

РАСЧЕТ ИНДУКЦИИ УПРАВЛЯЮЩЕГО ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ С УЧЕТОМ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ СЕРДЕЧНИКА, ПРОВОЛОКИ И ИЗДЕЛИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ

А. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ, д-р техн. наук, А. А. ДЕЛИ, М. В. МИРОНОВА, аспиранты (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Расчетным и экспериментальным путем определено влияние магнитных свойств электродной проволоки, сердечника соленоида и изделия при дуговой наплавке в продольном магнитном поле на характер распределения и значение индукции магнитного поля в области между торцом электрода и изделием, а также внутри изделия и электродной проволоки. Эти данные позволяют наметить методы повышения эффективности использования продольного магнитного поля при дуговой наплавке.

Ключевые слова: дуговая наплавка, продольное магнитное поле, соленоид с сердечником, ферромагнетики, магнитные свойства, расчет магнитного поля, продольная компонента магнитной индукции

Использование управляющего продольного магнитного поля (ПРМП) при электродуговой наплавке под флюсом позволяет уменьшить долю участия основного металла в наплавленном, повысить производительность процесса, улучшить формирование наплавленного валика [1, 2]. Однако сложность физических процессов в сварочной дуге и жидком металле сварочной ванны, происходящих при воздействии ПРМП, и недостаточная их изученность сдерживают практическое использование этого способа наплавки. Кроме того, в настоящее время отсутствует надежное устройство ввода магнитных полей применительно к производственным условиям наплавки изделий.

При наплавке с воздействием ПРМП изделие и электродная проволока в большинстве случаев являются ферромагнетиками так же, как и сердечник соленоида. Конструкция последнего и его размеры должны быть такими, чтобы в зоне сварочной дуги продольная компонента индукции была максимальной.

Система ферромагнитных тел (сердечник соленоида, сварочная проволока и изделие (пластина)) при наличии неферромагнитного (воздушного) зазора между торцом сварочной проволоки и изделием обуславливает сложное распределение магнитного поля в пространстве. Продольная компонента индукции B_z в указанном зазоре определяется не только геометрическими размерами ферромагнитных тел и их взаимным расположением, но и их магнитными свойствами (магнитной проницаемостью μ). Известно, что μ существенно зависит от химического состава сплавов на основе

железа, микроструктуры, размера зерна и нелинейно зависит от напряженности поля H .

При определении значений индукции в зазоре между торцом электрода и изделием (плоской пластиной) расчетным либо экспериментальным путем [2, 3] обычно не учитывали состояние намагниченности этих тел, определяемое намагничивающей силой обмотки соленоида (уровнем H) и значением μ материала, а также зависимостью μ от H .

Целью настоящей работы явилось установление распределения индукции магнитного поля в ферромагнитных участках магнитной цепи от обмотки с током до наплаваемого изделия для достижения максимальных значений продольной компоненты индукции B_z магнитного поля в зоне сварочной дуги (зазоре между торцом электрода и изделием).

Значения индукции B_z получали расчетным путем по методике работы [3], суть которой заключается в следующем. В качестве исходного использовано уравнение распределения векторного магнитного потенциала в стационарных плоскомеридианных магнитных полях после ввода функции потока $\psi = r \cdot A$:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_a}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_a}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = -J, \quad (1)$$

где J — плотность тока в точке с координатами (r, z) ; v_a — обратное значение абсолютной магнитной проницаемости среды.

Расчет составляющих магнитной индукции с использованием функции потока ψ проводят по формулам

$$B_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad (2)$$

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r}; \quad (3)$$

$$|B| = \sqrt{B_r^2 + B_z^2}. \quad (4)$$

На границах расчетной области, рассматриваемой в виде цилиндра, задаются следующие граничные условия:

на верхней и нижней границах

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \frac{\partial \Psi}{\partial z} = 0; \quad (5)$$

на внешней границе (максимальные значения r)

$$\frac{\partial \Psi}{\partial n} \Big|_S = 0; \quad (6)$$

(поверхность S принимается параллельной оси системы);

на оси системы

$$\Psi = 0. \quad (7)$$

Уравнение (1) решали методом конечных разностей. Решение разностного уравнения осуществляли итерационным методом, приведенным в работе [4].

На рис. 1 приведена схема системы тел на пути магнитного потока, созданного протекающим в обмотке постоянным током (сварочная проволока диаметром 5 мм; пластина толщиной 20 мм; зазор между торцом электрода и пластиной $\Delta = 5$ мм). При расчетах приняты также следующие размеры соленооида: внутренний диаметр ферромагнитного сердечника $d_{вн} = 12$; наружный $d_{н} = 50$ мм; высота сердечника $h = 50$ мм; вылет электродной проволоки $H_{пр} = 40$ мм.

Для оценки влияния магнитной проницаемости μ на величину и характер распределения продольной компоненты индукции магнитного поля B_z в указанных участках системы тел μ задавали ступенчато ($\mu = 1; 250; 500$). Намагничивающую силу катушки соленооида IW ограничили значением 400 ампер-витков. Такие ограничения ($\mu = 500$ и $IW = 400$ ампер-витков) необходимы для того, чтобы в указанных ферромагнитных телах не наступало насыщение. В таблице приведены значения магнитной проницаемости μ , принятые в расчетах.

Распределение индукции B_z вдоль оси системы (при $r = 0$) в пластине (рис. 2, а), воздушном зазоре между торцом электрода и пластиной (рис. 2, б) и в сварочной проволоке (рис. 2, в) не претерпевает изменений на границе этих тел, что соответствует теоретическим положениям. На участке сварочной проволоки, расположенной в центральной области ее длины (внутри ферромагнитного сердечника), уровень индукции B_z максимален и зависит от уровня принятых в расчете

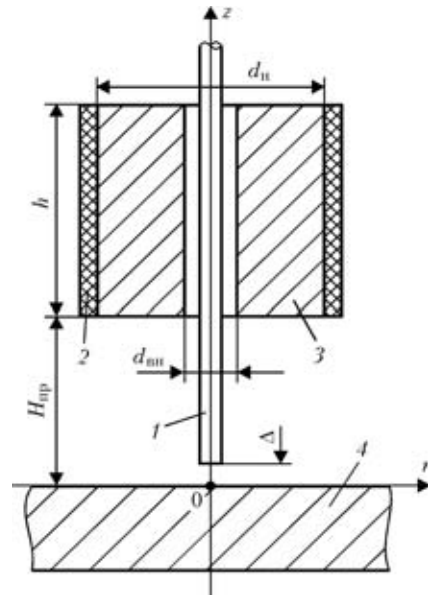


Рис. 1. Схема системы тел для изучения распределения индукции магнитного поля: 1 — электродная проволока; 2 — обмотка; 3 — сердечник соленооида; 4 — изделие (пластина)

значений магнитной проницаемости μ всех составляющих магнитной системы — изделия (пластины), сварочной проволоки (электрода) и ферромагнитного сердечника.

Если сварочная проволока является ферромагнетиком, то значение B_z существенно зависит от принятых в расчетах значений μ для проволоки (рис. 2, в, кривые 1, 2, 7). При этом значение μ , принятое в расчетах для ферромагнитного сердечника ($\mu = 1; 250; 500$), не влияет на уровень индукции B_z на этом участке проволоки (при неизменном значении $\mu = 250$) (рис. 2, в, кривые 1, 3). Для немагнитной проволоки ($\mu = 1$) уровень значений B_z в ней близок к нулю (кривые 7, 8). Сравнение кривых 1 и 5 показывает, что при отсутствии ферромагнитного сердечника сварочная проволока $\mu = 250$ намагничивается на этом участке больше, чем при его наличии. Наличие или отсутствие ферромагнитной пластины (изделия) практически не повлияло на процесс намагничивания проволоки на этом участке (рис. 2, в, кривые 4, б). Отсюда следует, что наличие ферромагнитной проволоки внутри соленооида и значение ее магнитной проницаемости являются основным фактором, определяющим значение индукции в зазоре между торцом сварочной проволоки и изделием (в зоне сварочной дуги). Об этом свидетельствуют данные, приведенные на рис. 2, б, а также распределение B_z вдоль радиуса r у поверхности изделия (рис. 3). Отсюда следует, что при расчете индукции B_z в зоне сварочной дуги необходимо учитывать реальные значения магнитной проницаемости для сварочной проволоки, что свидетельствует также о необходимости получения реальных данных о зависимостях $B = f(H)$ и $\mu =$

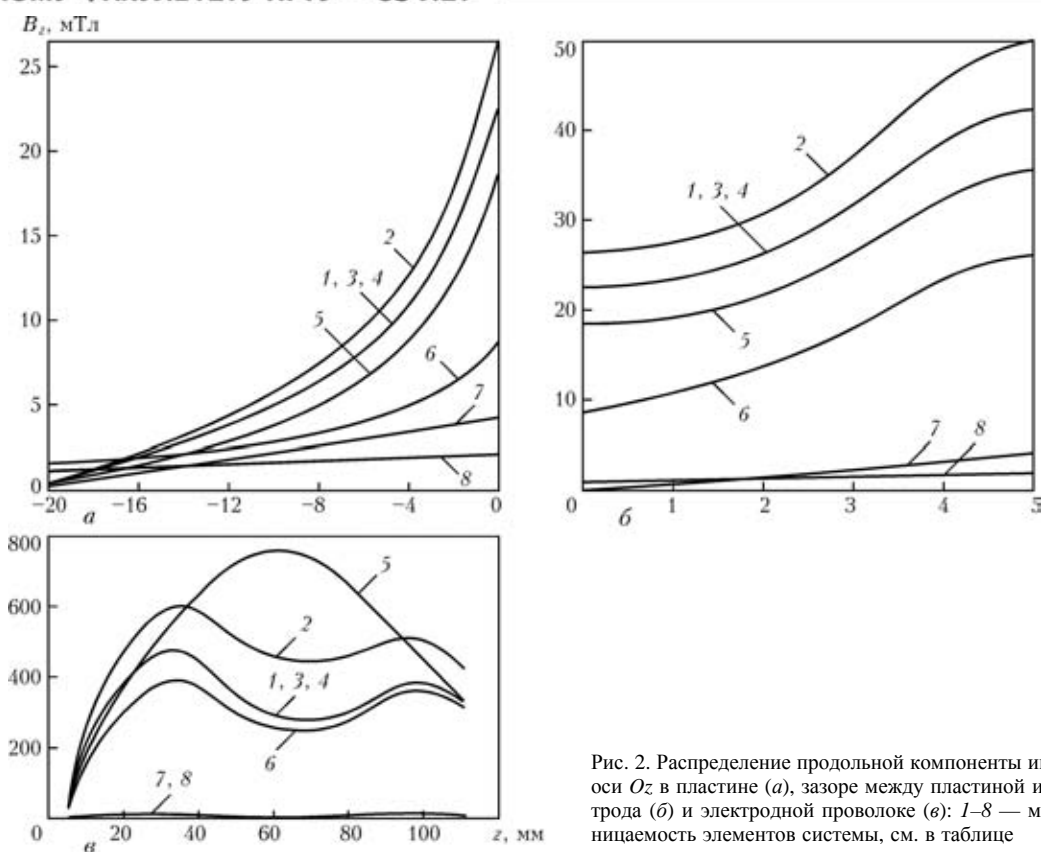


Рис. 2. Распределение продольной компоненты индукции B_z по оси Oz в пластине (а), зазоре между пластиной и торцом электрода (б) и электродной проволоке (в): 1–8 — магнитная проницаемость элементов системы, см. в таблице

Значения магнитной проницаемости μ , принятые в расчетах

№ кривых	Значения μ для		
	сердечника	пластины	сварочной проволоки
1	250	250	250
2	250	250	500
3	500	250	250
4	250	500	250
5	1	250	250
6	250	1	250
7	250	250	1
8	250	1	1

$f(H)$ для сварочных проволок, которые в настоящее время отсутствуют.

Следует отметить, что изложенные выше результаты получены при намагничивающей силе катушки соленоида 400 ампер-витков, однако, для получения уровня B_z в зоне сварочной дуги, необходимого для управления геометрическими размерами валика при дуговой наплавке, намагничивающая сила должна составлять порядка 2000 ампер-витков [2]. При этом возможно насыщение ферромагнетиков рассмотренной системы тел (прежде всего сварочной проволоки).

С учетом зависимостей $B = f(H)$ и $\mu = f(H)$, принятых по данным работы [5], выполнили расчет для низкоуглеродистой стали с содержанием

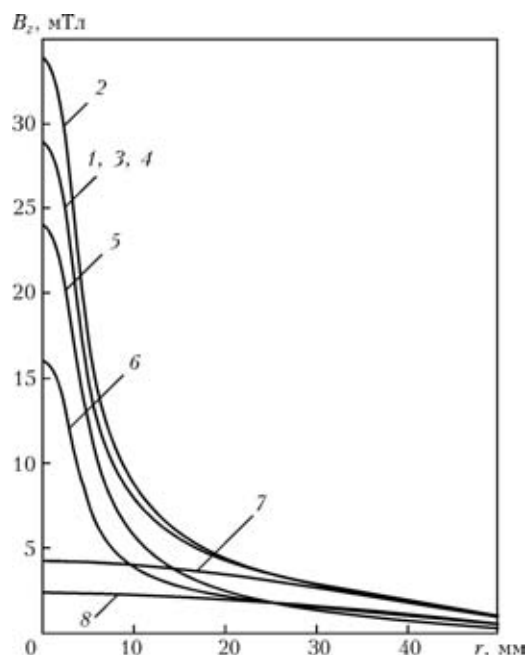


Рис. 3. Радиальное распределение компоненты индукции B_r при $z = 2,5$ мм (1–8 см. в таблице)

углерода 0,1 %. Расчетные данные (рис. 4) показали, что при малой намагничивающей силе соленоида (400 ампер-витков) учет зависимостей $B = f(H)$ и $\mu = f(H)$ для материала сварочной проволоки не привел к изменению индукции вдоль проволоки (рис. 4, кривые 1, 2). Для значительной намагничивающей силы соленоида (2000 ампер-витков), если учесть реальные данные о зависи-

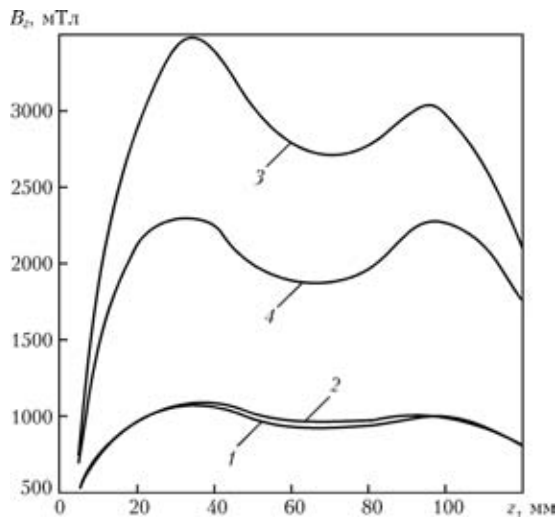


Рис. 4. Распределение продольной компоненты индукции B_z в проволоке по оси Oz : 1, 2 — $IW = 400$; 3, 4 — 2000 ампер-витков; 1, 3 — при постоянных значениях $\mu = 500$ для ферромагнитных составляющих системы; 2, 4 — с учетом зависимости $\mu = f(H)$ для указанных составляющих системы

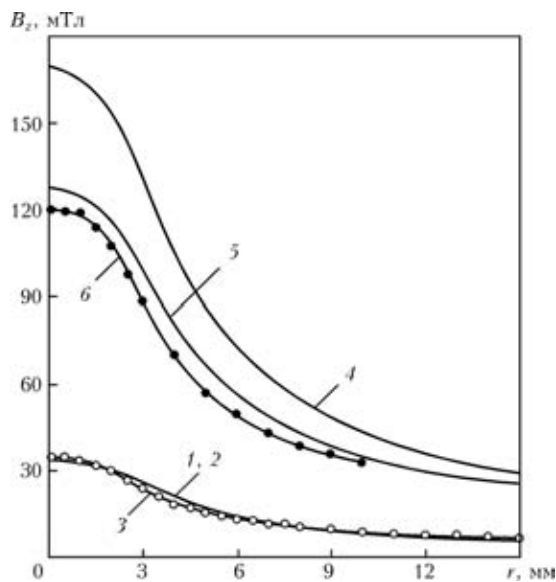


Рис. 5. Радиальное распределение компоненты индукции B_r при $z = 2,5$ мм: 1–3 — при $IW = 400$; 4–6 — 2000 ампер-витков; 1, 4 — расчетные данные при постоянных значениях $\mu = 500$ для ферромагнитных составляющих системы; 2, 5 — с учетом зависимости $\mu = f(H)$ для указанных составляющих системы; 3, 6 — экспериментальные данные

мостях $B = f(H)$ и $\mu = f(H)$, расчетные значения B_z в проволоке значительно меньше, чем при использовании в расчетах постоянного значения $\mu = 500$ (рис. 4, кривые 3, 4).

Design and experimental procedures have been used to determine the influence of magnetic properties of the electrode wire, solenoid core and workpiece in arc surfacing in a longitudinal magnetic field on the nature of distribution and magnitude of magnetic field induction in the region between the electrode tip and workpiece, as well as inside the workpiece and electrode wire. These data allow outlining the methods to improve the efficiency of an alternating magnetic field application in arc surfacing.

Следует отметить, что радиальная составляющая индукции магнитного поля B_r , как показали расчеты, для сечений $z = 35, 60$ и 90 мм на два порядка меньше, чем продольная компонента B_z . И только на конце электрода ($z \approx 10$ мм) на расстоянии $r = 0,1 \dots 2,5$ мм значение B_r сопоставимо с B_z (достигает половины значений компоненты индукции B_z).

Данные о распределении B_z вдоль радиуса у поверхности ферромагнитной пластины (рис. 5, кривые 1, 3) показывают, что при намагничивающей силе соленоида 400 ампер-витков расчетные данные хорошо совпадают с экспериментальными как при постоянном значении $\mu = 500$, так и при учете в расчетах зависимости $B = f(H)$ для материала проволоки. При намагничивающей силе соленоида 2000 ампер-витков, в связи с насыщением ферромагнитного материала, из которого изготовлена сварочная проволока, совпадение расчетных данных с экспериментальными достигается в том случае, если в расчетах учесть зависимость $B = f(H)$ для материала проволоки (рис. 5, кривые 4–6).

Выводы

1. При дуговой наплавке в ПРМП основное влияние на значение и характер распределения продольной компоненты индукции поля у поверхности ферромагнитного изделия оказывают ферромагнитные свойства электродной проволоки.
2. При значительной намагничивающей силе соленоида расчетные значения продольной компоненты индукции ПРМП у поверхности ферромагнитного изделия (пластины) удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными, если в расчетах учитывать зависимость $B = f(H)$ материала электродной проволоки.

1. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брискман, Г. М. Шеленков. — Киев: Техніка, 1983. — 127 с.
2. Размышляев А. Д. Магнитное управление формированием швов при дуговой сварке. — Мариуполь: ПГТУ, 2000. — 246 с.
3. Лазаренко М. А., Размышляев А. Д., Чичкарев Е. А. Расчет на ЭВМ управляющих магнитных полей для процессов сварки и наплавки // Вест. Приазов. гос. техн. ун-та. — 1999. — Вып. 8. — С. 147–150.
4. Демирчян К. С., Чечурин В. Л. Машинные расчеты электромагнитных полей. — М.: Высш. шк., 1986. — 240 с.
5. Преображенский А. А., Бишард Е. Г. Магнитные материалы и элементы. — М.: Высш. шк., 1986. — 352 с.

Поступила в редакцию 24.06.2006