

ФРАКТАЛЬНОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВОГО “Fe-P” МАТЕРИАЛА – АНАЛОГА ТЕХНИЧЕСКОГО ЖЕЛЕЗА, ПОЛУЧЕННОГО ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКОЙ ПОРИСТОЙ ЗАГОТОВКИ

КЕМ А.Ю.

*Донской государственный технический университет,
г.Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: akem@dstu.edu.ru*

Введение. В работах [1-3] показано, что особенности формирования магнитных свойств горячештампованных порошковых магнитно-мягких материалов системы «Fe-P» обусловлены предысторией их получения, влияющей на дефектность структуры, при этом снижение коэрцитивной силы, повышение максимальной и остаточной индукции и коэффициента прямоугольности петли гистерезиса K_H , связано с окислением границ зерен исходных порошков в процессе термо-механического воздействия при горячей штамповке и формированием текстуры деформации.

В тоже время из данных работ [4-6] следует, что аппарат теории фракталов — самоподобных множеств дробной размерности, может использоваться для анализа процессов, протекающих в неупорядоченных средах и приводящих к изменению их структуры, например, формированию деформационного рельефа на поверхности порошкового материала. Методики экспериментального определения фрактальной размерности поверхности порового пространства обсуждаются в [7]. Определение фрактальной размерности поверхности порошковых материалов системы “Al-Cu” с различным содержанием Cu и установление ее связи с процессами спекания проведено в [6]. Однако вопрос о связи магнитных свойств с фрактальными характеристиками поверхности порошковых пористых тел практически не исследован и требует изучения.

Цель настоящей работы - определение фрактальной размерности поверхности и установление ее связи с магнитными свойствами порошковых горячештампованных материалов системы «Fe-P», полученных по различным технологическим схемам.

Материалы и методика эксперимента. В качестве исходного материала, используемого в работе для изготовления образцов порошкового материала системы «Fe-P», применялся порошок марки «PASC60» производства фирмы «Höganäs» Шве-

ция, представляющий собой смесь порошка марки ASC 100.29 и феррофосфора; при этом массовая доля фосфора в образцах составляла 0,59-0,66% [8]. Образцы материалов для исследования магнитных свойств получали по следующим технологическим схемам: образец-тороид 1 - получен холодным прессованием PASC 60 с последующим спеканием прессовки при 1150°C, 2 ч; образец-тороид 2 - получен по технологии образца 1 с использованием горячей штамповки (ДГП) спеченной заготовки, предварительно нагретой до 1100°C (время остывания заготовки 5-7 мин.); образец-тороид 3 - получен по технологии образца 2 с дополнительным отжигом после ДГП при 1100°C, 2 ч; образец 4 - получен холодным прессованием из PASC 60 без спекания, с последующим ДГП при 1100°C (время остывания заготовки 5-7 мин.) и отжигом при 1100°C, 2 ч.

Максимальную индукцию $B_{\max}$ в полях напряженностью (H) до 2500 А/м, остаточную индукцию B_r , коэрцитивную силу H_c , начальную μ_n и максимальную магнитную проницаемость $\mu_{\max}$ определяли по ГОСТ 8.377-80. Методика измерений не отличалась от описанной в [8]. Фрактальность поверхности изучалась с помощью сканирующего зондового микроскопа NT-MTD (Зеленоград). Методом вертикальных сечений Мандельброта [4] полученных изображений определялась фрактальная размерность поверхности D. Размер анализируемого участка поверхности во всех случаях не превышал 40x40 мкм. Фрактальная размерность определялась как модуль тангенса угла наклона среднего участка зависимости L/L_0 (L — длина секущей линии, L_0 — расстояние между точками сканирования) от увеличения в двойных логарифмических координатах. Линейная аппроксимация модуля позволяет считать фрактальную размерность интегральной характеристикой поверхности [4-6].

Результаты и их обсуждение. Подробный анализ влияния предыстории получения образцов исследуемых магнитно-мягких материалов на уровень их магнитных характеристик проведен в работах [1-3, 8], здесь же отметим следующее. Образец-тороид 1 (таблица), не подвергавшийся горячей штамповке, обладает относительно невысоким уровнем магнитной проницаемости и максимальной индукции; у холоднопрессованного образца-тороида 2, подвергнутого горячей штамповке без последующего отжига, величина индукции возрастает, величина максимальной магнитной проницаемости достигает значений примерно 1050 Гс/э, коэрцитивная сила также увеличивается,

достигая значений примерно 300 А/м, что связано с особенностями структуры (Fe-P)-порошковых материалов (пористость+субструктура) и их дефектностью [8].

В то же время применение высокотемпературного отжига материалов после горячей штамповки (образцы-тороиды 3,4) позволяет не только увеличить значения максимальной индукции материала (для данного $H_{\max}$), его остаточной индукции и магнитной проницаемости, но и существенно (до 100 А/м) уменьшить коэрцитивную силу. Из полученных данных следует, что магнитные свойства порошкового материала являются структурно-чувствительными и существенно зависят от технологических режимов изготовления образцов, при этом пористость не является основным фактором, определяющим уровень магнитных свойств. Отмеченные нами особенности формирования магнитных свойств удовлетворительно согласуются с результатами атомно-силовых исследований изменения состояния поверхности образцов материалов методом сканирующей зондовой микроскопии. Трехмерная реконструкция поверхности одного из образцов представлена на рис.1, а линия сканирования участка его поверхности - на рис.2.

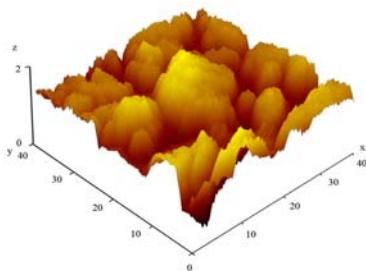


Рис.1. Реконструкция трехмерного изображения участка поверхности образца-тороида 2

Установлено, что повышение степени деформационно-термического воздействия на испытываемые образцы приводит к немонотонному изменению величины фрактальной размерности. Так, например, для образца-тороида 1 величина среднего значения показателя фрактальной размерности «D» составляет «1,340608», а для образцов 2, 3, 4 «1,302624», «1,151201» и «1,216276» соответственно.

Таблица

Результаты измерения частных петель гистерезиса образцов

Образец-тороид 1		
$w_1=20$, $I_{\max} \approx 1.53$ А, $H_{\max} \approx 327$ А/м	$w_1=20$, $I_{\max} \approx 4.01$ А, $H_{\max} \approx 867$ А/м	$w_1=20$, $I_{\max} \approx 10.07$ А, $H_{\max} \approx 2155$ А/м
Максимальная индукция * $\Phi_{\max}(H_{\max}) = 2288 \pm 25$ мкВб $B_{\max}(H_{\max}) = 0.763 \pm 0,038$ Тл	Максимальная индукция * $\Phi_{\max}(H_{\max}) = 3167 \pm 30$ мкВб $B_{\max}(H_{\max}) = 1.058 \pm 0,053$ Тл	Максимальная индукция * $\Phi_{\max}(H_{\max}) = 3660 \pm 40$ мкВб $B_{\max}(H_{\max}) = 1.223 \pm 0,060$ Тл
Остаточная индукция * $\Phi_{\text{ост}}(H_{\max}) = 1792 \pm 20$ мкВб $B_{\text{ост}}(H_{\max}) = 0.600 \pm 0,030$ Тл	Остаточная индукция * $\Phi_{\text{ост}}(H_{\max}) = 2398 \pm 25$ мкВб $B_{\text{ост}}(H_{\max}) = 0.801 \pm 0,040$ Тл	Остаточная индукция * $\Phi_{\text{ост}}(H_{\max}) = 2528 \pm 25$ мкВб $B_{\text{ост}}(H_{\max}) = 0.845 \pm 0,042$ Тл
Коэрцитивная сила, H_c , А/м : 137-165 Начальная магнитная проницаемость, (Гс/Э), не менее -350 Максимальная магнитная проницаемость, (Гс/Э), не менее -1850		
Образец-тороид 2		
$w_1=20$, $I_{\max} \approx 1,60$ А, $H_{\max} \approx 340$ А/м	$w_1=20$, $I_{\max} \approx 4,06$ А, $H_{\max} \approx 860$ А/м	$w_1=20$, $I_{\max} \approx 10,07$ А, $H_{\max} \approx 2138$ А/м
Максимальная индукция * $\Phi_{\max}(H_{\max}) = 1045 \pm 10$ мкВб $B_{\max}(H_{\max}) = 0,418 \pm 0,022$ Тл	Максимальная индукция * $\Phi_{\max}(H_{\max}) = 2420 \pm 25$ мкВб $B_{\max}(H_{\max}) = 0,968 \pm 0,050$ Тл	Максимальная индукция * $\Phi_{\max}(H_{\max}) = 3580 \pm 38$ мкВб $B_{\max}(H_{\max}) = 1,432 \pm 0,070$ Тл
Остаточная индукция * $\Phi_{\text{ост}}(H_{\max}) = 650 \pm 7$ мкВб $B_{\text{ост}}(H_{\max}) = 0,260 \pm 0,013$ Тл	Остаточная индукция * $\Phi_{\text{ост}}(H_{\max}) = 1620 \pm 20$ мкВб $B_{\text{ост}}(H_{\max}) = 0,648 \pm 0,032$ Тл	Остаточная индукция * $\Phi_{\text{ост}}(H_{\max}) = 2000 \pm 20$ мкВб $B_{\text{ост}}(H_{\max}) = 0,800 \pm 0,040$ Тл
Коэрцитивная сила, H_c , А/м : 175-315 Начальная магнитная проницаемость, не менее - 250 Максимальная магнитная проницаемость, не менее - 1050		

Образец-тороид 3		
$w_1=20, I_{\max} \approx 1,56 \text{ A},$ $H_{\max} \approx 331 \text{ A/м}$	$w_1=20, I_{\max} \approx 4,05 \text{ A},$ $H_{\max} \approx 860 \text{ A/м}$	$w_1=20, I_{\max} \approx 10,06 \text{ A},$ $H_{\max} \approx 2136 \text{ A/м}$
Максимальная индукция * $\Phi_{\max}(H_{\max}) = 3480 \pm 35 \text{ мкВб}$ $B_{\max}(H_{\max}) = 1,265 \pm 0,063 \text{ Тл}$	Максимальная индукция * $\Phi_{\max}(H_{\max}) = 3880 \pm 40 \text{ мкВб}$ $B_{\max}(H_{\max}) = 1,411 \pm 0,070 \text{ Тл}$	Максимальная индукция * $\Phi_{\max}(H_{\max}) = 4100 \pm 40 \text{ мкВб}$ $B_{\max}(H_{\max}) = 1,491 \pm 0,075 \text{ Тл}$
Остаточная индукция * $\Phi_{\text{ост}}(H_{\max}) = 3350 \pm 35 \text{ мкВб}$ $B_{\text{ост}}(H_{\max}) = 1,218 \pm 0,060 \text{ Тл}$	Остаточная индукция * $\Phi_{\text{ост}}(H_{\max}) = 3600 \pm 40 \text{ мкВб}$ $B_{\text{ост}}(H_{\max}) = 1,309 \pm 0,065 \text{ Тл}$	Остаточная индукция * $\Phi_{\text{ост}}(H_{\max}) = 3700 \pm 40 \text{ мкВб}$ $B_{\text{ост}}(H_{\max}) = 1,345 \pm 0,070 \text{ Тл}$
Коэрцитивная сила, $H_c, \text{ A/м} : 92-100$ Начальная магнитная проницаемость, не менее - 600 Максимальная магнитная проницаемость, не менее -4900		
Образец-тороид 4		
$w_1=20, I_{\max} \approx 1,54 \text{ A},$ $H_{\max} \approx 327 \text{ A/м}$	$w_1=20, I_{\max} \approx 4.05 \text{ A},$ $H_{\max} \approx 859 \text{ A/м}$	$w_1=20, I_{\max} \approx 10.07 \text{ A},$ $H_{\max} \approx 2137 \text{ A/м}$
Максимальная индукция * $\Phi_{\max}(H_{\max}) = 3500 \pm 30 \text{ мкВб}$ $B_{\max}(H_{\max}) = 1.400 \pm 0,07 \text{ Тл}$	Максимальная индукция * $\Phi_{\max}(H_{\max}) = 3915 \pm 40 \text{ мкВб}$ $B_{\max}(H_{\max}) = 1.566 \pm 0,078 \text{ Тл}$	Максимальная индукция * $\Phi_{\max}(H_{\max}) = 4190 \pm 40 \text{ мкВб}$ $B_{\max}(H_{\max}) = 1.676 \pm 0,080 \text{ Тл}$
Остаточная индукция * $\Phi_{\text{ост}}(H_{\max}) = 3220 \pm 30 \text{ мкВб}$ $B_{\text{ост}}(H_{\max}) = 1,288 \pm 0,064 \text{ Тл}$	Остаточная индукция * $\Phi_{\text{ост}}(H_{\max}) = 3600 \pm 36 \text{ мкВб}$ $B_{\text{ост}}(H_{\max}) = 1,440 \pm 0,072 \text{ Тл}$	Остаточная индукция * $\Phi_{\text{ост}}(H_{\max}) = 3700 \pm 40 \text{ мкВб}$ $B_{\text{ост}}(H_{\max}) = 1,480 \pm 0,074 \text{ Тл}$
Коэрцитивная сила, $H_c, \text{ A/м} : 91-103$ Начальная магнитная проницаемость, не менее - 600 Максимальная магнитная проницаемость, не менее - 5400		

Примечание: *-типичные абсолютные погрешности измерения потока (определяются погрешностью микровеберметра) и индукции (определяются погрешностями измерения потока и площади сечения образца). $w_1=20$ - число витков намагничивающей обмотки.



Рис.2. Линия сканирования участка поверхности образца-тороида 2

Анализ результатов исследований сечений поверхностей образцов позволяет сделать вывод о существовании областей поверхностей, обладающих фрактальными свойствами. Это подтверждается дробными значениями размерности по всем исследованным сечениям поверхности порошковых образцов. Отметим при этом, что значения фрактальной размерности сечений удовлетворяют условию: $1 \leq D \leq 2$. Наличие минимальных значений D определяется, по-видимому, погрешностью используемых алгоритмов обработки изображения и может интерпретироваться как приближение показателя фрактальной размерности к топологической размерности линии.

Сопоставление результатов измерения величины коэрцитивной силы в зависимости от технологической схемы изготовления образца с данными об изменении фрактальной размерности, показывает, что в схеме: «холодное прессование+ спекание» → «холодное прессование+ДГП» → «холодное прессование+ДГП+отжиг» → «холодное прессование+спекание+ДГП+отжиг», величина коэрцитивной силы меняется соответственно по интервалу значений: «110-160» → «170-310» → «80-100» → «80-100» А/м в полях напряженностью 330, 860 и 2160 А/м и соответствует темпу и знаку изменения средней величины «D». Аналогичная картина наблюдается и для величины максимальной магнитной проницаемости, также являющейся структурно-чувствительной характеристикой. Таким образом, изменение показателя фрактальной размерности поверхности образцов с

различной технологической наследственностью нужно, по-видимому, связывать с изменениями намагниченности, вызванными внутренними деформациями и включениями, что полностью согласуется с теоретическими положениями [9].

Заключение. Показана возможность использования топологии поверхности порошковых материалов в качестве функции отклика/свойства процессов, ответственных за ее формирование. Концептуально использование теории фракталов позволяет прогнозировать изменение уровня магнитных свойств (коэрцитивной силы и максимальной магнитной проницаемости) порошковых материалов, однако для инженерного использования требуется наработка массива экспериментального материала и совершенствование методики оценки показателя фрактальной размерности.

Литература:

1. Кем А.Ю., Чан Мань Тунг, Китаев В.В. Мёссбауэровские и магнитные исследования горячештампованного порошкового магнитно-мягкого материала Fe-P/ Вестник ДГТУ, №5, 2010, с.700-712
2. Кем А.Ю., Чан Мань Тунг, Китаев В.В. Формирование магнитных свойств порошковых магнитно-мягких (Fe-P) материалов, аналогов технического железа // Сборник научных трудов 5-ой международной научной конференции «Новые перспективные материалы и технологии их получения (НПМ-2010)». Волгоград, ВГТУ, 2010, с.252-254
3. Кем А.Ю., Чан Мань Тунг, Китаев В.В. Об особенностях эволюции петли гистерезиса порошковых магнитно-мягких материалов системы (Fe-P) // Труды РГУПС, №3(12), 2010, с.49-53
4. Иванова В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994, 383 с.
5. Севостьянова И.Н., Кульков С.Н. Фрактальные характеристики поверхности пластически деформированного композита карбид вольфрама – железомарганцевая сталь// ЖТФ, 2003, т.73, вып.2, с.81-86.
6. Кем А.Ю., Арестова Л.А. Процессы спекания и фрактальность порошковых материалов на основе алюминия// ФиХОМ, 2010, №6, с.51-56
7. Мосолов А.Б., Динариев О.Ю. Фракталы, скейлы и геометрия пористых материалов// ЖТФ, 1988, т.58, вып.2, с.157-163.
8. Чан Мань Тунг Особенности формирования комплекса магнитных свойств порошкового Fe-P материала — аналога технического железа, полученного горячей объемной штамповкой пористой заготовки //Автореферат дисс... канд...техн.. наук.- Ростов-на-Дону, 2010, 25 с.
9. Киттель К. Физическая теория доменной структуры ферромагнетиков // УФН, 1950. Т. XL1, вып. 4, с.453-544.