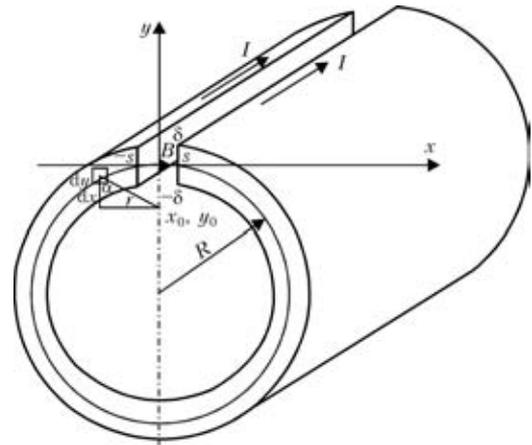


Рис. 4. Схема расчета индукции при протекании тока по трубе (см. обозначения в тексте)

можно считать, что деформация силовых линий электромагнитного поля отсутствует. Следовательно, электромагнитная индукция в трубе и зазоре на границе ферромагнетик–воздух равна. Тогда индукция электромагнитного поля в зазоре стыка определяется по теореме о циркуляции [13]:

$$\oint_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = \frac{B}{\mu_0 \mu} l + \frac{B}{\mu_0} l_3 = \sum I_{эл.}$$

где $l = 2\pi R - 2s$ — длина ферромагнетика, м; $l_3 = 2s$ — зазор в стыке, м; R — радиус трубы, м; $I_{эл.}$ — элементарный ток, протекающий по трубе, А.

Сумма элементарных токов, протекающих внутри контура, который охватывается окружностью с центром, лежащим на оси трубы, проходящей через точку $(0, y)$, составляет

$$\sum I_{эл} = \frac{I}{2\delta} (\delta + y) [A],$$

где 2δ — толщина стенки трубы; y — ордината, $-\delta \leq y \leq \delta$.

Тогда индукция электромагнитного поля в зазоре стыка трубы составляет

$$B = \frac{\mu_0 \sum I_{эл}}{l/\mu + l_3} = \frac{\mu_0 \frac{I}{2\delta} (\delta + y)}{\frac{2\pi R - s}{\mu} + 2s} [Тл];$$

после преобразований получим

$$B = \frac{\mu_0 I (\delta + y)}{4\delta (\frac{\pi R - s}{\mu} + s)} [Тл]. \tag{3}$$

С помощью уравнения (3) расчетным путем можно определить индукцию электромагнитного поля сварочного тока в околосварочном пространстве при различных зазорах, равных ширине изо-

термы Кюри, режимах сварки и токоподводе к изделию.

Достоверность уравнения (3) подтверждена экспериментальными данными, полученными при моделировании процесса сварки путем пропуска тока по трубе и измерения индукции в зазоре стыка по толщине металла и на расстоянии от поверхности трубы.

Адекватность модели реальным условиям подтверждена при измерении индукции электромагнитного поля сварочного тока в производственных условиях при сварке труб диаметром $426 \cdot 10^{-3}$ м для газо- и нефтепроводных магистралей.

Установлено, что при протекании тока по трубе максимальное значение индукции возрастает от 0,35 Тл по сравнению с 0,1 Тл при протекании тока по пластинам (рис. 5).

Экспериментально установлено, что относительная магнитная проницаемость μ ферромагнитной трубы, применяемой при моделировании процесса сварки зависит от напряженности H электромагнитного поля (рис. 6). В случае малых значений H с их увеличением μ возрастает до 1300. При увеличении H значения μ сначала резко уменьшаются до 158, а затем менее значительно (до 10).

Без учета зависимости μ от H согласно расчетным данным максимальное значение индукции наблюдается на поверхности трубы. На внутренней поверхности стенки трубы индукция равна нулю. С учетом зависимости μ от H максимальная индукция имеет место в середине стенки трубы, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Расчетно-экспериментальным путем установлено, что при протекании тока по трубе максимальное значение индукции резко возрастает, оно в π раз больше значения индукции при сварке пластин. При этом направление индукции в стыке не изменяется, а максимального значения она достигает в середине стенки трубы. Индукция и ее распределение изменяются в результате того, что силовые линии электромагнитного поля концентрируются в замкнутом ферромагнитном теле трубы, контур которой совпадает с силовыми линиями электромагнитного поля. За пределами ферромагнитного тела трубы магнитная проницаемость снижается и индукция электромагнитного поля резко падает. Значение индукции на оси трубы не равно нулю и имеет противоположное направление в области нижней стенки.

Форма изделия также влияет на максимальную электромагнитную силу Ампера $F = I l_d$ (здесь l_d — длина дуги), действующую на дугу и жидкий металл сварочной ванны, а в квадратичной зависимости — на электромагнитное давление $P_{э.м} = B^2 / 2\mu$ [15], которое при протекании тока

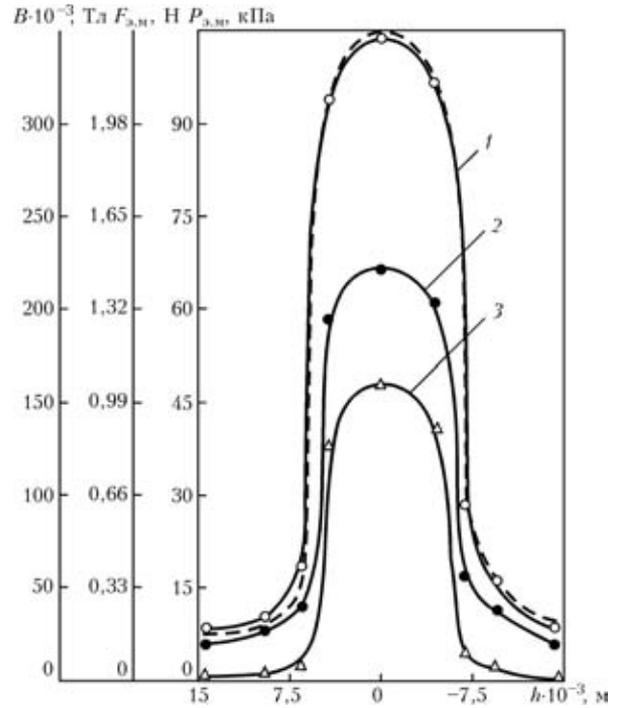


Рис. 5. Распределение электромагнитного поля при протекании тока $I = 2100$ А по трубе размером $10 \times 60 \times 300$ мм и зазоре в стыке 2 мм: 1–3 — см. рис. 4; штриховая кривая — расчетные значения индукции с учетом зависимости магнитной проницаемости от напряженности электромагнитного поля

по трубе возрастает почти в 10 раз. Поэтому при сварке труб усиливаются магнитное дутье и влияние электромагнитного поля на формирование швов.

В результате магнитного дутья при сварке прямых труб от токоподвода электромагнитная сила отклоняет дугу вперед таким образом, что ее длина периодически увеличивается до момента естественного обрыва дуги, которая вновь возбуждается при закорачивании электрода на изделие.

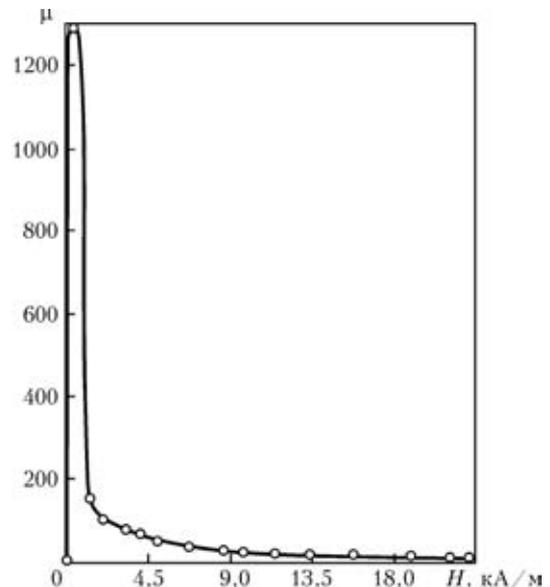


Рис. 6. Зависимость относительной магнитной проницаемости μ ферромагнетика от напряженности H электромагнитного поля

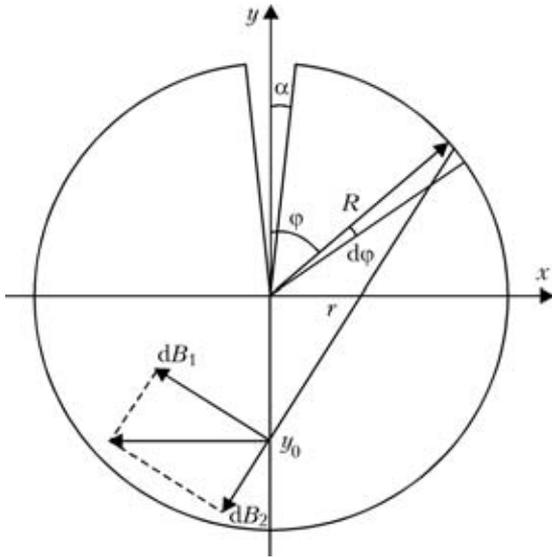


Рис. 7. Схема расчета индукции при протекании тока по тонкостенной трубе: B_1, B_2 — составляющие индукции; остальные обозначения см. в тексте

При этом режим сварки становится нестабильным и влияет на качество формирования швов. При сварке труб на токоподвод дуга отклоняется назад, погружается в основной металл и стабилизируется, но шов формируется с подрезами.

Для тонкостенной трубы индукцию электромагнитного поля, создаваемого током, протекающим по трубе (рис. 7), определяли согласно принципу суперпозиции полей, образуемых бесконечно длинными прямолинейными проводниками, по которым протекают токи

$$dI = \frac{Id\varphi}{2(\pi - \alpha)},$$

где φ — угол, определяющий положение элементарного участка с током; α — угол, зависящий от зазора в стыке.

Симметричные относительно оси y токи создают в точке y_0 суммарное поле, направленное вдоль оси x :

$$dB = 2\mu_0 \frac{Id\varphi}{2(\pi - \alpha)} \frac{1}{2\pi r} \frac{y - y_0}{r},$$

где $r = \sqrt{(y_0 - y)^2 + x^2}$; y — ордината элементарного участка с током; y_0 — ордината точки, в которой измеряется индукция.

Перейдя к полярным координатам, получим

$$\begin{aligned} dB &= \mu_0 \frac{Id\varphi}{\pi - \alpha} \frac{1}{2\pi} \frac{y_0 - R \cos \varphi}{R^2 \sin^2 \varphi + (y_0 - R \cos \varphi)^2} = \\ &= \mu_0 \frac{I}{2\pi(\pi - \alpha)} \frac{y_0 - R \cos \varphi}{R^2 + y_0^2 - 2Ry_0 \cos \varphi} d\varphi, \end{aligned}$$

где $x = R \sin \varphi$; $y = R \cos \varphi$.

Индукцию электромагнитного поля тока, протекающего по трубе, определяли интегрированием

$$\begin{aligned} B(0, y_0) &= \int_{\alpha}^{\pi} \mu_0 \frac{I}{2\pi(\pi - \alpha)} \frac{y_0 - R \cos \varphi}{R^2 + y_0^2 - 2Ry_0 \cos \varphi} d\varphi = \\ &= \int_{\alpha}^{\pi} \mu_0 \frac{I}{2\pi(\pi - \alpha)} \frac{1}{2y_0} \frac{2y_0^2 - 2Ry_0 \cos \varphi + R^2 - R^2}{R^2 + y_0^2 - 2Ry_0 \cos \varphi} d\varphi = \\ &= \mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \int_{\alpha}^{\pi} \left(1 + \frac{y_0^2 - R^2}{R^2 + y_0^2 - 2Ry_0 \cos \varphi} \right) d\varphi = \\ &= \mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \left(\int_{\alpha}^{\pi} d\varphi + \frac{y_0^2 - R^2}{R^2 + y_0^2} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{d\varphi}{1 - \frac{2Ry_0}{R^2 + y_0^2} \cos \varphi} \right). \end{aligned}$$

Поскольку $\int_{\alpha}^{\pi} d\varphi = \pi - \alpha$, то после интегрирования и преобразований получим

$$\begin{aligned} B(0, y_0) &= \mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \times \\ &\times \left[\pi - \alpha + \frac{y_0^2 - R^2}{R^2 - y_0^2} \left(\pi - 2 \operatorname{arctg} \frac{R^2 - y_0^2}{(R - y_0)^2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \right]. \end{aligned}$$

Внутри трубы при $y_0 \leq R$ индукция электромагнитного поля равна

$$\begin{aligned} B(0, y_0) &= \mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \times \\ &\times \left[-\alpha + 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{R^2 - y_0^2}{(R - y_0)^2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

За пределами трубы индукция электромагнитного поля

$$\begin{aligned} B(0, y_0) &= \mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \times \\ &\times \left[\pi - \alpha + \left(\pi - 2 \operatorname{arctg} \frac{R^2 - y_0^2}{(R - y_0)^2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \right]. \end{aligned}$$

Индукция электромагнитного поля на значительном расстоянии от трубы при $y_0 \gg R$

$$\begin{aligned} B(0, y_0) &= \mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \times \\ &\times \left[2\pi - \alpha - 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{y_0^2}{(y_0^2)^2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \right] = \\ &= \mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} 2\pi = \mu_0 \frac{I}{2(\pi - \alpha)y_0}. \end{aligned}$$

Пренебрегая α в связи с ее малым значением, получаем индукцию электромагнитного поля на большем расстоянии от трубы

$$B(0, y_0) = \mu_0 \frac{I}{2\pi y_0} \text{ [Тл]},$$

что является классическим выражением для прямолинейного проводника с током и подтверждает достоверность полученной формулы.

Из уравнения (4) на оси трубы при $y_0 = 0$ индукция составляет

$$B(0, y_0) = \mu_0 \frac{I \sin \alpha}{2\pi R(\pi - \alpha)} \text{ [Тл]}. \quad (5)$$

Как следует из (5), при протекании тока по трубе с зазором индукция электромагнитного поля на оси трубы не равна нулю и возрастает с увеличением зазора в стыке.

Достоверность полученных уравнений подтверждается хорошей сходимостью с экспериментальными и литературными данными [14].

Для предотвращения магнитного дутья разработан способ электродуговой сварки труб с двухсторонним токоподводом, при котором регулируется действующая на дугу и жидкий металл ванны электромагнитная сила за счет пропускания впереди и позади дуги сварочного тока различных значений [16].

Разработанный процесс односторонней высокоскоростной сварки труб с двухсторонним токоподводом характеризуется стабильным и качественным формированием швов, пониженной материалоемкостью и энергоемкостью.

Выводы

1. Получены уравнения для расчета индукции электромагнитного поля при сварке пластин и труб. Расчетно-экспериментальным путем установлено влияние формы изделия на магнитную проницаемость, распределение электромагнитного поля в зазоре стыка и значения индукции, которые при сварке труб в π раз больше, чем при сварке пластин.

2. В стыке пластин индукция максимальна на поверхности пластины, в середине пластины она равна нулю и изменяет направление на противоположное на нижней ее поверхности. В стыке трубы максимального значения индукция достигает

в середине стенки трубы и изменяет направление в области нижней ее стенки.

3. Магнитное дутье при сварке труб возрастает вследствие наличия замкнутого контура, увеличения магнитной проницаемости, концентрации силовых линий в ферромагнитной трубе, отличающейся большой магнитной проницаемостью, повышения индукции электромагнитной силы, действующей на дугу, и электромагнитного давления.

4. Разработан способ сварки с двухсторонним токоподводом, который обеспечивает регулирование действующей на дугу и жидкий металл сварочной ванны электромагнитной силы стабильностью процесса односторонней высокоскоростной сварки труб и качественное формирование швов.

1. Патон Б. Е., Мандельберг С. Л. Сварка под флюсом при изготовлении труб большого диаметра // Автомат. сварка. — 1968. — № 3. — С. 41–46.
2. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Магнитогидродинамические явления при электрической сварке и их использование // Новые проблемы сварочной техники. — Киев, 1964. — С. 322–336.
3. Лебедев В. К. Магнитогидродинамические явления при дуговой сварке // Техническая электромагнитная гидродинамика. — М.: Металлургия, 1965. — С. 32–38.
4. Уайт Р. М. Квантовая теория магнетизма. — М.: Мир, 1972. — 306 с.
5. Маттис Д. Теория магнетизма. — М.: Мир, 1967. — 400 с.
6. Гильберт В. О магните, магнитных полях и о большом магните — Земле. — М.: Изд-во АН СССР, 1956. — 375 с.
7. Максвелл Дж. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. — М.: Изд-во АН СССР, 1954. — 238 с.
8. Лебедев В. К. Силовое воздействие сварочной дуги // Автомат. сварка. — 1981. — № 1. — С. 7–14.
9. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. — М.: Изд-во иностр. лит., 1961. — 369 с.
10. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. — М.: Машиностроение, 1970. — 334 с.
11. Гаген Ю. Г., Таран В. Д. Сварка магнитоуправляемой дугой. — М.: Машиностроение, 1970. — 157 с.
12. Говорков В. А. Электрические и магнитные поля. — М.: Энергия, 1968. — 486 с.
13. Зильберман Г. Е. Электричество и магнетизм. — М.: Наука, 1970. — 384 с.
14. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. — М.: Гардарики, 2001. — 316 с.
15. Абрамович Г. П. Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1969. — 824 с.
16. А. с. 1524981 СССР, МКИ В 23 К 31/06, 9/18. Способ дуговой сварки / В. И. Щетинина, А. И. Акулов. — Опубл. 30.11.89; Бюл. № 44.

Equations have been derived for calculation of the electromagnetic field induction in welding of plates and pipes. Calculation and experimental procedures have been used to establish the influence of the part shape on the electromagnetic field of welding current, and a method has been developed to prevent magnetic blowout in pipe welding.

Поступила в редакцию 22.05.2006