

## СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ МАТРИЦ С РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИЕЙ ПОР

Е. А. Денисова<sup>1</sup>, Л. А. Чеканова<sup>1</sup>, С. Г. Мельникова<sup>2</sup>, Р.С. Исхаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Учреждение Российской академии наук Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН,  
г. Красноярск, Академгородок, 50, стр.38

<sup>2</sup>ФГАО ВПО Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, пр. Свободный, 79  
[rauf@iph.krasn.ru](mailto:rauf@iph.krasn.ru)

## SYNTHESIS AND STUDY OF MAGNETIC COMPOSITE MATERIALS BASED ON POROUS MATRICES WITH DIFFERENT PORE MORPHOLOGY

E. A. Denisova, L. A. Chekanov, S. G. Melnikova, R. C. Ishakov

*Uchrezhdenie of the Russian Academy of Sciences Institute of physics named L. C. Kirenskogo RAS,  
Krasnoyarsk, Akademgorodok, Russia*

*FGA VPO Siberian Federal University, Krasnoyarsk,  
[rauf@iph.krasn.ru](mailto:rauf@iph.krasn.ru)*

The electroless plating is used to synthesize several types of composite materials, such as, the  $\text{Co}_{100-x}\text{P}_x$  particles embedded in activated carbon, polycarbonate membranes, porous silicon or MCM-41 matrix. The structure and magnetic properties of composites were investigated. It is found that the pores morphology determines the magnitudes of coercive force and local anisotropy field of composite materials.

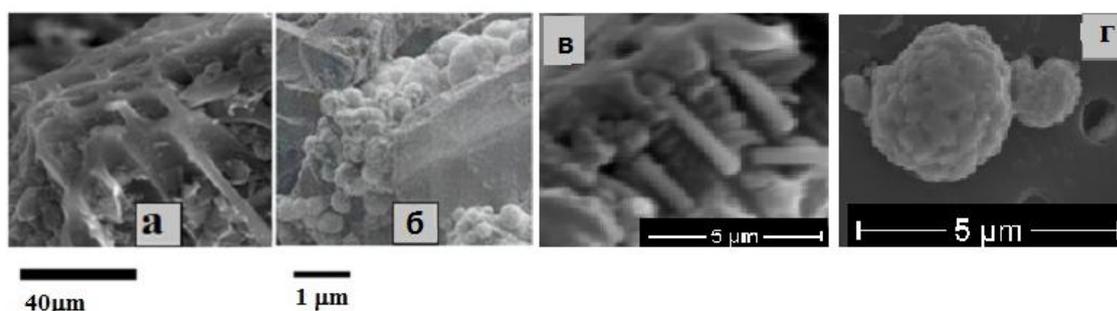
Методом химического осаждения синтезированы композиционные материалы на основе различных матриц (пористый кремний, трековые мембраны, активированный уголь, МСМ-41) с порами, заполненными частицами сплава  $\text{Co(P)}$ . Исследованы структурные и магнитные характеристики композитов. Установлено, что морфология пор определяет величину поля локальной анизотропии и коэрцитивной силы композитов.

В последние годы идет интенсивное исследование магнитных материалов, сочетающих механические, оптические, электрические свойства матриц со специфическими магнитными свойствами наночастиц. Это магнитные нити, стержни, формируемые осаждением малых частиц с требуемыми свойствами внутрь пор материала носителя, например, пористого кремния, трековых полимерных мембран, либо мембран на основе анодированного алюминия [1-2]. Такие материалы привлекают внимание благодаря потенциальным приложениям в магнитной записи, в качестве элементов магнитной логики, сенсорных устройств.

Метод химического осаждения для получения металлических нитей в пористые мембраны, имеет преимущество перед наиболее распространенным электрохимическим осаждением [3], так как не требует использования электролитических ячеек, осаждение металла начинается со стенок пор, следовательно, при подборе технологических режимов могут быть получены как сплошные стержни, так и полые трубки [4]. Ряд работ в литературе последних лет посвящен исследованию магнитной анизотропии нанонитей кобальта в различных матрицах (как основного фактора, определяющего магнитные свойства композитов) и возможности управлять ее величиной посредством изменения режимов осаждения [5]. Метод химического осаждения позволяет получать частицы кобальта с различной структурой (ГПУ, ГЦК, аморфная), а, следовательно, и различной величиной поля анизотропии. В нашей работе для выявления и разделения эффектов, связанных с межчастичным взаимодействием и эффектов, обусловленных взаимодействием с матрицей, было использовано несколько материалов матриц с различной морфологией пор при заполнении их частицами, синтезированными одним технологическим методом.

В качестве матриц были выбраны поликарбонатные мембраны с диаметрами цилиндрических пор от 0,1 до 4 мкм, пористый кремний с цилиндрическими и дендритными порами, активированный уголь и мезопористый материал МСМ-41. Частицы сплава  $Co_{100-x}P_x$  ( $4 < x < 18$ ), заполняющие поры всех используемых матриц, синтезировались методом химического осаждения, в качестве восстановителя использовался гипофосфит натрия. Полученные композиты изучались методами рентгеновской дифракции и электронной микроскопии. Измерения низкотемпературных и полевых зависимостей намагниченности выполнялись на вибрационном магнетометре в области полей от 0 до 14 кЭ и температур 80–300 К. Резонансные характеристики измерялись на стандартном спектрометре ЭПА-2М (частота 9,2 ГГц). Регистрировалась первая производная спектра поглощения.

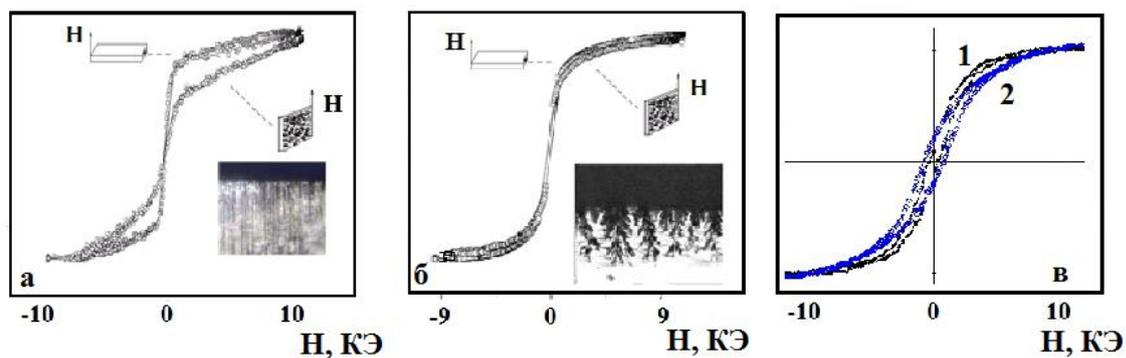
На рисунке 1 представлены РЭМ изображения исследуемых композиционных материалов из частиц  $Co(P)$ , осажденных в поры активированного угля и поликарбонатной трековой мембраны. Видно, что оба композита состоят из  $Co(P)$  частиц. Обработка изображений показала, что размер частиц определяется содержанием фосфора в сплаве (средний размер частиц уменьшается от 300 нм до 100 нм при увеличении содержания фосфора от 4 до 18 ат.%) и практически одинаков для всех используемых матриц. Установлено, что величина коэрцитивной силы  $Co(P)$  композитов на основе



**Рис.1.** РЭМ изображения активированного угля (а), композита  $C/Co(P)$  (б), поперечного среза поликарбонатной мембраны со столбиками  $Co(P)$  (в), поверхности композита на основе трековой мембраны (г)

линейных пор (пористый кремний, трековые мембраны  $H_c \sim 100$  Э) меньше аналогичной величины характерной для материалов с дендритными порами (кремний и активированный уголь) или  $Co(P)/MSM-41$  (в мезопористом  $SiO_2$  поры линейны, но с небольшим аспектным соотношением). Величина  $H_c$  для порошковых композитов определяется структурой  $Co(P)$  сплава. Наименьшее значение  $H_c \sim 100$  Э у порошков  $SiO_2/Co_{100-x}P_x$  с аморфным сплавом  $Co(P)$  при  $x > 12$  ат.%. Установлено, что величина коэрцитивной силы (рис.2) композитов с концентрацией фосфора менее 12 ат.% (1100 Э для  $SiO_2/Co(P)$ , в случае  $C/Co(P)$  - 650 Э) в несколько раз превышает значения  $H_c = 300$  Э, характерные для ультрадисперсных порошков  $Co(P)$  аналогичных составов, изготовленных тем же методом. Такое увеличение значения  $H_c$  связано с особенностями микромагнитной структуры, формирующейся при осаждении сплавов на основе кобальта в поры выбранных матриц. Для объяснения зависимостей магнитных характеристик композиционных материалов на основе сплавов кобальта от взаимодействия нанозерен в этих материалах использовалась модель случайной магнитной анизотропии. Кривые приближения намагниченности к насыщению всех исследуемых композитов с  $Co(P)$  частицами характеризуются акулоской зависимостью  $M(H) \sim 1/15(H_a/H)^2$  в полях больше  $5 \div 10$  кЭ, что позволило вычислить величину поля локальной магнитной анизотропии  $H_a$ . Установлено, что увеличение и диаметра пор, и содержания фосфора приводит к уменьшению величины  $H_a$ .

Кривые намагничивания, измеренные в разных геометриях эксперимента, выявили магнитную анизотропию в случае матриц с линейными порами, ориентированную вдоль оси нити, перпендикулярно поверхности мембраны (рис.2). Исследования характеристик спектров ферромагнитного резонанса позволили установить природу этой анизотропии как анизотропию формы. В случае дендритных пор такой анизотропии, как и ожидалось, не наблюдается.



**Рис.2.** Петли гистерезиса композита на основе кремния с различной морфологией пор: а – линейные поры, б - дендритные, и композиционного порошка  $C/Co_{100-x}P_x$  (в) 1- $X=14$ ; 2 –  $X=10$ .

Работа выполнена при поддержке РФФИ проект № 13-03-00476

#### Список литературы

- [1]. L. Piraux, S. Dubois and J. Colin, J. L. Duvail. // *Phys. Rev.*, (2000), В 61
- [2]. J. Martin, M. Hernandez-Velez, O. de Abril, et al. // *European Polymer J.*, (2012), v.48, p.712.
- [3]. L. Cattaneo, S. Franz, F. Albertini, P. Ranzieri // *Electrochim. Acta*, (2012), v.85, p.57.
- [4]. J. F. Rohan, D. P. Casey, et. al, // *Electrochem. Comm.*, (2008), v.10, 1419
- [5]. M. Darques, A. Encinas, L.Vila, L. Piraux. // *J.Phys.D : Appl. Phys.*, (2004), v.37, p. 1411