

УДК 621.762:620.22

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ Fe – P МЕТОДАМИ СТАТИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ¹

© А. Ю. Кем², В. В. Китаев³*Статья поступила 20 октября 2015 г.*

При производстве магнитопроводов и полюсов электромагнитов, работающих в средних и сильных постоянных магнитных полях, перспективно использовать методы порошковой металлургии (ПМ). Они позволяют значительно повысить эффективность производства магнитопроводов электрических машин из магнитомягких порошковых материалов (ММПМ). Одна из проблем оценки качества ММПМ — отсутствие надежной методики измерения магнитных свойств материалов, полученных с помощью ПМ-технологий. Предложена методика измерения основной кривой намагничивания $B(H)$, петли магнитного гистерезиса, а также магнитных параметров порошковых образцов (начальной $\mu_{\text{нач}}$ и максимальной μ_{max} магнитных проницаемостей, остаточной магнитной индукции B_r , коэрцитивной силы по индукции $H_{\text{св}}$), отличающаяся оперативностью отслеживания многоступенчатых изменений магнитного потока с использованием электронного микроверметра Ф-191. При определении коэрцитивной силы $H_{\text{св}}$ использовали результаты экстраполяции зависимости ширины петли гистерезиса кольцевых образцов от величины максимального намагничивающего поля. Для этого измерения проводили при последовательно увеличивающемся намагничивающем поле. Методика апробирована, выявлены особенности формирования магнитных свойств ММПМ системы Fe – P, обусловленные предысторией их получения, влияющей на пористость (дефектность) структуры.

Ключевые слова: порошковая металлургия; магнитомягкий; методика измерений; магнитные свойства; петля гистерезиса; магнитная проницаемость; магнитная индукция; коэрцитивная сила; дефектность структуры; пористость.

Технически чистое железо применяют в качестве магнитомягкого материала, поскольку оно сочетает низкую коэрцитивную силу и высокую магнитную проницаемость с хорошей пластичностью [1]. Вместе с тем экономичность производства, например, магнитопроводов и полюсов электромагнитов, работающих в средних и сильных постоянных магнитных полях, можно значительно повысить, если использовать магнитомягкие порошковые материалы (ММПМ), в том числе и системы Fe – P, характеризующейся тем, что фосфор, способствуя росту зерна, повышает электромагнитные свойства, и соответственно метод порошковой металлургии (ПМ) [2, 3]. Однако одна из проблем оценки качества ММПМ — отсутствие надежной методики измерения их магнитных характеристик [4].

Цель работы — разработка методики измерений основной кривой намагничивания $B(H)$, характеристик петель магнитного гистерезиса и магнитных параметров порошковых материалов: начальной $\mu_{\text{нач}}$ и максимальной μ_{max} магнитных проницаемостей, остаточной магнитной индукции B_r , коэрцитивной силы по индукции $H_{\text{св}}$.

Предложенная методика в целом близка к рекомендациям для баллистических магнитных измерений на кольцевых образцах [5, 6]. Отличия связаны с особенностями аппаратной реализации, в первую очередь с возможностью оперативного отслеживания многоступенчатых изменений магнитного потока с помощью электронного микроверметра Ф-191. Кроме того, при определении коэрцитивной силы $H_{\text{св}}$ использовали результаты экстраполяции зависимости ширины петли гистерезиса кольцевых образцов от величины максимального намагничивающего поля. Для этого измерения петли проводили при последовательно увеличивающемся намагничивающем поле (~200 – 2500 А/м).

Принципиальная схема установки измерения магнитных параметров кольцевых образцов приведена на рис. 1.

В качестве измерителя магнитного потока Φ использовали электронный микроверметр Ф-191 (диапазон — 50 – 25 000 мкВб, погрешность измерений — 0,5 %; коррекция дрейфа нуля). Стабилизированные блоки питания Б5-71 (напряжение — 0 – 30 В, постоянный ток — 0,02 – 10 А) или НУ 3005 (напряжение — 0 – 30 В, постоянный ток — 0 – 4,4 А), один из которых резервный, — источники намагничивающего и размагничивающего токов, совмещенные с устройствами регулировки и измерения тока. Штриховые линии — положение проводов намагничивающей цепи,

¹ Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, проект № 3.1137.2014К.

² Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия; e-mail: akem@donstu.edu.ru

³ Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия; e-mail: ktv2001@mail.ru

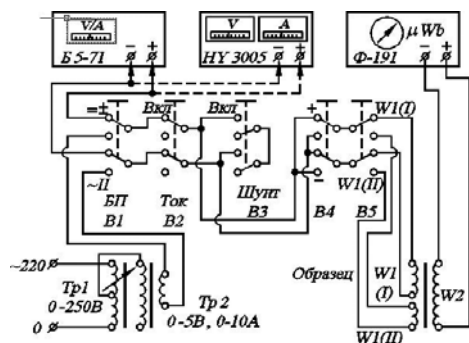


Рис. 1. Принципиальная схема установки для измерения магнитных параметров кольцевых образцов

которые вручную подсоединяли либо к клеммам *B5-71*, либо *HY 3005*. Системы стабилизации тока и напряжения блоков питания имели возможность грубой и тонкой регулировки. Оба источника оборудованы встроенными цифровыми амперметрами постоянного тока *A1, A2* (дискретность — 0,01 А).

Исследовали порошковые кольцевые образцы с различной пред историей получения (образцы 1 – 4). В качестве контрольного (образец 5) использовали образец из сплава 50Н (пермаллой) [7].

Размагничивание образцов проводили как на постоянном, так и на переменном токе. В последнем случае использовали низковольтный трансформатор *Tr1*, первичная обмотка которого была запитана от автотрансформатора *Tr2*. Это позволяло плавно регулировать ток вторичной обмотки (от 5 А до 0), измеряя его амперметром переменного тока *A3*.

Переключатели служили: *B1* — для подключения намагничивающего источника постоянного или размагничивающего источника переменного тока; *B2, B4* — для полного отключения (либо включения) и изменения полярности тока в намагничивающей обмотке образца; *B5* — для изменения числа витков *w1* в первичной намагничивающей обмотке образца (для порошковых образцов — $w1(I) = 20$, для пермаллоя — $w1(2) = 1$).

Переключатель *B3*, обычно отсутствующий в подобных установках, применяли для подключения и отключения шунта (на рис. 1 не показан), закорачивающего цепь источников питания. Необходимость *B3* обусловлена тем, что использовавшиеся источники питания *B5-71* и *HY 3005* при разомкнутой цепи нагрузки работают в режиме стабилизации напряжения, а при замкнутой — в зависимости от величины установленных значений *U* и *I* либо в режиме стабилизации напряжения, либо тока. В нашем случае при подключенной намагничивающей обмотке образца источники работали в режиме стабилизации тока. Однако при изменении направления тока могли наблюдаться скачки в его значениях, изменяющие магнитное состояние образцов и обусловленные кратковременным разрывом цепи нагрузки источника при перекоммутации. Чтобы этого избежать, направление тока в намаг-

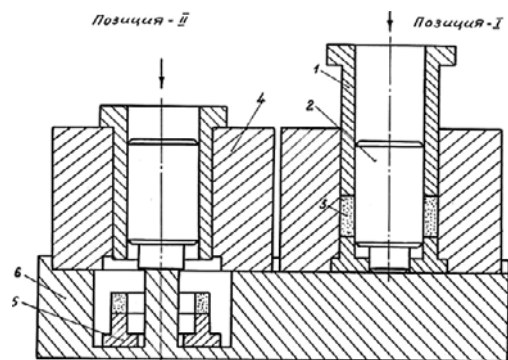


Рис. 2. Пресс-форма для изготовления кольцевых образцов методом ГОШ

ничивающей обмотке меняли следующим образом: сначала переключателем *B3* включали шунт, затем переключателем *B4* переключали направление тока и переключателем *B3* отключали шунт.

Образцы для исследований готовили способом горячей объемной штамповки (ГОШ) пористых порошковых заготовок, широко применяемым при производстве материалов высокой плотности [8]. Использовали следующие технологические схемы: холодное прессование + спекание (образец 1); холодное прессование + горячая объемная штамповка (образец 2); холодное прессование + горячая штамповка + отжиг (образец 3); холодное прессование + спекание + горячая штамповка + отжиг (образец 4). Исходным материалом служил легированный порошок системы Fe – Р марки PASC60 (Швеция). Химический состав образцов, %: фосфор — 0,59–0,66; углерод — 0,04–0,05; кислород — 0,1–0,14; железо и примеси — остальное.

Устройство подкладной пресс-формы для получения кольцевых образцов методом ГОШ представлено на рис. 2 [4]. Принцип ее работы следующий: в позиции *I* в собранную пресс-форму закладывают нагретую пористую порошковую заготовку, вставляют пуансон *1* и уплотняют образец. При движении бабы вверх форму перемещают до упора на подставке *б* (позиция *II*), вторым ударом бабы снимают кольцо *3* с иглы *2*. При сборке пресс-формы вставку с иглой помещают в матрицу *4* и форму устанавливают в первоначальном положении (позиция *I*).

Для повышения механической прочности образцов при прессовании отношение наружного и внутреннего диаметров составляло 1,4 (рекомендуемое 1,3 [5]).

Каждый образец измеряли в трех точках, затем вычисляли средний диаметр ($D \approx 0,03$ м) и сечение ($s \approx 25 \cdot 10^{-6}$ м²). Для предохранения измерительной обмотки от повреждения на образец с противоположных сторон накладывали обкладки из картона. Кольцо обматывали тонкой лакотканью в два слоя, поверх которой по всей длине проводом ПЭШО-0,28 наматывали вторичную измерительную обмотку (число

витков $w_2 = 100$). Обмотку в один слой покрывали лакотканью и поверх нее проводом ПЭВ-1,10 наматывали намагничивающую обмотку (число витков $w_1 = 20$).

Величина намагничивающего поля связана с протекающим по намагничивающей обмотке током соотношением:

$$H = nI = w_1 I / (\pi D), \quad (1)$$

где n — число витков на 1 м длины намагничивающей обмотки; D — средний диаметр кольца; I — сила тока. При $w_1 = 20$ и $D \approx 0,03$ м $H \approx 212,2I$ А/м. То есть для применяемых источников питания ($I_{\max} = 10$ А для Б5-71) максимальное намагничивающее поле $H_{\max} \approx 2120$ А/м, и при минимальной дискретности изменения тока $\Delta I_{\min} = 0,01$ А менять поле можно с шагом 2 А/м.

Изменение магнитного потока $\Delta\Phi$, регистрируемое микроверберметром со вторичной обмотки, выражается соотношением:

$$\Delta\Phi = 10^6 w_2 \Delta B_s. \quad (2)$$

При $w_2 = 100$, поперечном сечении $s \approx 25 \cdot 10^{-6}$ м² и $\Delta B = 2B_{\max} \approx 3$ Тл изменение магнитного потока $\Delta\Phi \approx 7500$ мкВб, что позволяло минимизировать влияние дрейфа нуля микроверберметра на результат измерений.

Погрешность измерения $\Delta\Phi$ не превышала ± 50 мкВб ($\pm 1 - 2\%$ его максимального изменения). Итоговая суммарная погрешность измерения абсолютных значений индукции B составила около $\pm 5\%$ (с учетом погрешностей измерения линейных размеров и площади сечения образца — около ± 2 и $\pm 3\%$, а также возможной ошибки намотки w_2 — $\pm 1\%$). Погрешности же измерения относительных изменений индукции существенно ниже, так как они определяются погрешностью микроверберметра (включая точность отсчета показаний и дрейф нуля).

Магнитные характеристики определяли следующим образом. Сначала путем перемагничивания плавно уменьшаемым до 0 постоянным током намагничивающей обмотки [5] образцы размагничивали. [Размагничивание возможно также переменным током от $Tr1$ (см. рис. 1) плавным повышением с помощью $Tr2$ тока намагничивающей обмотки (от 0 до 5 А) и последующим снижением его до 0 в течение не менее 40 с.]

После размагничивания для намеченных значений H_{\max} ($\sim 200 - 2500$ А/м), начиная с меньших, рассчитывали требуемую величину I_{\max} и измеряли $B_{\max}(I_{\max})$, $B_r(I_{\max})$ и полуширину петли гистерезиса $H_c(I_{\max})$. Затем размагничивание повторяли и, начиная с малых токов, определяли параметры основной кривой намагничивания материала, по которым рассчитывали начальную $\mu_{\text{нач}}$ и максимальную μ_{max} магнитные проницаемости.

Для выбранных H_{\max} (а значит, I_{\max}) определяли измерения магнитного потока $\Delta\Phi_{\max}(I_{\max})$, связанные с $\Phi_{\max}(I_{\max})$ и $B_{\max}(I_{\max})$ соотношением:

$$\Delta\Phi_{\max}(I_{\max}) = 2\Phi_{\max}(I_{\max}) = 2w_2 s B_{\max}(I_{\max}). \quad (3)$$

Далее измеряли изменения потока, потоки и значения индукции $B_r(I_{\max})$, соответствующие пересечениям петли гистерезиса для данного $H_{\max}(I_{\max})$ с осью ($I = 0$, т.е. $H = 0$). Для предельной петли гистерезиса (наибольшей по площади) полученное B_r соответствует остаточной индукции. По данным не менее трех измерений рассчитывали средние значения остаточного потока $\Phi_r(I_{\max})$ и остаточной индукции $B_r(I_{\max})$. Аналогично выражению (3) имеем:

$$\Delta\Phi_r(I_{\max}) = 2\Phi_r(I_{\max}) = 2w_2 s B_r(I_{\max}). \quad (4)$$

Параметры петли гистерезиса для данного I_{\max} измеряли, опираясь на значение $B_r(I_{\max})$. Последовательно увеличивая размагничивающий ток, для каждого текущего значения I_k в серии из K измерений фиксировали показания микроверберметра $\Delta\Phi(I_k, I_{\max})$. По истечении нескольких минут серию на каком-либо значении тока I_k прерывали, замыкая магнитный цикл. Например, так:

$$I_k \rightarrow -I_{\max} \rightarrow 0 \rightarrow +I_{\max} \rightarrow 0$$

(если серия прервана во 2-м ($B > 0$, $H < 0$) или 3-м ($B < 0$, $H < 0$) квадрантах до выхода на $-I_{\max}$);

$$I_k \rightarrow 0 \rightarrow +I_{\max} \rightarrow 0$$

(если серия прервана в 3-м квадранте после достижения $-I_{\max}$).

После замыкания магнитного цикла показания на дрейф корректировали:

$$\Delta\Phi(I_k, I_{\max})_{\text{ист}} = \Delta\Phi(I_k, I_{\max}) - (k-1)\Delta\Phi_0/K, \quad (5)$$

где $k = 1 \dots K$.

Индукцию и магнитный поток в образце рассчитывали по формулам:

$$B(I_k, I_{\max}) = \Phi(I_k, I_{\max}) / (10^6 w_2 s), \quad (6)$$

$$\Phi(I_k, I_{\max}) = \Phi_r(I_{\max}) - \Delta\Phi(I_k, I_{\max})_{\text{ист}}. \quad (7)$$

Аналогичным образом серии измерений повторяли до прохождения всей петли. Преимущества данного алгоритма: отсутствие влияния нестабильности намагничивающего тока на установку корректора нуля микроверберметра, меньший нагрев намагничивающей обмотки образца, простота замены источников питания либо намагничивающих обмоток без искажения магнитного цикла.

Затем определяли параметры основной кривой намагничивания. Перед этим образец размагничивали. Учитывая, что кривая — геометрическое место точек для вершин частных петель гистерезиса, $B(H)$ измеряли аналогично $B_{\max}(I_{\max})$ при последовательном увеличении I_{\max} (от 0 до предельного значения). $H(I)$

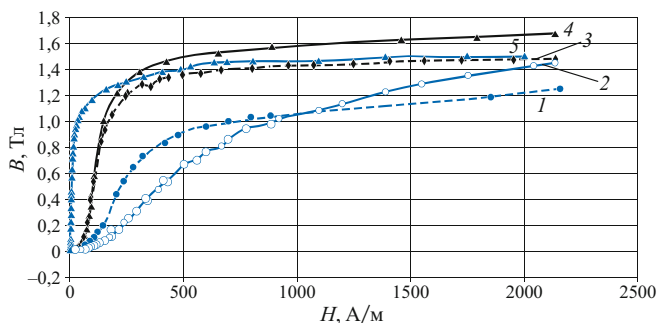


Рис. 3. Основные кривые намагничивания

рассчитывали по соотношению (1), а $B(I)$ — по выражению

$$B(I) = \Delta\Phi(I)/(2w2s). \quad (8)$$

Относительную магнитную проницаемость μ рассчитывали по соотношению

$$\mu(H) = B(H)/(\mu_0 H), \quad (9)$$

где $\mu_0 = 1,2567 \cdot 10^{-6}$ Гн/м = $1,2567 \cdot 10^{-6}$ Тл · м/А — магнитная постоянная.

Далее определяли максимальную проницаемость μ_{\max} и соответствующую ей напряженность магнитного поля. Величину $\mu_{\text{нач}}$ находили графически из экстраполяции $\mu(H)$ к $H = 0$.

При определении параметров основной кривой размагничивания микроверметр устанавливали в «0» при размагниченном образце и нулевом намагничивающем токе. Величину магнитного потока в образце $B(I)$ прямо отсчитывали по прибору. То есть имеем:

$$B(I) = \Delta\Phi(I)/(w2s). \quad (10)$$

Такой способ измерения зависимости $B(H)$ значительно быстрее, но имеет существенный недостаток — в нем практически невозможно корректно оценить вклад дрейфа нуля микроверметра в получен-

ный результат. Поэтому его применяли только как оценочный и всегда проверяли по прохождению полученной основной кривой намагничивания через вершины частных петель гистерезиса.

Полную петлю гистерезиса строили отдельными фрагментами с завершением замкнутого магнитного цикла и фиксации дрейфа нуля Ф-191 после прохождения каждого квадранта. После введения поправки на дрейф в полученные данные серии измерений для отдельных фрагментов петли группировали в общие для каждого образца зависимости индукции от намагничивающего поля. Такие сводные результаты измерений частных петель гистерезиса для трех максимальных значений магнитного поля и параметров основных кривых намагниченности и магнитной проницаемости использовали для построения графиков.

Основные кривые намагничивания исследованных образцов (1 – 5) приведены на рис. 3, а результаты обработки экспериментальных данных представлены в таблице.

Для всех исследованных образцов величина магнитной проницаемости достигает максимума при напряженности поля, примерно в 1,5 раза превышающей коэрцитивную силу материала и соответствующей началу области насыщения. Магнитные параметры материала 50Н (образец 5) в целом вполне соответствуют ожидаемым значениям [7].

Как следует из полученных данных, уровень магнитных характеристик образцов спеченных порошковых материалов системы Fe – P в значительной степени определяется предысторией их получения. Так, образец 1 характеризуется относительно невысокой магнитной проницаемостью и максимальной индукцией. У образца 2 (штамповка без последующего отжига) величина индукции из-за уменьшения пористости возрастает, максимальная магнитная проницаемость снижается (до 1050), а коэрцитивная сила резко возрастает свыше 300 А/м, что связано с особенностями структуры (Fe – P)-порошковых материалов. В то же

Магнитные параметры исследованных образцов

Параметр	Напряженность поля H , А/м	Образец				
		1	2	3	4	5 (50Н)
Магнитная индукция B , Тл, не менее	200	0,43	0,16	1,08	1,20	1,27
	300	0,70	0,32	1,24	1,35	1,35
	500	0,91	0,63	1,36	1,47	1,43
	1000	1,06	1,04	1,44	1,57	1,48
	2200	1,25	1,47	1,48	1,69	1,50
	2500	~1,29	~1,54	1,50	~1,72	1,50
	5000	—	—	—	—	—
	10 000	—	—	—	—	—
30 000	—	—	—	—	—	
Индукция техн. насыщения B_s , Тл, не менее		—	—	—	—	1,50
Коэрцитивная сила H_c , А/м		165	315	100	103	5,0
Начальная магнитная проницаемость $\mu_{\text{нач}}$, не менее		350	250	600	600	2000 – 4000
Максимальная магнитная проницаемость μ_{max} , не менее		1850	1050	4900	5400	61000
		($H = 250$ А/м)	($H = 500$ А/м)	($H = 150$ А/м)	($H = 150$ А/м)	($H = 7$ А/м)

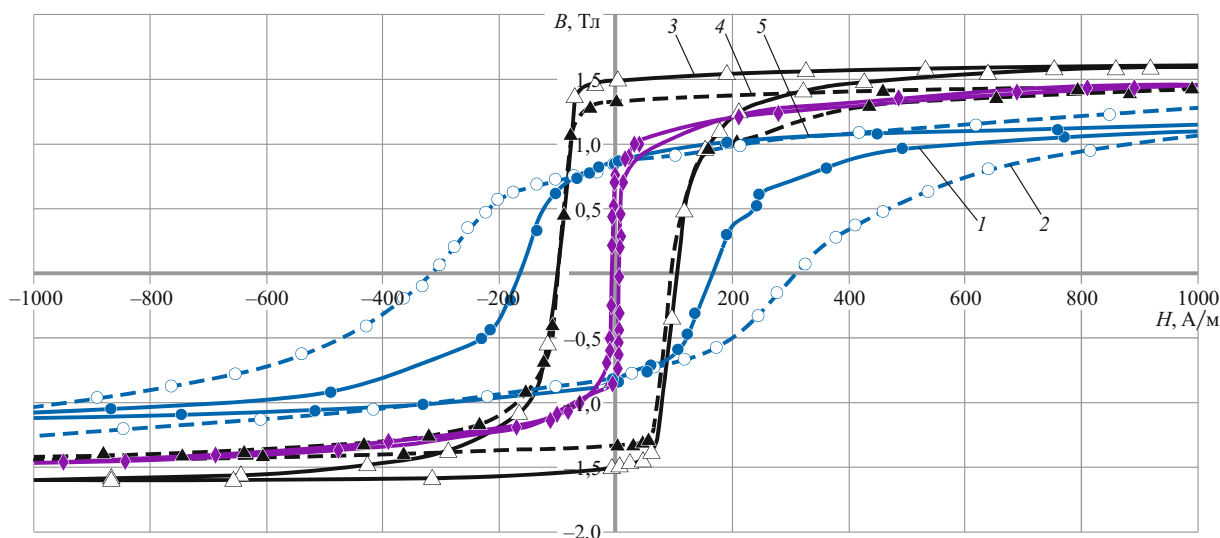


Рис. 4. Фрагменты петель гистерезиса исследованных образцов (1 – 5)

время применение отжига после штамповки (образцы 3 и 4) позволяет не только увеличить максимальную индукцию материала, его остаточную индукцию и магнитную проницаемость, но и существенно (до 100 А/м) уменьшить коэрцитивную силу.

Результаты измерений петель гистерезиса при различной максимальной напряженности магнитного поля (рис. 4) показали, что с изменением технологической схемы получения образцов меняются максимальная и остаточная индукции, коэрцитивная сила материала и показатель прямоугольности петли K_{Π} , представляющий собой отношение B_r к B_{\max} .

Так, спекание без применения штамповки (образец 1) приводит к умеренной величине коэрцитивной силы, а также пониженным значениям максимальной и остаточной индукций, что обусловлено, по-видимому, высокой пористостью образца. Горячая штамповка без последующего отжига и перекристаллизации (образец 2) вследствие уплотнения материала и возникновения значительных механических напряжений в нем сопровождается ростом как максимальной индукции, так и коэрцитивной силы. Применение после горячей штамповки высокотемпературного отжига (образцы 3 и 4) приводит к росту максимальной и остаточной индукций и резкому снижению коэрцитивной силы. Кроме того, растет показатель прямоугольности петли гистерезиса, достигая $K_{\Pi} = 0,96$ ($H_{\max} = 330$ А/м). С увеличением напряженности магнитного поля K_{Π} снижается, однако остается достаточно высоким ($K_{\Pi} = 0,88 - 0,90$ при $H_{\max} = 2160$ А/м).

Полученные данные также показали: для образца 5 с малым значением коэрцитивной силы ($H_c = 5$ А/м) состояние насыщения (индукция насыщения $B_s = 1,5$ Тл) достигается при небольших значениях напряженности магнитного поля ($H_{\max} \approx 330$ А/м). Для образцов 3 и 4 величина коэрцитивной силы достигает $H_c = 100 - 102$ А/м в интервале $H_{\max} \sim 860 - 2160$ А/м,

что характеризует состояние материала как близкое к насыщению. В то же время значения B_{\max} и B_r демонстрируют увеличение на 3 – 4 %. Для образца 1 ($H_c \approx 165$ А/м) в исследованном диапазоне $H_{\max} \approx 860 - 2160$ А/м) рост H_c составляет 3, а B_r и B_{\max} — 6 – 12 %, что свидетельствует о том, что напряженности магнитного поля ($H_{\max} \approx 2160$ А/м) недостаточно для насыщения. Для образца 2 ($H_c > 315$ А/м) рост H_c составил около 13, а B_r и B_{\max} — 20 – 30 %, т.е. для состояния насыщения напряженность поля была также недостаточной.

Таким образом, предложенная методика позволила выявить особенности формирования магнитных свойств ММПМ системы Fe – P, обусловленные предысторией их получения, влияющей на пористость (дефектность) структуры. Установлено, что при горячей штамповке в сочетании с последующим высокотемпературным отжигом можно получать ММПМ с достаточно высокими магнитными параметрами. При этом коэрцитивная сила материалов снижается, а значения максимальной и остаточной индукций увеличиваются. Возрастает также коэффициент прямоугольности петли гистерезиса K_{Π} . Предполагается, что механизм увеличения K_{Π} в материалах, полученных по различным технологическим схемам, связан с особенностями их кристаллической и доменной структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кекало И. Б., Самарин Б. А. Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами. — М.: Металлургия, 1989. — 496 с.
2. Дорогина Г. А., Балакирев В. Ф., Путилина М. В. Сравнительный анализ свойств и структуры порошковых материалов системы Fe – P, спеченных в азотном газе (4 % H_2) и в водороде / Физика и химия обработки материалов. 2003. № 5. С. 66 – 71.
3. Гасанов Б. Г. Взаимная диффузия и гомогенизация в порошковых сплавах. — Новочеркасск: ЮРГТУ, 2002. — 113 с.
4. Чан Мань Тунг. Особенности формирования комплекса магнитных свойств порошкового Fe – P материала — аналога технического же-

леза, полученного горячей объемной штамповкой пористой заготовки: автореферат дисс. ... канд. тех. наук. — Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2010. — 24 с.

5. ГОСТ 8.377. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. — М.: Изд-во стандартов, 1980. — 26 с.
6. ГОСТ 12119.1. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения магнитной индукции и коэрцитивной силы в аппарате Эпштейна и на кольцевых образцах в постоянном магнитном поле. — М.: Изд-во стандартов, 1999. — 11 с.
7. ГОСТ 10160. Сплавы прецизионные магнитно-мягкие. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1978. — 77 с.
8. **Дорофеев Ю. Г., Гасанов Б. Г., Дорофеев В. Ю., Мирошников В. И., Мищенко В. Н.** Промышленная технология горячего прессования порошковых изделий. — М.: Metallurgiya, 1990. — 206 с.

REFERENCES

1. **Kekalo I. B., Samarin B. A.** Fizicheskoe metallovedenie pretsizionnykh splavov. Splavy s osobymi magnitnymi svoystvami [Physical metallurgy of precision alloys. Alloys with special magnetic properties]. — Moscow: Metallurgiya, 1989. — 496 p. [in Russian].
2. **Dorogina G. A., Balakirev V. F., Putilina M. V.** Sravnitel'nyi analiz svoystv i struktury poroshkovykh materialov sistemy Fe – P, spechennykh v azotnom gaze (4 % H₂) i v vodorode [Comparative analysis of properties and structure of powder materials of system Fe-P, sintered in nitrogen gas (4 % H₂) and hydrogen] / Fiz. Khim. Obrab. Mater. 2003. N 5. P. 66 – 71 [in Russian].
3. **Gasanov B. G.** Vzaimnaya diffuziya i gomogenizatsiya v poroshkovykh splavakh [Mutual diffusion and homogenization in powder alloys]. — Novocherkassk: Izd. YuRGTU, 2002. — 113 p. [in Russian].
4. **Chan Man' Tung.** Osobennosti formirovaniya kompleksa magnitnykh svoystv poroshkovogo Fe – P materiala — analoga tekhnicheskogo zheleza, poluchennogo goryachei ob'emnoi shtampovkoi poristoi zagotovki [Features of formation of the complex magnetic properties of the powder Fe – P material — technical analogue of iron obtained by hot die forging of porous billets]. Author's Abstract of Candidate's Thesis. — Rostov-na-Donu: Izd. DGTU, 2010. — 24 p. [in Russian].
5. State Standard GOST 8.377. Materialy magnitomyagkie. Metodika vypolneniya izmerenii pri opredelenii staticheskikh magnitnykh kharakteristik [The soft magnetic materials. The measurement procedure in the determination of static magnetic characteristics]. — Moscow: Izd-vo standartov, 1980. — 26 p. [in Russian].
6. State Standard GOST 12119.1. Stal' élektrotekhnicheskaya. Metody opredeleniya magnitnykh i élektricheskikh svoystv. Metod izmereniya magnitnoi induktsii i koértsitivnoi sily v apparate Épshteina i na kol'tsevykh obraztsakh v postoyannom magnitnom pole [Electrotechnical steel. Methods for determining magnetic and electrical properties. Measurement method of magnetic induction and the coercive force in the office of the Epstein and ring samples in a constant magnetic field]. — Moscow: Izd-vo standartov, 1999. — 11 p. [in Russian].
7. State Standard GOST 10160. Splavy pretsizionnye magnitno-myagkie. Tekhnicheskie usloviya [The alloys are magnetically soft. Specifications]. — Moscow: Izd-vo standartov, 1978. — 77 p. [in Russian].
8. **Dorofeev Yu. G., Gasanov B. G., Dorofeev V. Yu., Miroshnikov V. I., Mishchenko V. N.** Promyshlennaya tekhnologiya goryachego pressovaniya poroshkovykh izdelii [Industrial technology of hot pressing of powder products]. — Moscow: Metallurgiya, 1990. — 206 p. [in Russian].