

# РАСЧЕТ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ

**А. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ**, д-р техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь),  
**В. Р. МАЕВСКИЙ**, канд. техн. наук (ОАО «Азовмаш», г. Мариуполь),  
**С. М. СИДОРЕНКО**, инж. (Приазовский гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

На основе метода вторичных источников разработана методика расчета индукции магнитного поля в зоне между соленоидом с ферромагнитным сердечником, генерирующим продольное магнитное поле, и изделием-пластиной. Расчетным путем установлены оптимальные размеры соленоида применительно к процессу дуговой наплавки проволокой под флюсом в продольном магнитном поле.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, продольное магнитное поле, магнитная индукция, ферромагнитный материал, исследования

Новые возможности для управления геометрическими размерами зоны проплавления при дуговой наплавке сварочной проволокой под флюсом открываются с использованием управляющих продольных магнитных полей (ПРМП) [1–4].

Для процессов дуговой сварки и наплавки в ПРМП обычно применяют устройство ввода магнитного поля (УВМП) в виде соленоида с цилиндрическим ферросердечником, расположенным соосно с электродом [1–5]. При дуговой сварке (наплавке) плавящимся электродом зачастую ферромагнитными являются сварочная проволока, проходящая через отверстие в ферромагнитном сердечнике соленоида, и свариваемое (наплавляемое) изделие. В настоящее время нет методики расчета магнитных полей соленоидов, содержащих ферромагнитные части, что сдерживает поиск оптимальных размеров УВМП для рассматриваемых процессов. Ниже приведена основанная на методе вторичных источников [6] методика расчета компонент индукции ПРМП, генерируемого такими осесимметричными УВМП (рис. 1).

Первичным источником магнитного поля является стационарный ток с плотностью  $j$ , протекающий в объеме катушки  $V_k$ , охватывающей стальной сердечник с объемом  $V_{\phi 1}$ , ограниченный поверхностью  $S_{\phi 1}$ . Вторичными источниками в этом поле служат фиктивные магнитные заряды с объемной  $\rho_{M1}$  и поверхностной  $\sigma_{M1}$  плотностями для стального сердечника и с поверхностной  $\sigma_{M2}$  плотностью для ферромагнитного электрода. Относительную магнитную проницаемость стального сердечника  $\mu_1$  принимали зависящей от координат и напря-

женности магнитного поля в точке, а магнитную проницаемость внутри ферромагнитной проволоки  $\mu_2$  задавали постоянной. Напряженность эквивалентного магнитного поля, выраженная через плотности всех источников, имеет вид [6]

$$\mathbf{H}(Q) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{V_{\phi 1}} \rho_{M1}(M1) \frac{\mathbf{r}_{M1Q}}{r_{M1Q}^3} dV_{M1} + \frac{1}{4\pi\mu_0} \oint_{S_{\phi 1}} \sigma_{M1}(M1) \frac{\mathbf{r}_{M1Q}}{r_{M1Q}^3} dS_{M1} + \frac{1}{4\pi} \int_{V_k} \frac{[j(N), \mathbf{r}_{NQ}]}{r_{NQ}^3} dV_N + \frac{1}{4\pi\mu_0} \oint_{S_{\phi 2}} \sigma_{M2}(M2) \frac{\mathbf{r}_{M2Q}}{r_{M2Q}^3} dS_{M2}. \quad (1)$$

Плотности вторичных источников определялись по соотношениям

$$\rho_{M1}(Q) = -\frac{\mu_0}{\mu_Q} (\mathbf{H}(Q), \text{grad}_Q \mu_1'); \quad (2)$$

$$\sigma_{M1}(Q) = 2\mu_0 \lambda_{M1} (\mathbf{H}(Q), \mathbf{n}_{1Q}); \quad (3)$$

$$\sigma_{M2}(Q) = 2\mu_0 \lambda_{M2} (\mathbf{H}(Q), \mathbf{n}_{2Q}); \quad (4)$$

$$\lambda_{M1} = \frac{\mu_1' - 1}{\mu_1' + 1}; \quad \lambda_{M2} = \frac{\mu_2' - 1}{\mu_2' + 1}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{n}_{1Q}$ ,  $\mathbf{n}_{2Q}$  — единичные нормали соответственно к поверхности стального сердечника и ферромагнитного электрода.

Подставив выражение (1) в соотношения (2)–(4), получим систему трех интегральных уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} &\rho_{M1}(Q) + \int_{V_{\phi 1}} \rho_{M1}(M1) \frac{\mathbf{r}_{M1Q} \nabla \mu_1'}{4\pi\mu(Q)r_{M1Q}^3} dV_{M1} + \oint_{S_{\phi 1}} \sigma_{M1}(M1) \frac{\mathbf{r}_{M1Q} \nabla \mu_1'}{4\pi\mu(Q)r_{M1Q}^3} dS_{M1} + \\ &+ \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{S_{\phi 2}} \sigma_{M2}(M2) \frac{\mathbf{r}_{M2Q} \nabla \mu_1'}{4\pi\mu(Q)r_{M2Q}^3} dS_{M2} = -\mu_0 \int_{V_k} \frac{[j(N), \mathbf{r}_{NQ}] \nabla \mu_1'}{4\pi\mu(Q)r_{NQ}^3} dV_N; \\ &\sigma_{M1}(Q) - \int_{V_{\phi 1}} \rho_{M1}(M1) \frac{\mathbf{r}_{M1Q} \mu_1'}{2\pi r_{M1Q}^3} dV_{M1} - \oint_{S_{\phi 1}} \sigma_{M1}(M1) \lambda_{M1}(Q) \frac{\mathbf{r}_{M1Q} \mu_1'}{2\pi r_{M1Q}^3} dS_{M1} - \\ &- \oint_{S_{\phi 2}} \sigma_{M2}(M2) \lambda_{M1}(Q) \frac{\mathbf{r}_{M2Q} \mu_1'}{2\pi r_{M2Q}^3} dS_{M2} = \frac{\mu_0 \lambda_{M1}(Q)}{2\pi} \int_{V_k} \frac{[j(N), \mathbf{r}_{NQ}]}{r_{NQ}^3} dV_N; \\ &\sigma_{M2}(Q) - \int_{V_{\phi 1}} \rho_{M1}(M1) \lambda_{M2}(Q) \frac{\mathbf{r}_{M1Q} \mu_2'}{4\pi\mu(Q)r_{M1Q}^3} dV_{M1} - \oint_{S_{\phi 1}} \sigma_{M1}(M1) \lambda_{M2}(Q) \frac{\mathbf{r}_{M1Q} \mu_2'}{2\pi r_{M1Q}^3} dS_{M1} - \\ &- \oint_{S_{\phi 2}} \sigma_{M2}(M2) \lambda_{M2}(Q) \frac{\mathbf{r}_{M2Q} \mu_2'}{2\pi r_{M2Q}^3} dS_{M2} = \frac{\mu_0 \lambda_{M2}(Q)}{2\pi} \int_{V_k} \frac{[j(N), \mathbf{r}_{NQ}] \mathbf{n}_{1Q}}{r_{NQ}^3} dV_N. \end{aligned} \right.$$

**Маевский Владимир Рудольфович** — выпускник Ждановского металлург. ин-та 1986 г., инженер ОАО «Азовмаш».

**Сидоренко Сергей Михайлович** — выпускник ПГТУ 1999 г., аспирант кафедры оборудования и технологии сварочного производства.

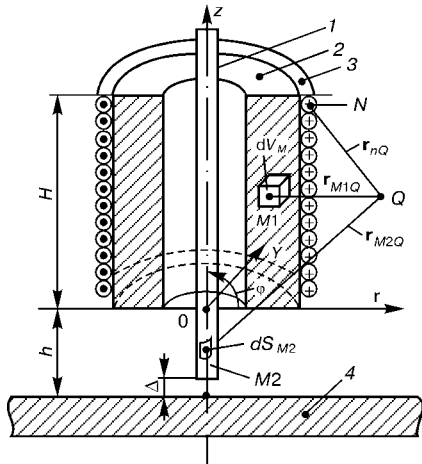


Рис. 1. Схема соленоида, генерирующего ПРМП: 1 — сварочная проволока; 2 — сердечник; 3 — витки катушки (медь); 4 — изделие

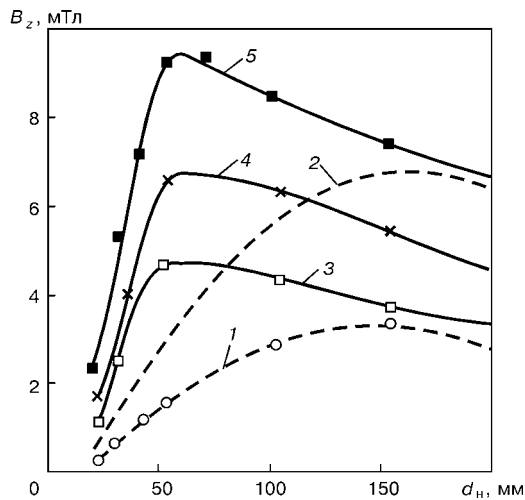


Рис. 2. Зависимость индукции  $B_z$  от диаметра сердечника соленоида  $d_n$ : 1, 2 — сердечник из немагнитного материала (2 — изделие-ферромагнетик); 3–5 — сердечник-ферромагнетик (4 — изделие-ферромагнетик, 5 — сварная проволока-ферромагнетик)

Эту систему интегральных уравнений с учетом условий равенства нулю суммы магнитных зарядов решали методом блочной итерации [6]. Нелинейные свойства стального сердечника учитывали по кри-

вой  $\mu'_1 = \mu'_1(\mathbf{H})$  для данного сорта стали. Сварочную пластину моделировали как не ферромагнитный материал, а также как ферромагнитный с постоянной магнитной проницаемостью. Учет ферромагнитных свойств пластины производился методом зеркального отражения [7].

Все расчеты и эксперименты проведены для соленоидов с количеством витков катушки  $W = 20$  из медного провода диаметром 2,0 мм при пропускании в этой катушке постоянного тока  $I = 42$  А. Ферромагнитный сердечник имел отверстие диаметром  $d_{вн} = 12$  мм. Высота катушки во всех экспериментах, за исключением оговоренных случаев, составляла  $H = 40$  мм, а расстояние от среза сердечника соленоида до изделия  $h = 40$  мм. Использовали сварочную проволоку Св-08А (ферромагнетик) диаметром 5,0 мм, а расстояние от торца проволоки до изделия составляло  $\Delta = 5$  мм (рис.1).

Интерес представлял поиск оптимального наружного диаметра ферромагнитного сердечника  $d_n$ , обеспечивающего максимальное значение продольной компоненты индукции  $B_z$  ПРМП у поверхности ферромагнитного изделия-пластины (в зоне дуги). Расчетные и экспериментальные данные (на всех приведенных ниже графиках линии соответствуют расчетным данным, а значки — экспериментальным) показывают, что для соленоида с ферромагнитным сердечником значение индукции  $B_z$  практически линейно возрастает, если увеличивать  $d_n$  до значений 60 мм, а при дальнейшем его увеличении значения  $B_z$  уменьшаются (кривые 3–5 на рис. 2). Для соленоида без ферромагнитного сердечника компонента индукции  $B_z$  возрастает при увеличении  $d_n$  до 152 мм (кривые 1, 2 на рис. 2). Здесь и ниже следует отметить хорошую сходимость экспериментальных и расчетных данных. Таким образом, применение ферромагнитного сердечника позволяет не только увеличить в 2...3 раза индукцию  $B_z$  у изделия под электродом (при  $d_n \leq 60$  мм), но и уменьшить диаметр соленоида приблизительно в 3 раза, сделав конструкцию УМВП более компактной.

Темп уменьшения компоненты индукции  $B_z$  в направлении от среза сердечника соленоида к изделию меньше при наличии ферромагнитного сердеч-

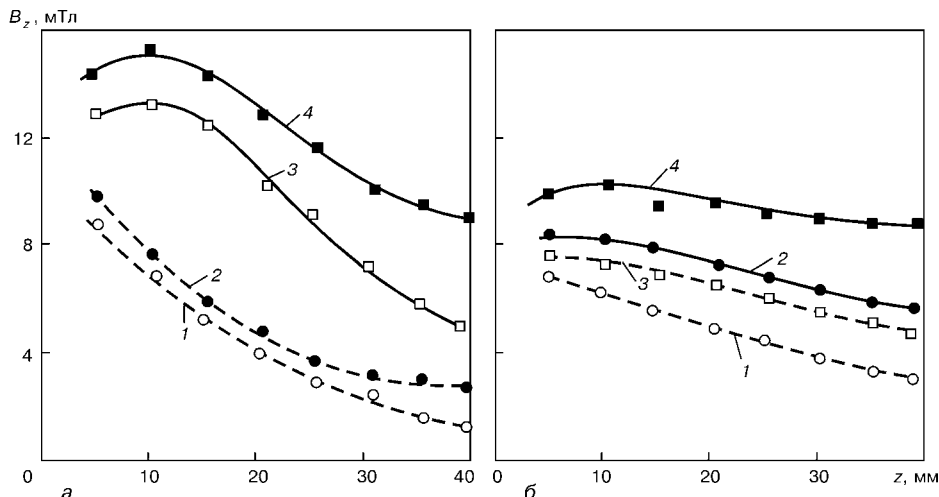


Рис. 3. Распределение индукции  $B_z$  вдоль оси  $Oz$  ( $r = 0$ ) при  $d_n = 50$  (а) и 100 (б) мм: 1, 2 — сердечник из немагнитного материала; 3, 4 — сердечник и сварочная проволока (2, 4 — изделие-ферромагнетик)

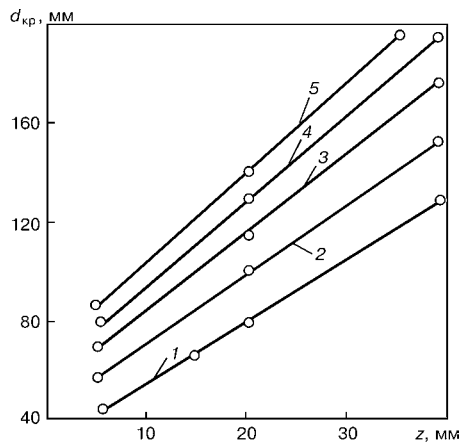


Рис. 4. Зависимость критического диаметра соленоида  $d_{кр}$  от расстояния  $z = h$  ( $r = 0$ ) соответственно при  $H = 20$  (1), 40 (2), 60 (3), 80 (4) и 100 (5) мм

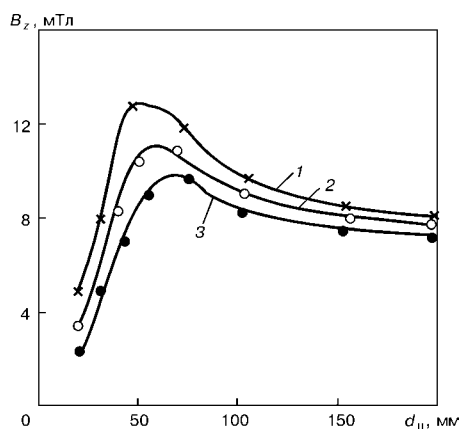


Рис. 5. Зависимость индукции  $B_z$  от диаметра ферромагнитного сердечника соленоида  $d_n$  (изделие и сварочная проволока — ферромагнетики) соответственно при  $H = 20$  (1), 30 (2), 40 (3) мм

ника (кривые 3, 4 и 1, 2 на рис. 3) При увеличении диаметра соленоида компонента индукции  $B_z$  вдоль оси  $Oz$  распределяется более равномерно (кривые 1–4 на рис. 3, а, б). Аналогично (данные не приводятся) и темп спада значений индукции  $B_z$  вдоль радиуса в направлении от оси соленоида уменьшается, если увеличивается диаметр соленоида. Таким образом, магнитное поле становится в этом пространстве более однородным, если увеличивать диаметр соленоида (сердечника).

Для соленоидов без ферромагнитных частей (сердечника и сварочной проволоки) и при отсутствии ферромагнитного изделия можно определить его критический диаметр  $d_{кр}$ , при превышении которого индукция  $B_z$  в определенной точке на его оси не увеличивается, а уменьшается. Расчеты показывают, что при увеличении расстояния вдоль оси  $z$  при  $r = 0$  ( $z = h$  по рис. 1) значения  $d_{кр}$  увеличиваются линейно. При увеличении высоты катушки соленоида  $H$  значения  $d_{кр}$  также возрастают (рис. 4). Аналогичные зависимости имеют место и для соленоидов, содержащих ферромагнитные части, одна-

The procedure for calculation of induction of the magnetic field in the zone between the solenoid with a ferromagnetic core, generating a longitudinal magnetic field, and a workpiece, i.e. the plate, has been developed on the basis of the secondary source method. Optimal dimensions of the solenoid for the process of submerged-arc wire surfacing in the longitudinal magnetic field have been established by the calculations.

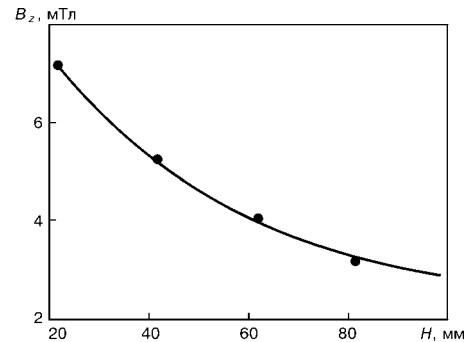


Рис. 6. Зависимость индукции  $B_z$  от высоты катушки соленоида  $H$  ( $d_n = 30$  мм; сварочная проволока и изделие-ферромагнетик)

ко эти зависимости выражены весьма слабо. При наличии в соленоиде ферромагнитных сердечника и проволоки диаметром 5 мм, проходящей через отверстие с  $d_{отв} = 12$  мм в сердечнике, а также ферромагнитной пластины уменьшение расстояния  $z = h$  от 40 до 20 мм приводит к уменьшению критического диаметра  $d_{кр}$  от 60 до 50 мм (рис. 5).

При одной и той же намагничивающей силе катушки  $IW = \text{const}$  уменьшение ее высоты  $H$  позволяет увеличить индукцию  $B_z$  у изделия под электродом (рис. 6). При возрастании диаметра сварочной проволоки компонента индукции  $B_z$  увеличивается. Таким образом, необходимо в разумных пределах уменьшать высоту катушки  $H$  соленоида, а наплавку выполнять при максимальном (по возможности) диаметре сварочной проволоки.

## Выводы

1. Разработанная на основе метода вторичных источников методика расчета магнитных полей, генерируемых соленоидом с ферромагнитными частями, обеспечивает удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных.
2. Выполненные расчетно-экспериментальные исследования позволили рекомендовать оптимальные размеры соленоида применительно к дуговой наплавке в ПРМП сварочной проволокой под флюсом.

1. Болдырев А. М., Биржев В. А., Черных А. В. Управление глубиной проплавления при дуговой сварке и наплавке с помощью продольного переменного магнитного поля // Свароч. пр-во. — 1993. — № 6. — С. 30–31.
2. Размышляев А. Д. Управление геометрическими размерами шва при дуговой сварке и наплавке воздействием магнитных полей // Там же. — 1994. — № 9. — С. 28–31.
3. Размышляев А. Д., Маевский В. Р. Влияние управляющих магнитных полей на геометрические размеры шва при дуговой сварке под флюсом // Там же. — 1996. — № 2. — С. 17–19.
4. Размышляев А. Д. Влияние магнитного поля на размеры зоны проплавления под флюсом // Автомат. сварка. — 1996. — № 8. — С. 25–27, 30.
5. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брисман и др. — Киев: Техника, 1983. — 127 с.
6. Тозони О. В. Метод вторичных источников в электротехнике. — М.: Энергия, 1975. — 296 с.
7. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. — М.: Высш. шк., 1986. — 273 с.

Поступила в редакцию 05.04.2001