

## **Исследование зависимости магнитных свойств материала на основе порошкового железа от его пористости**

О. В. Власова, Л. Н. Ткаченко

*Предложена аналитическая зависимость, позволяющая определять магнитные свойства (основную кривую намагничивания и магнитную проницаемость) с учетом пористости порошкового материала на основе железа.*

### **Введение**

Во многих отраслях промышленности и приборостроении в последние годы широко используют порошковые материалы, в том числе и магнитные. Поэтому важной задачей является установление зависимости магнитных свойств порошкового материала от его остаточной пористости. Известны несколько работ в этом направлении, результаты которых носят общий характер и не позволяют применить их к конкретному материалу [1—3].

Цель представленной работы — анализ и моделирование влияния пористости на магнитные свойства магнитомягкого материала на основе железа.

Важнейшими магнитными свойствами магнитомягких материалов являются основная кривая намагничивания и магнитная проницаемость, зависящие от химического состава материала и его структуры. Основная кривая намагничивания, определяющая связь между напряженностью магнитного поля  $H$  и магнитной индукцией  $B$  в материале (опытном образце), является фундаментальной характеристикой, поскольку на её основе можно установить большинство магнитных свойств материала.

В случае использования изделий, изготовленных из порошковых материалов, следует также учитывать дополнительные факторы, влияющие на их магнитные характеристики. К ним, прежде всего, относится пористость готового изделия, поскольку на поверхности пор возникает размагничивающее поле, которое приводит к снижению прохождения магнитного потока в материале и тем самым способствует уменьшению магнитной индукции и магнитной проницаемости. Кроме того, материал с максимально возможными магнитными характеристиками должен иметь однородную структуру с минимальным содержанием включений и пор [3, 4]. Однако это условие не всегда является определяющим.

### **Экспериментальная часть**

В качестве объекта исследования выбран железный порошок марки ПЖРВЗ.314.28 производства Броварского казенного завода порошковой металлургии. В работе использована технологическая схема, включающая холодное прессование с усилием 200—800 МПа и спекание образцов в водороде при температуре 800 °С. Пористость в материале формировали изменением давления прессования. Полученный материал пористостью 5—30% имеет структуру феррита ( $\alpha$ -Fe) (рис. 1).

© О. В. Власова, Л. Н. Ткаченко, 2009

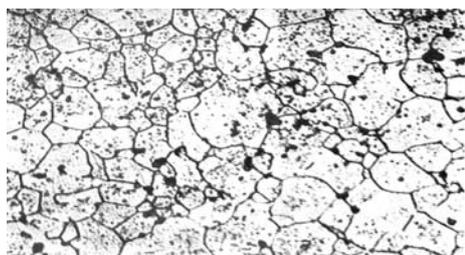


Рис. 1. Микроструктура спеченного порошкового пористого материала на основе железа,  $\times 150$ .

Магнитные характеристики порошковых материалов исследовали в постоянном магнитном поле по стандартной методике на измерительной информационной системе Б5045 на кольцевых образцах в соответствии с требованиями ГОСТ 8. 377-80. Магнитную индукцию в образце определяли, измеряя вольтсекундную площадь импульса напряжения, который находится в измерительной обмотке, при изменении направления намагничивающего тока. Магнитную проницаемость рассчитывали по формуле

$$\mu = \frac{B}{H}, \quad (1)$$

где  $B$  — магнитная индукция, Тл;  $H$  — напряженность магнитного поля, А/м.

### Результаты и их обсуждение

Характер поведения магнитных характеристик образца на основе железа марки ПЖРВ пористостью 5—30% в зависимости от напряженности магнитного поля наглядно виден на графиках (рис. 2, 3), на которых экспериментальные данные представлены в виде точек. Как видно на рисунке, максимальная магнитная индукция в поле напряженностью 2500 А/м изменяется с 0,4 Тл для образцов пористостью 30% до 1,29 Тл при пористости 5%. Аналогично изменяется и магнитная проницаемость.

Далее были построены аналитические зависимости для описания полученных результатов эксперимента, на основе которых можно анализировать и моделировать влияние пористости на магнитные свойства магнитомягкого материала. Использован подход, применяемый авторами при исследовании влияния легирования материала на его магнитные свойства [5].

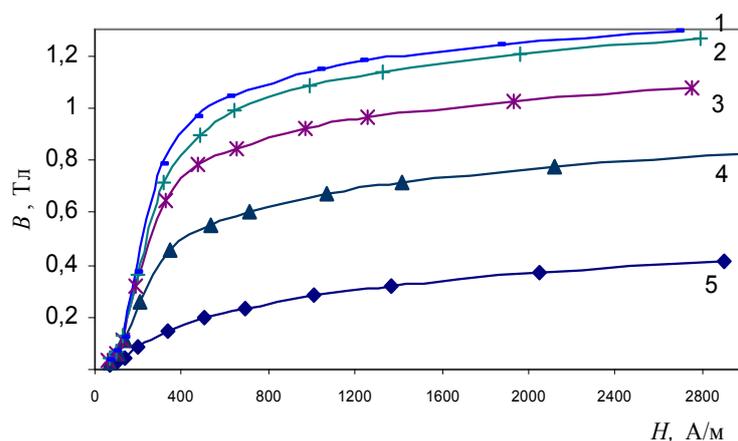


Рис. 2. Зависимость магнитной индукции спеченного порошкового материала на основе железа от напряженности магнитного поля и пористости (%) образца: 1 — 8,4; 2 — 9; 3 — 12,5; 4 — 19; 5 — 30.

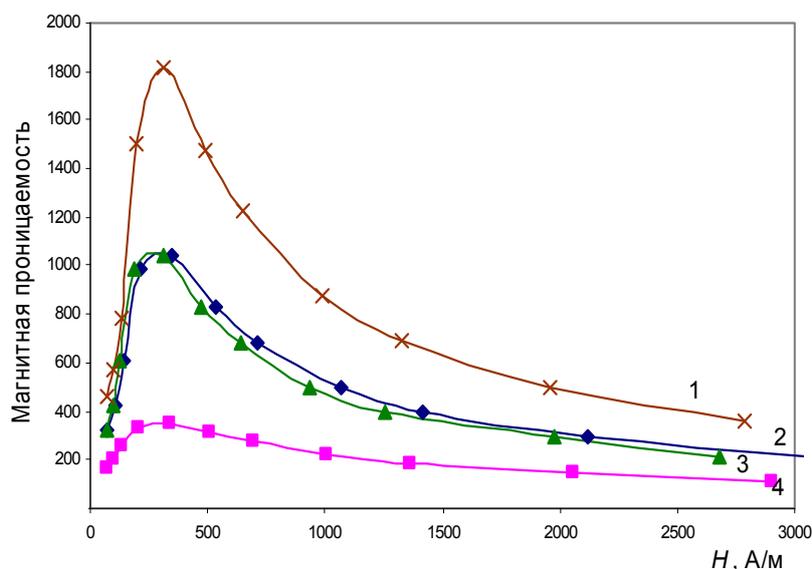


Рис. 3. Зависимость магнитной проницаемости спеченного порошкового материала основе железа от напряженности магнитного поля и пористости (%) образца: 1 — 8,4; 2 — 12,5; 3 — 19; 4 — 30.

При получении аналитических зависимостей множества кривых намагничивания (рис. 2) вначале определяли вид функции для описания любой из приведенных кривых. Из существующих подходов для этой цели выбрано следующее аналитическое выражение:

$$B = K_1 \operatorname{arctg} ((K_2(H - 70))), \quad (2)$$

в котором коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  учитывают изменение пористости в диапазоне 5—30%.

Таким образом, получены коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  для каждой из приведенных кривых. Затем выбраны аналитические функции для описания каждого из этих коэффициентов как функций пористости  $\theta$ :

$$K_1 = 1,17 (1 - 2\theta)(1 - \theta^{0,8}); \quad (3)$$

$$K_2 = 0,0062 - 0,015\theta. \quad (4)$$

Уточненные значения коэффициентов в аналитических выражениях (2)—(4) получены путем минимизации целевой функции

$$\Phi = \min \sum_{s=1}^N (B_i - B_p)^2 \quad (5)$$

в пространстве пяти переменных — коэффициентов в выражениях (3) и (4).

В целевой функции (5) использовали экспериментальные значения магнитной индукции  $B_i$  ( $i = 1, \dots, N$ , где  $N$  — суммарное количество экспериментальных значений для всех кривых намагничивания). Расчетное значение магнитной индукции  $B_p$  определяли по выражению (2).

Графики полученных таким образом аналитических зависимостей основных кривых намагничивания приведены на рис. 2 сплошной линией.

Аналитическое выражение для описания изменения максимальной магнитной проницаемости в зависимости от пористости (рис. 3) получено по той же методике, что и выражения (3) и (4), и имеет вид

$$\mu_{\max} = 2600 (1 - 2,5\theta) (1 - \theta^{0,9}). \quad (6)$$

## Выводы

Магнитные свойства порошкового материала зависят не только от химического состава, но и от его пористости. Так, уменьшение пористости с 5 до 12% приводит к снижению магнитной индукции в 3 раза и магнитной проницаемости с 2500 до 300.

Полученные аналитические зависимости достаточно полно описывают поведение магнитомягкого порошкового материала на основе железа в постоянном магнитном поле и могут быть использованы для прогнозирования магнитных свойств магнитопроводов разной пористости.

1. Поляков В. В., Егоров А. В. Магнитная проницаемость пористых магнитно-мягких металлов // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1994. — № 2. — С. 36—37.
  2. Поляков В. В., Егоров А. В. Начальная магнитная восприимчивость пористых ферромагнитных материалов // Физика металлов и материаловедение. — 1993. — 76, вып. 1. — С. 172—174.
  3. Хек К. Магнитные материалы и их техническое применение. — М.: Энергия, 1973. — 299 с.
  4. Спеченные материалы для электротехники и электроники: (Справ.) / Под ред. Г. Г. Гнесина и др. — М.: Металлургия, 1981. — 344 с.
- Ткаченко Л. Н., Власова О. В. Экспериментально-аналитическая модель магнитных свойств материала на основе порошкового сплава марки 79НМ // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2005. — № 7. — С. 67—71.