

В.В. Поляков, А.В. Егоров, В.А. Турецкий

Влияние структуры пористых металлов на магнитные характеристики

Введение

Проблема разработки новых материалов с набором заранее заданных свойств требует исследования закономерностей формирования их физических характеристик в зависимости от состава, структуры, внешних условий. В случае материалов с резко неоднородной структурой такие закономерности весьма сложны и недостаточно изучены. Специфическим классом неоднородных материалов являются пористые металлы, которые выступают в качестве своеобразного предельного случая гетерофазной среды с максимально различающимися свойствами составляющих фаз — твердой и поровой. Это делает пористые металлы важным модельным объектом для анализа фундаментальных закономерностей поведения неоднородных конденсированных сред [1-3]. С позиций прикладных задач такие материалы представляют также существенный интерес в связи с их широким распространением в качестве конструкционных [4, 5].

Магнитные свойства пористых материалов относятся к числу наименее изученных. Это в значительной степени связано с тем, что при теоретическом анализе магнитных характеристик традиционно исходят из предположения о примерной одинаковости свойств компактных участков пористого тела и соответствующего беспористого материала. При рассмотрении явлений типа процессов переноса в силу слабой структурной чувствительности такое приближение представляется оправданным. Однако в случае характеристик с сильной структурной чувствительностью, таких как магнитная восприимчивость ферромагнитных металлов, пренебрегать строением компактных областей уже нельзя. Другими словами, адекватный теоретический анализ магнитных свойств пористых магнетиков должен учитывать особенности строения компактных участков. В настоящей работе рассматривается физическая модель, основанная на таком учете и позволяющая с общих позиций описать влияние пористости на формирование магнитных свойств металлов с различными механизмами намагничивания.

Структурная модель магнитной восприимчивости пористого магнетика

В случае ферромагнетиков магнитные проницаемость μ и восприимчивость $\kappa = \mu - 1$ зависят от напряженности H магнитного поля, поэтому приходится вводить различные виды этих величин. Основными из них являются начальные магнитные проницаемость μ^α и восприимчи-

вость κ^α , характеризующие вещество в слабом магнитном поле, и максимальные магнитные проницаемость μ^m и восприимчивость κ^m , соответствующие наибольшему наклону кривой технического намагничивания (рис. 1). На рис. 1 величина μ^α соответствует наклону кривой $B(H)$ в начале координат, μ^m — в точке m . Анализ влияния пористости на величины κ^α и μ^α , κ^m и μ^m должен проводиться с учетом того обстоятельства, что различным участкам кривой $B(H)$ отвечают разные механизмы намагничивания. По вкладу доминирующих механизмов обычно разделяют три стадии намагничивания [6]. Стадия I (начальный участок кривой $B(H)$, рис. 1) соответствует слабым полям H . Здесь в качестве механизма намагничивания выступает обратимое смещение границ доменов, приводящее к росту объема доменов с благоприятной ориентацией магнитных моментов. Этот процесс определяет поведение κ^α и μ^α . На стадии II добавляется необратимое смещение границ доменов. Для стадии III, относящейся к сильным магнитным полям, характерно вращение намагниченности с поворотом магнитного момента доменов по направлению внешнего магнитного поля. Процессы на II и III стадиях определяют величины μ^m и κ^m .

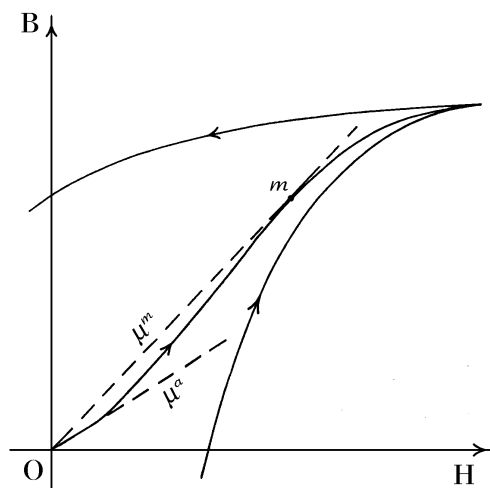


Рис. 1. Кривая намагничивания магнитного металла

Магнитные характеристики пористых ферромагнетиков относятся к группе свойств с сильной структурной чувствительностью. Согласно развитому в [7,8] подходу, это означает, что магнитная восприимчивость определяется двумя вкладками: структурно-нечувствительным, зависящим только от параметров пористой

структуры, и структурно-чувствительным, отражающим изменение состояния металлической фазы с ростом пористости. Это дает возможность представить магнитную восприимчивость в виде

$$\kappa/\kappa_{k0} = \kappa_s(P, R_g, \dots) \kappa_p(P, R_p, \dots). \quad (1)$$

Здесь κ_{k0} — значение в компактном состоянии; вклад κ_p определяет геометрическое влияние пористой структуры и зависит, вообще говоря, от пористости P , размеров R_s , формы, распределения пор и т.д.; вклад κ_s характеризует влияние твердой фазы и определяется пористостью, размером R_g и распределением зерен, строением межзеренных границ и т.д.

Получим выражение для структурно-нечувствительного члена $\kappa_p = \kappa/\kappa_k$, где $\kappa_k = \kappa_{k0}\kappa_s$ — значение магнитной восприимчивости для твердой фазы пористого материала. Для этого рассмотрим пористый магнетик с номинальной магнитной восприимчивостью κ и объемом V в магнитном поле H , его намагниченность M запишется как

$$M = \kappa V H. \quad (2)$$

Эта же величина может быть выражена через магнитную восприимчивость металлической фазы κ , ее объем V и эффективное поле $H = H - H'$, где H' — размагничивающее поле, возникающее в связи с геометрическими изменениями в металлическом каркасе, вносимыми появлением пор:

$$M = \kappa_k V_k (H - H'). \quad (3)$$

(Отметим, что в таком виде формула (3) относится к случаю ферро- и парамагнетиков, для которых размагничивающее поле H' ориентировано против поля H). Из формул (2) и (3) получаем с учетом $V/V_k = 1 - P$ выражение

$$\kappa/\kappa_k = (1 - P)(1 - H'/H). \quad (4)$$

Таким образом, задача определения магнитной восприимчивости сводится к учету размагничивающего поля H'/H .

Размагничивающее поле H' определяется размагничивающим фактором, отражающим форму пор, и величиной магнитной проницаемости компактного материала μ_k . Для магнетика в поле H оно может быть записано в виде

$$H' = \gamma H, \quad (5)$$

где параметр γ для сферической поры

$$\gamma = \kappa_k / (\kappa_k + 3). \quad (6)$$

Создаваемое порой поле H' должно быть усреднено по объему материала, приходящегося на эту пору, что (в приближении однородного распределения полей H и H') дает

$$\frac{\int_{V_p} H' dV}{\int_V H dV} \cong \frac{H' V_p}{H V} = \frac{H'}{H} P. \quad (7)$$

Окончательно получаем с учетом соотношения (5)

$$\kappa_p = (1 - P)(1 - \gamma P). \quad (8)$$

Теперь получим выражение для структурно-чувствительного члена κ_s . Магнитная восприимчивость компактных участков κ_k может быть представлена [9] в виде суммы двух вкладов:

$$\kappa_k = \kappa_{k1}(d) + \kappa_{k2}. \quad (9)$$

Первый вклад $\kappa_{k1}(d)$ обусловлен смещением доменных стенок и зависит от размера домена d согласно формуле [9]:

$$\kappa_{k1} = J_s^2 d / \delta, \quad (10)$$

где J_s^2 — спонтанная намагниченность доменов, δ — толщина доменной стенки. Второй вклад κ_{k2} описывает вращение намагниченности и от δ не зависит. Аналогично можно записать для материала в компактном состоянии

$$\kappa_{k0} = \kappa_{k01}(d_0) + \kappa_{k02}, \quad (11)$$

где d_0 — размер доменов в компактном металле. Введем коэффициент

$$k = \kappa_{k02} / \kappa_{k0}. \quad (12)$$

Для стадии I намагничивания, т.е. в случае начальной магнитной восприимчивости, коэффициент $k = 0$. Случаю максимальной магнитной восприимчивости отвечает значение k для арко-железа, равное $k = 0,42$ [9]. С помощью (12) получаем

$$\frac{\kappa_k}{\kappa_{k0}} = \frac{k + d/d_0}{k + 1}. \quad (13)$$

Выразим относительный размер доменов d/d_0 через пористость P . Для этого воспользуемся соотношением [9], связывающим размеры домена и малой частицы, в качестве аналога которой рассматриваем зерно в поликристалле. Именно, запишем $d = R_g^{1/2}$, где $R_g^{1/2}$ — средний размер зерна. Тогда

$$d/d_0 = (R_g/R_{g0})^{1/2}, \quad (14)$$

где через R_{g0} обозначен средний размер зерен в компактном металле. Согласно геометрической модели элементарной ячейки [8], размер R_g аналогичен величине R , а R_{g0} — величине $R - r$, откуда

$$R_g/R_{g0} = 1 - P^{1/3} \quad (15)$$

и

$$d/d_0 = (1 - P^{1/3})^{1/2}. \quad (16)$$

Для структурно-чувствительного вклада как функции пористости получаем

$$\kappa_s = k + (1 - P^{1/3})^{1/2} / (k + 1). \quad (17)$$

Окончательное выражение для относительной магнитной восприимчивости пористых металлов принимает с учетом формул (8) и (17) вид

$$\frac{\kappa}{\kappa_{k0}} = (1 - P)(1 - \gamma P) \frac{k + (1 - P^{1/3})^{1/2}}{k + 1}. \quad (18)$$

Начальная магнитная восприимчивость пористых ферромагнетиков

Применим полученное выражение (18) к описанию намагничивания магнитомягких пористых металлов в случае слабых полей. Наиболее устойчивым состоянием доменов является такое, при котором доменные границы проходят через поры (рис. 2а).

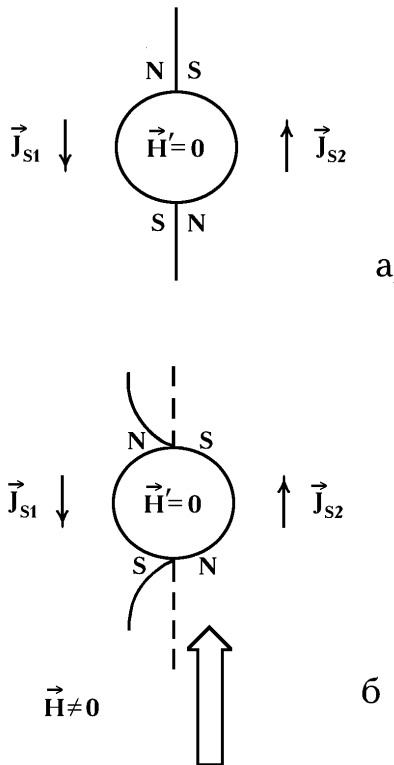


Рис. 2. Схема доменной структуры вблизи поры
 а - в отсутствие внешнего поля;
 б - при наличии поля

Это связано с тем, что образующиеся на поверхности поры магнитные полюса в случае, когда доменная стенка проходит через поры, разделяются и магнитостатическая энергия понижается [6]. Стенка оказывается как бы закрепленной на порах, отрыв от них становится энергетически невыгодным. В слабых магнитных полях доменные стенки испытывают обратимое смещение, при котором они не отрываются от точек своего закрепления на порах (рис. 2б).

В этом случае сохраняется разделение магнитных полюсов, приводящее к компенсации вкладов соседних доменов. Как следствие, размагничивающим полем пор на стадии I намагничивания можно пренебречь. На последующих стадиях возможны эффекты необратимого смещения доменных стенок, указанная компенсация нарушается, размагничивающее поле поры растет и им пренебрегать нельзя. Таким образом, при анализе начальной магнитной восприимчивости полагаем $H'/H \approx 0$, и второй член в правой части уравнения (18) равен единице. С учетом того, что коэффициент $6k \approx 0$, получаем из общего уравнения (18) для начальной магнитной восприимчивости выражение

$$\kappa_{\alpha}/\kappa_{0\alpha} = (1-P^{1/3})^{1/2}(1-P). \quad (19)$$

Максимальная магнитная восприимчивость

Для описания максимальной магнитной вос-

приимчивости на основе общей формулы (18) учтем, что для ферромагнетиков $\kappa_{k0} \geq 1$, $\gamma(\kappa_{k0}) \approx 1$, т.е. вклад κ_P максимален. Получаем выражение

$$\kappa^m / \kappa_0^m = (1-P)^2 \frac{\kappa + (1-P^{1/3})}{k+1}. \quad (20)$$

В формуле (20) структурно-чувствительный вклад мал по сравнению со случаем начальной магнитной восприимчивости (поскольку $\kappa \approx 0,4$), что отражает меньшую структурную чувствительность магнитной восприимчивости в состояниях, когда намагниченность близка к насыщению [10].

Магнитная восприимчивость пористых пара- и диамагнетиков

В случае парамагнитных металлов обычно считается [4], что магнитная восприимчивость пропорциональна объемной доле магнитной фазы, т.е. магнитные свойства аддитивны. В то же время проведенное описание показывает, что в случае парамагнетиков с достаточно большим значением κ_k должны наблюдаться отклонения от линейной зависимости. Это следует из общей формулы (18), которая при исключении описывающего доменную структуру члена κ_k принимает вид

$$\kappa_k / \kappa_{k0} = (1-P)(1-\gamma P). \quad (21)$$

Полученное выражение свидетельствует об отклонении от линейной зависимости при достаточно больших γ .

В случае пористого диамагнетика магнитная восприимчивость $\kappa_k < 0$ и размагничивающее поле H' ориентировано по полю H , поэтому формула (21) принимает вид

$$\kappa_k / \kappa_{k0} = (1-P)(1+\gamma P). \quad (22)$$

В диамагнитном металле влияние пористости на второй член в формуле (22) имеет противоположный по сравнению с пара- и ферромагнетиками характер и ослабляет действие линейного члена $1-P$. Таким образом, предложенная модель предсказывает возможность немонотонного поведения зависимости $\kappa(P)$ для диамагнетиков.

Влияние пористости на магнитные свойства металлов

Для сопоставления с развитой моделью были проведены экспериментальные исследования влияния структуры на магнитные характеристики, проводившиеся на примере пористых железа, никеля и титана. Образцы для измерений изготавливались согласно [8] из металлических порошков путем вакуумного спекания. Измерения величин κ проводились по методике [11].

На рис. 3 в виде точек приведены зависимости от пористости относительных начальных магнитных восприимчивостей железа и никеля. Наблюдается монотонный спад восприимчивостей в данном интервале пористостей, демонстрирующий значительное отклонение от линейного поведения. Как видно из рис. 3, вычис-

ленная по формуле (18) кривая 1 правильно передает поведение экспериментальных точек.

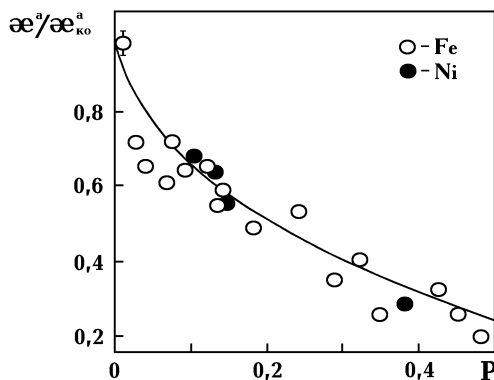


Рис. 3. Относительная начальная магнитная восприимчивость пористых металлов

Измерения максимальной магнитной восприимчивости проводились на примере пористого железа. Полученные экспериментальные данные совместно с приведенными в [4, 5, 12] представлены на рис. 4. Теоретическая кривая рассчитывалась по формуле (20), она проходит вблизи от опытных точек.

На рис. 5 приведены результаты измерений магнитной восприимчивости пористого титана. Они показывают, что отклонения от линейной зависимости, предсказываемые теорией, действительно имеют место. Физической причиной такого поведения является вклад размагничивающего поля пор, которое при достаточно больших K вызывает усиление деградации магнитных свойств. Результаты расчетов по формуле (21) со значением $\gamma \sim 0,5$ (приближение сферических пор, формула (20)) представлены в виде кривой 1.

Как видно из рис. 5, при $P \sim 0,5$ кривая 1 отклоняется от линейной зависимости (пунктирная линия 2) на 20%, что близко к экспериментальной оценке.

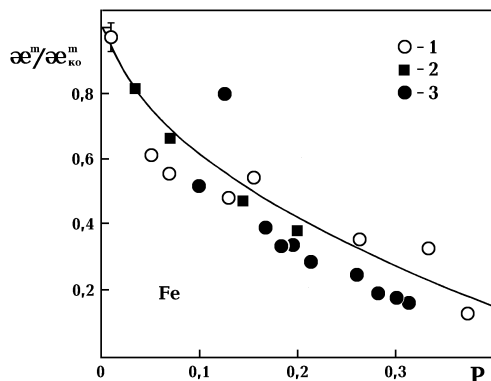


Рис. 4. Относительная максимальная магнитная восприимчивость пористого железа:
1 — настоящая работа; 2 — [5], 3 — [4]

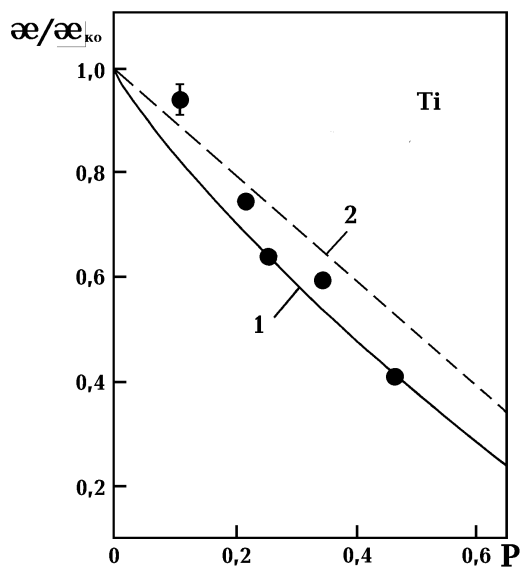


Рис. 5. Относительная магнитная восприимчивость пористого титана:
1 — по формуле [24];
2 — линейная зависимость

Заключение

Приведенные результаты свидетельствуют о весьма существенном влиянии как структуры, так и механизмов намагничивания на магнитные характеристики пористых магнетиков. Развита структурная модель позволяет адекватно передать зависимости магнитных восприимчивостей от пористости и отразить качественные особенности поведения магнитных свойств пористых металлов с различными механизмами намагничивания.

Литература

1. Займан Д. Модели беспорядка. М., 1982. 592 с.
2. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Теория протекания и проводимость сильно неоднородных сред//УФН. 1975. Т. 117. Вып. 3. С. 401-435.
3. Поляков В.В., Егоров А.В. Начальная магнитная восприимчивость пористых ферромагнитных материалов//ФММ. 1993. Т. 76. Вып.1. С. 173-175.
4. Андриевский Р.А. Порошковое материаловедение. М.: Металлургия, 1991. 205 с.
5. James V.A., Williams G. Review of the magnetic properties of sintered iron//Powder met. 1979. N2. P.75-87.
6. Вонсовский С.В. Магнетизм. М: Наука, 1971, 235 с.
7. Поляков В.В., Егоров А.В. Магнитные и электрические характеристики пористых ферромагнетиков//Докл АН. 1995. Т. 344. N 4.
8. Поляков В.В., Егоров А.В. Зависимость электропроводности пористых металлов от структуры//Теплофизика и аэромеханика. 1994. Т. 1. N 2. С. 179-182.
9. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. М., 1987. 420 с.
10. Поляков В.В., Егоров А.В. Магнитная проницаемость пористых магнитомягких металлов// Известия вузов. Черная металлургия. 1993. N 12. С. 36-37.
11. Поляков В.В., Егоров А.В. Вихретоковый контроль удельной электрической проводимости и магнитной проницаемости изделий из магнитомягких материалов//Дефектоскопия. 1992. N 12. С. 78-80.
12. Moyer K., Ryan J. The influence of -325 mesh Powder on DC magnetic properties//Proc. Int. Symp. Adv. Struct. mater. Montreal, 1988. New York etc., 1988. V9. P. 311- 318.

