

К. А. АЛІНХАՅԱՆ, ՅՈՒ Կ. ԱՐՄԵՅՅԱՆ, Վ. Ի. ՇԻՏԵՅՅԱՆ, Մ. Գ. ԲԱԲԱՅԱՆ

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗОФОСФОРНЫХ СПЕЧЕННЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В последние годы сформированы технико-экономические предпосылки применения спеченных материалов при изготовлении магнитопроводов электрических машин [1]. В этих условиях определяющими являются их электромагнитные свойства, которые определяются следующими факторами: химическим и гранулометрическим составом порошка, формой частиц, температурой, продолжительностью и средой спекания, плотностью изделия, размером и распределением пор, гомогенностью структуры и др. Известны исследования, которые можно отнести к однофакторному эксперименту и в которых определялось влияние того или иного фактора на свойства железофосфорных сплавов [2].

В настоящей работе изучено влияние совокупности различных факторов на некоторые свойства спеченных железофосфорных сплавов, содержащих до 1% Р. В качестве сырья использовали железный порошок марки ПЖ2М2 и феррофосфорную лигатуру производства Броварского завода порошковой металлургии. Для решения задачи оптимизации характеристики сплава использовался метод факторного планирования экстремального эксперимента.

Состав факторов, их уровни и интервалы варьирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни факторов и интервалы варьирования

| Обозначения | Факторы | Уровни факторов | | | Интервал варьир. |
|-------------|--------------------------------|-----------------|------|------|------------------|
| | | -1 | 0 | +1 | |
| A | Содержание железа, % | 99 | 99,5 | 100 | 0,5 |
| D | Пористость, % | 10 | 15 | 20 | 6 |
| E | Гранулометрический состав, мкм | 50 | 100 | 150 | 50 |
| M | Температура спекания, °С | 1100 | 1150 | 1200 | 50 |
| N | Время спекания, ч | 2 | 4 | 6 | 2 |

В данной задаче, исходя из анализа электромагнитных параметров двигателя [3], в качестве параметра оптимизации принята величина магнитной индукции. Учитывая, что в общем случае к материалу предъявляются требования по уровню индукции и удельных потерь, построены также математические модели для параметра удельных потерь. Магнитная индукция и удельные потери материалов определены

на кольцевых образцах, а удельное электрическое сопротивление — на образцах по форме прямоугольного стержня. В процессе исследования реализован дробный факторный эксперимент типа 2^{5-2} (табл. 2). В план эксперимента со сплавом железо-фосфор введено содержание железа, а не легирующего элемента, для обеспечения удобства математической обработки.

Таблица 2

Матрица планирования и значения параметра оптимизации

| № опыта | A D E M N | Инд., ТЛ при напряжении поля, А/м | | Удельные потери, Вт/кг | |
|---------|-----------|-----------------------------------|--------|------------------------|---------------|
| | | 2500 | 5000 | $P_{0,5/50}$ | $P_{0,75/50}$ |
| 1 | — — — — — | 0,825 | 1,055 | 11 | 35 |
| 2 | — — + — + | 0,8625 | 1,0816 | 10 | 31 |
| 3 | — + — + — | 0,9616 | 1,0375 | 9 | 28 |
| 4 | — + + + + | 0,915 | 1,105 | 8,3 | 25,3 |
| 5 | + — — + + | 0,4416 | 1,02 | 14 | 46,6 |
| 6 | + — + + — | 0,7216 | 0,96 | 13,3 | 42 |
| 7 | + + — — + | 0,72 | 0,8533 | 14,6 | 47 |
| 8 | + + + — — | 0,7033 | 0,93 | 16 | 56 |

Для установления вида связи между параметрами оптимизации и определяющими его факторами в выбранных интервалах варьирования принимается следующая модель:

$$B = C_0 \cdot A^{z_1} \cdot D^{z_2} \cdot E^{z_3} \cdot M^{z_4} \cdot N^{z_5}, \quad (1)$$

которая в регрессивной форме имеет вид:

$$y = \ln B = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + \varepsilon_{\text{ош}}, \quad (2)$$

где $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ — коэффициенты регрессии, которые рассчитываются по формуле

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij} \cdot y_i}{n}, \quad (3)$$

$j = 0, 1, \dots, 5$ — номер фактора (ноль записан для вычисления b_0); $\varepsilon_{\text{ош}}$ — ошибка от взаимодействия и эксперимента; x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 — полиномы, которые определяются по формуле Бокса:

$$x_j = \frac{2(\ln T_j - \ln T_{\text{max}})}{\ln T_{\text{max}} - \ln T_{\text{min}}} + 1, \quad (4)$$

где $T_j, T_{\text{max}}, T_{\text{min}}$ — среднее, максимальное и минимальное значения исследуемого фактора.

Решая уравнение (4) по данным табл. 1 и определяя значение коэффициентов регрессии b_0, b_1, \dots, b_5 на основе эксперимента, с учетом данных табл. 2 получаем:

$$B_{(5000)} = I^{51,56} \cdot A^{-0,72} \cdot D^{-0,042} \cdot E^{0,052} \cdot M^{0,344} \cdot N^{-0,067}$$

$$P_{0,75/50} = I^{-200,43} \cdot A^{-47,66} \cdot D^{-0,046} \cdot E^{-0,003} \cdot M^{-2,000} \cdot N^{-0,067}$$

Для проверки значимости коэффициентов и адекватности модели проведен дисперсионный анализ по методу суммы квадратов с проверкой гипотез по таблицам распределения Стьюдента. Анализ показал, что $F_{\text{рас.}} < F_{1,10, \alpha}$ при 3% значимости. Для оценки воспроизводимости проведены параллельные опыты, в которых объем выборки принимался не менее трех.

Оптимальные параметры индукции и удельных потерь определены линейным программированием с учетом ограничения варьирования параметров в пределах заданного интервала, согласно табл. 1 (-1, +1) по неравенству, которое имеет вид, например, для индукции при напряженности 5000 А/м:

$$y = \ln B = 51,56 - 0,72 \ln A - 0,042 \ln D + 0,052 \ln E - 0,344 \ln M + 0,035 \ln N \geq \ln 11050.$$

Результаты оптимизации параметров, проведенной на ЭВМ, представлены в табл. 3, а рекомендуемые характеристики материалов — в табл. 4.

Таблица 3

| Параметры оптимизации | Ф а к т о р ы | | | | |
|---------------------------------------|---------------|----|-----|------|---|
| | A | D | E | M | N |
| $B_{\text{max}} = 1,12 \text{ Тл}$ | 99 | 10 | 100 | 1200 | 6 |
| $P_{\text{min}} = 25,1 \text{ Вт/кг}$ | 99 | 20 | 100 | 1200 | 6 |

Таблица 4

| Материал | Плотность, г/см ³ | Частота поля, Гц | Магн. инд., Тл при напряжении магнитного поля, А/м | | Удельные потери, Вт/кг $P_{0,75/50}$ | Удельное электросопротивление, $10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ | μ_r , МПа | ν , % | НВ, МПа |
|----------|------------------------------|------------------|--|--------------|---|--|---------------|-----------|---------|
| | | | 2500 | 5000 | | | | | |
| Fe | 6,45 | 0 50 | 1,15 0,74 | 1,22 1,02 | 42 | 0,225 | 100 | 2,8 | 550 |
| Fe-P | 6,32 | 0 50 | 1,03 0,91 | 1,11 1,08 | 25 | 0,45 | 180 | 1 | 820 |

Введение в железо фосфора до 1% увеличивает индукцию на 7%, электросопротивление на 100%, удельные потери уменьшаются в 1,6

раза, а механические свойства удовлетворяют требованиям магнитопроводов по условиям прочности. С увеличением напряженности магнитного поля значимость влияния факторов, в особенности содержание легирующего элемента и пористость, на параметр оптимизации сказывается меньше, что можно объяснить насыщением железа.

Կ. Ա. ԱՐԻԱՆՅԱՆ, ՅՈՒ. Կ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Վ. Ի. ՉԲՁՅԱՆ, Մ. Գ. ԲԱԲԱՅԱՆ

ԵՐԿԱԹԱՅՈՒՑՈՐԱՅԻՆ ԵՌԱԿԱԼՎԱԾ ՀԱՄԱՉՈՒՎԱԾՔՆԵՐԻ ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԵՎ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ ՓՈՐՉԻ ՊՂԱՆԱՎՈՐՄԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ

Ա մ փ ո փ ո Վ մ

Որոշված և փորձարկված են մագնիսական և մեխանիկական եռակալված համաձուլվածքների հատկությունների կախվածությունը նյութի կազմից և տեխնոլոգիական պրոցեսի հիմնական պարամետրերից: Գործոնների օպտիմալ արժեքների դեպքում FeP եռակալված համաձուլվածքը բնութագրվում է հետևյալ կերպ՝ $B_{(5000)} = 1,1 \text{ Տլ}$, $P_{(2500)} = 25 \text{ Վտ/կգ}$:

Մինչև 1% ֆոսֆորի ներմուծումը ինդուկցիան մեծացնում է 7%-ով, էլեկտրական դիմադրությունը՝ 100%-ով, տեսակարար կորուստները փոքրացնում 1,6 անգամ, իսկ մեխանիկական հատկությունները բավարարում են մագնիսական շարերին ներկայացնող ածրության պահանջներին:

Շոգվածում բերված տվյալները գործնական նշանակություն ունեն էլեկտրական մեքենաների նախագծման և ուսումնասիրման համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

- 1 Прогресс в области производства электрометаллокерамических материалов и изделий / А. Б. Альтман, П. П. Гладышев, И. П. Милащенко и др. // Электротехническая промышленность.— Сер. Электротехнические материалы.— 1977.— Вып. 10.— С. 6—10.
- 2 Панасюк О. А., Радомиельский Н. Д. Влияние добавок фосфора на магнитные свойства изделий из железного порошка. Исследование в переменных полях // Порошковая металлургия.— 1973.— № 4.— С. 28—32.
- 3 Технология изготовления спеченного сердечника ротора асинхронного короткозамкнутого электродвигателя / Н. В. Манукян, Ю. К. Арутюнян, М. Г. Бабалян и др. // Электротехническая промышленность.— Сер. Технология электротехнического производства.— 1977.— № 4.— С. 11—13.