

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 538.245

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И МИКРОСТРУКТУРА ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ $Dy_{1-x}Nd_xCo_{4,5}Cu_{0,5}$

О.Б. Дегтева, Н.П. Супонев, А.Г. Пастушенков

*Тверской государственный университет,
кафедра магнетизма*

Изучены закономерности изменения магнитных свойств, микро- и доменной структуры сплавов $Dy_{1-x}Nd_xCo_{4,5}Cu_{0,5}$ ($x = 0,2-0,8$) в зависимости от содержания Nd. Рассчитаны константы, коэффициенты и поля магнитокристаллической анизотропии. Показано, что с увеличением концентрации Nd изменяется структурное состояние исследованных сплавов, что приводит к изменению характера процессов намагничивания и параметров одноосной магнитокристаллической анизотропии.

Общность закономерностей процессов намагничивания и перемагничивания сплавов редкоземельных металлов с кобальтом ($R(Co,M)_5$, $(R',R'')Co_5$ и $R-Zr-Co-Cu-Fe$) позволяет использовать их как для получения новой информации о формировании гистерезисных свойств гетерогенных магнетиков, так и изготовления на их основе постоянных магнитов с повышенной температурной стабильностью магнитной индукции ($(R',R'')Co_5$ и $(R',R'')-Zr-Co-Cu-Fe$, где R' легкие и R'' тяжелые РЗМ), используемых в новейших приборах и устройствах.

Существование спин-ориентационных переходов типа «легкая плоскость – легкая ось» бинарных соединений $NdCo_5$ и $DyCo_{5,2}$ не вызывает сомнения [1; 2]. В $NdCo_5$ он наблюдается в интервале температур 250 - 290 К, в $DyCo_{5,2}$ – вблизи температуры $T_{пер} \approx 360$ К. При комнатной температуре ориентация вектора M_s близка к кристаллографической оси c в первом случае, при 290 К вектор M_s незначительно отклонён от оси c во втором (рис. 1).

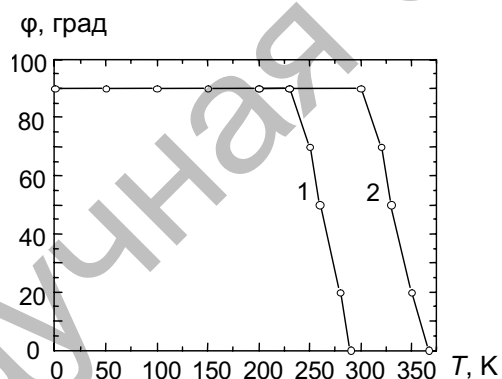


Рис. 1. Температурные зависимости угла φ между осью c и вектором M_s в сплавах $NdCo_5$ (1) и $DyCo_{5,2}$ (2)

В настоящей работе впервые исследованы интерметаллиды $Du_{1-x}Nd_xCo_{4,5}Cu_{0,5}$, содержащие диспрозий и неодим в редкоземельной подрешётке. По нашим предположениям в таких интерметаллидах должны сохраняться особенности магнитокристаллической анизотропии вышеуказанных бинарных соединений ($NdCo_5$ и $DyCo_{5,2}$).

Методом вибрационного магнитометра вдоль легкой и трудной осей намагничивания были измерены кривые намагничивания для псевдомонокристаллов сплавов $Du_{1-x}Nd_xCo_{4,5}Cu_{0,5}$ ($x = 0.2; 0.4; 0.6; 0.8$) (рис. 2). Образцы, аттестованные по стандартной методике, ориентировались в магнитном поле способом, принятым для магнетиков с анизотропией типа «легкая ось». Нелинейность кривых намагничивания, измеренных вдоль трудной оси, может свидетельствовать либо о неодноосном характере магнитокристаллической анизотропии, либо при одноосном характере анизотропии о возрастающем влиянии констант анизотропии более высоких порядков, чем первый.

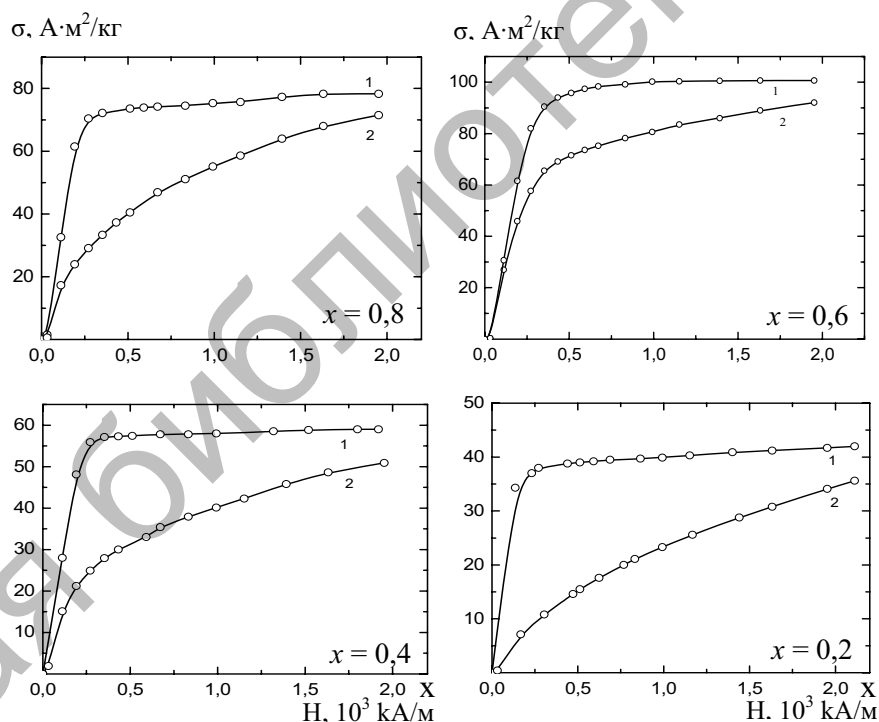


Рис. 2. Кривые намагничивания псевдомонокристаллов сплавов $Du_{1-x}Nd_xCo_{4,5}Cu_{0,5}$, измеренные вдоль легкой (1) и трудной (2) осей намагничивания

Для выяснения этого обстоятельства было исследовано изменение вида угловых зависимости намагниченности образцов каждого состава в процессе увеличения намагничивающего поля от 0 до

1200 кА/м. Алгоритм измерения угловых зависимостей выглядел следующим образом: 1) по максимуму измерительного сигнала в магнитном поле 800 кА/м находили положение оси легкого намагничивания; 2) образец намагничивали до насыщения в поле 1600 кА/м; 3) после уменьшения намагничивающего поля до выбранных фиксированных значений измерялись угловые зависимости $\sigma(\varphi)$. Установлено, что зависимости $\sigma(\varphi)$ имеют идентичный вид для всех составов сплавов. При изменении угла φ от 0° до 360° ярко выражены два максимума и два минимума, величина которых возрастает с увеличением внешнего магнитного поля (рис. 3). Необходимо отметить, что угловое расстояние между максимумами (и минимумами) составляет 180° , при этом соседние максимумы и минимумы отстоят друг от друга на 90° . Такой характер изменения угловых зависимостей намагниченности присущ магнетикам с анизотропией «лёгкая ось».

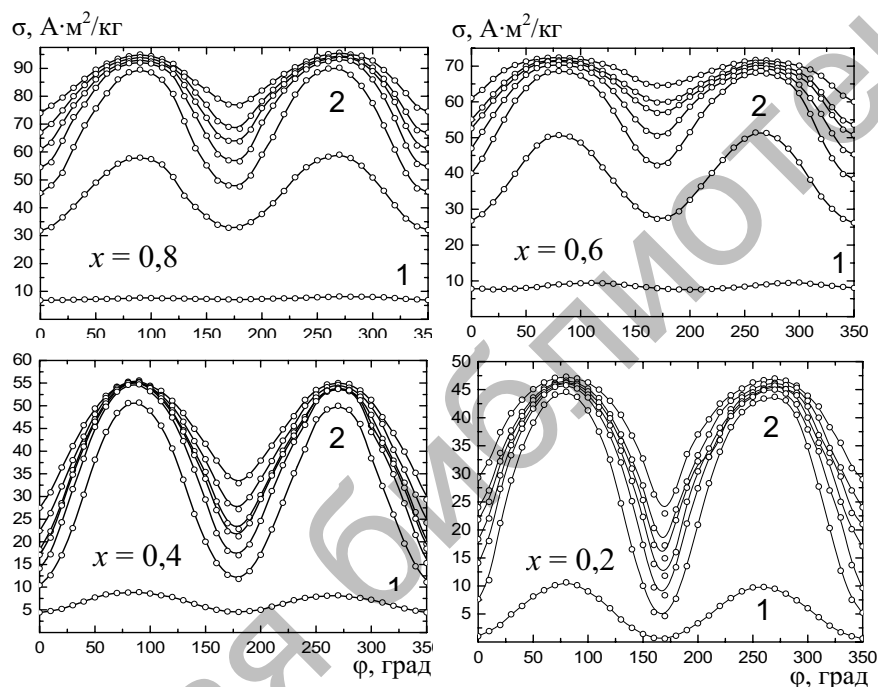


Рис. 3. Угловые зависимости намагниченности псевдомонокристаллов сплавов $Du_{1-x}Nd_xCo_{4.5}Cu_{0.5}$, измеренные в нулевом внешнем поле (1) и при его постепенном увеличении от 160 до 1200 кА/м (2)

Необходимо отметить, что концентрационная зависимость удельной намагниченности, построенная для $\varphi=160^\circ$ в поле ~ 1200 кА/м (рис. 3) имеет вид, аналогичный концентрационной зависимости намагниченности насыщения исследуемых образцов (рис. 4).

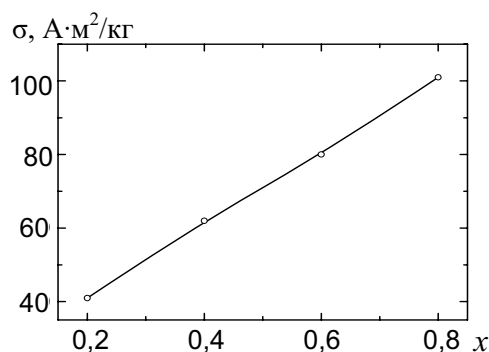


Рис. 4. Зависимость удельной намагниченности насыщения σ_s сплавов $Dy_{1-x}Nd_xCo_{4,5}Cu_{0,5}$ от содержания неодима

С увеличением содержания неодима в сплавах σ_s возрастает. Это можно объяснить на основе модели магнитной структуры с тремя магнитными подрешетками: кобальта, диспрозия и неодима. Магнитный момент подрешетки кобальта (M_{Co}) постоянен, так как концентрация кобальта в рассматриваемых соединениях не меняется. Известно, что обменное взаимодействие внутри кобальтовой подрешетки в данной группе интерметаллидов в основном определяет значения их намагниченности насыщения, температуры Кюри. Магнитный момент диспрозиевой подрешетки (M_{Dy}) антипараллелен M_{Co} , так как соединения $Dy(Co,Cu)_{5,2}$ являются ферримагнетиками. Магнитный момент подрешетки неодима (M_{Nd}) незначителен по величине и направлен параллельно магнитному моменту кобальтовой подрешетки, поскольку сплав $NdCo_5$ ферромагнитен (рис. 5). В соответствии с описываемой моделью полный магнитный момент сплавов $Dy_{1-x}Nd_xCo_{4,5}Cu_{0,5}$, приходящийся на одну формульную единицу, определяется из соотношения

$$M = 4,5\mu_{Co} + x\mu_{Nd} - (1-x)\mu_{Dy},$$

где μ_{Co} , μ_{Nd} , μ_{Dy} – магнитные моменты атомов Co, Nd и Dy. По мере замещения части атомов Dy атомами Nd магнитный момент подрешетки Dy уменьшается, а подрешетки Nd растет. Суммарный магнитный момент возрастает с увеличением x.

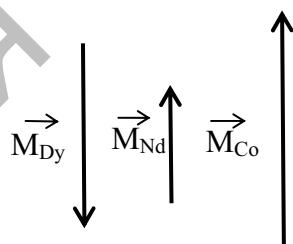


Рис. 5. Магнитные моменты подрешеток Dy, Nd, Co

В работе исследована микроструктура гомогенизированных сплавов $Dy_{1-x}Nd_xCo_{4,5}Cu_{0,5}$, выявленная методом химического травления. Для всех сплавов, кроме составов с наибольшим содержанием неодима $x = 0,8$, выявляются две основные фазовые составляющие – светлая и

темная. Размытые границы между фазовыми составляющими позволяют предположить, что они близки по химическому составу и, как и в других родственных сплавах $R(\text{Co},\text{Cu})_5$, отличаются вариациями концентраций неодима и меди. Сплав с $x = 0,8$ находится в однофазном состоянии. Относительное содержание темной фазы в сплавах, определенное методом Глаголева, растет с увеличением содержания неодима (рис. 6).

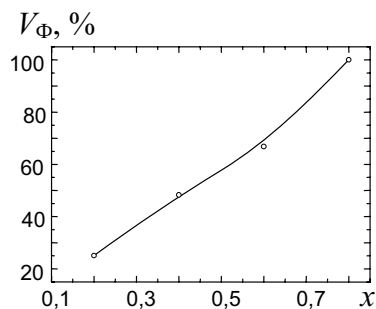


Рис. 6. Зависимость относительного содержания темной фазы в сплавах $\text{Dy}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Co}_{4,5}\text{Cu}_{0,5}$ от x

Изображения доменной структуры (ДС) на базисных плоскостях образцов сплавов $\text{Dy}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Co}_{4,5}\text{Cu}_{0,5}$, полученные методом полярного эффекта Керра, приведены на рис. 7 (увеличение 336 при $x=0,8$, 679 – 0,6 и 850 – 0,4 и 0,2 соответственно), где также хорошо заметны и фазовые составляющие. Домены имеют вытянутую клиновидную форму (для сплава с $x = 0,8$), в ряде случаев они наблюдаются в сочетании с более мелкой ДС типа “мозаики” ($x = 0,6$). Для сплавов с $x = 0,4$ и 0,2 преобладает структура мелких извилистых поверхностных доменов, характерных для одноосных редкоземельных интерметаллидов.

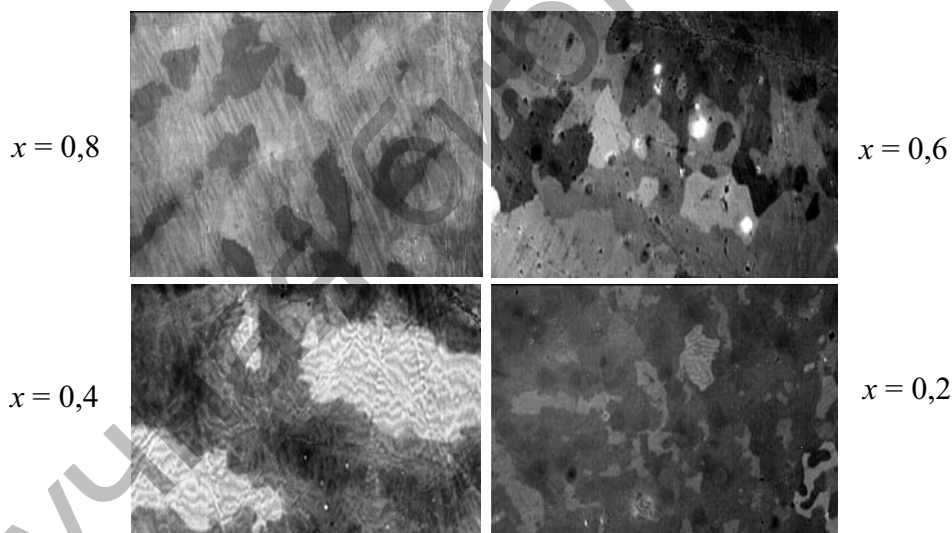


Рис. 7. Доменная структура на базисной плоскости образцов сплавов $\text{Dy}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Co}_{4,5}\text{Cu}_{0,5}$, выявленная магнитооптическим методом Керра

На рис. 8 представлены картины ДС, выявленной методом Керра на призматических плоскостях образцов (увеличение 336 при $x=0,8$ и $0,6$ и 679 при $x=0,4$ и $0,2$). Вид ДС подтверждает существование в сплавах фаз, близких по химическому составу. При увеличении содержания неодима ДС в целом измельчается. Во всех случаях на пределе разрешения оптического микроскопа наблюдаются участки с доменами крайне малого размера.

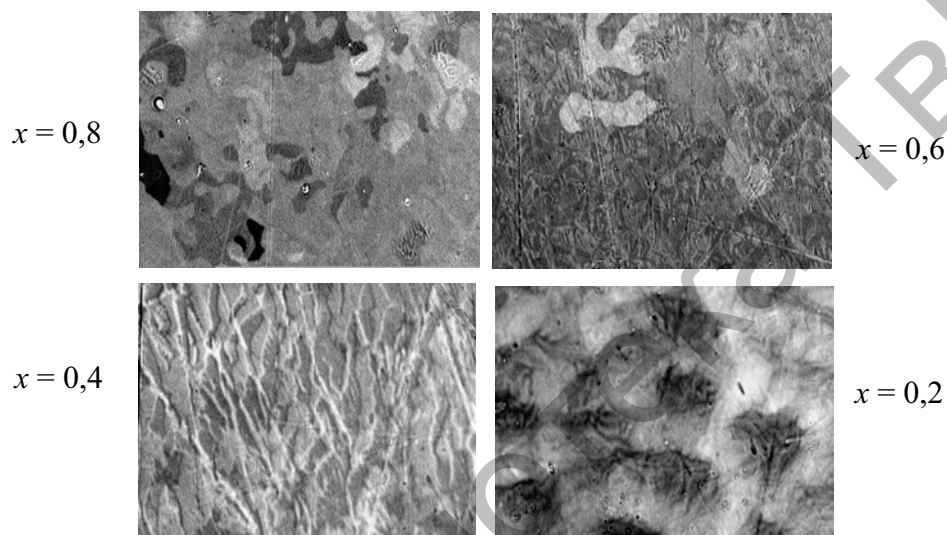


Рис. 8. Доменная структура, выявленная магнитооптическим методом на призматической плоскости образцов сплавов $Dy_{1-x}Nd_xCo_{4,5}Cu_{0,5}$

Для выявления измельчённой ДС был использован атомно-силовой микроскоп (рис. 9). Она представлена также клиновидными ($x = 0,8$ – размер кадра 8×8 мкм; $0,6$ – 15×15 мкм) и разветвлёнными доменами ($x = 0,4$ размер кадра 20×20 мкм; $0,2$ – 30×30 мкм) с рядами мелких замыкающих доменов. Клиновидные домены вытянуты в одном преимущественном направлении, соответствующем ориентации вектора M_s вдоль ОЛН.

Результаты измерений угловых зависимостей намагниченности и исследования ДС указывают на одноосный характер магнитной анизотропии $Dy_{1-x}Nd_xCo_{4,5}Cu_{0,5}$ при комнатной температуре. Были также определены константы, коэффициенты и поля анизотропии для всех исследуемых составов. При расчетах была использована созданная на кафедре магнетизма компьютерная программа, позволяющая учитывать различное число членов разложения в ряд энергии магнитокристаллической анизотропии E_A двумя альтернативными способами: по возрастающим степеням направляющих синусов углов между вектором M_s и ОЛН, и по сферическим гармоникам.

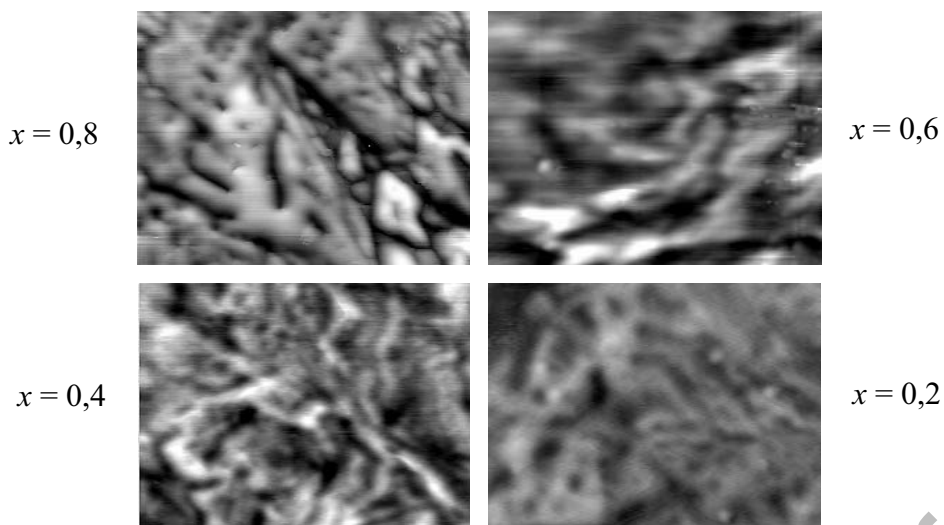


Рис. 9. Доменная структура сплавов $Dy_{1-x}Nd_xCo_{4.5}Cu_{0.5}$, выявленная на базисной плоскости с помощью атомно-силового микроскопа

Результаты расчетов с учётом одного, двух или трёх членов разложения в ряд E_A представлены на рис. 10. Во всем исследованном интервале концентраций первая константа анизотропии $K_1 > 0$, а первый коэффициент $\chi_1 < 0$, что свидетельствует об анизотропии “легкая ось”. Значение K_1 растет с увеличением содержания неодима.

Для сплавов с содержанием неодима $x < 0,8$ три константы K_1 , K_2 и K_3 имеют близкие значения, что подтверждает предположение о возрастающем вкладе в энергию магнитокристаллической анизотропии сплавов членов разложения более высоких порядков. Полученные результаты показывают, что значения констант анизотропии сильно зависят от числа учитываемых членов разложения в ряд энергии анизотропии, а коэффициенты анизотропии практически не зависят от количества членов ряда. Значения полей магнитокристаллической анизотропии для всех составов сплавов были определены по формуле $H_A = 2K_1 / M_s$, справедливой в случае анизотропии типа “легкая ось”, с использованием результатов рис. 10, а.

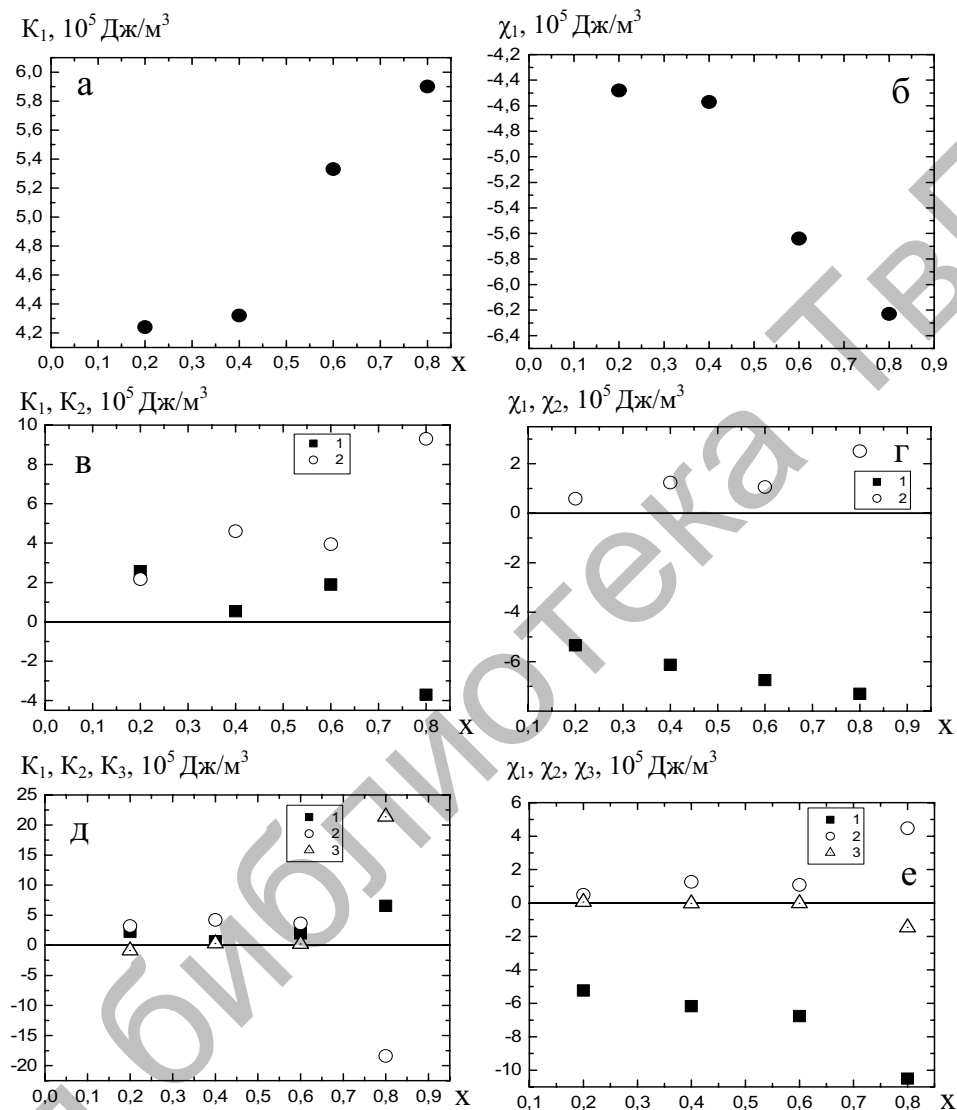


Рис. 10. Значения констант и коэффициентов анизотропии рассчитанные для сплавов $Dy_{1-x}Nd_xCo_{4.5}Cu_{0.5}$ с различным содержанием неодима: 1 – K_1 , 2 – K_2 , 3 – K_3 (а, в, д); 1 – χ_1 , 2 – χ_2 , 3 – χ_3 (б, г, е)

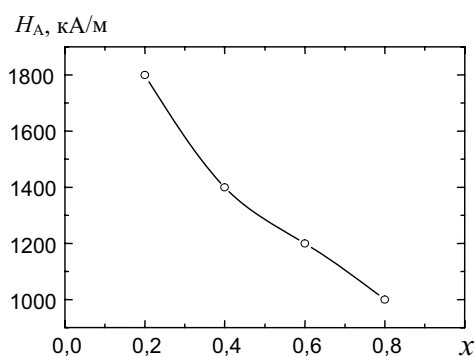


Рис. 11. Зависимость поля магнитокристаллической анизотропии H_A сплавов $Dy_{1-x}Nd_xCo_{4,5}Cu_{0,5}$ от содержания неодима

Зависимость полей анизотропии от содержания неодима в сплавах представлена на рис. 11. Значения H_A уменьшаются при увеличении x , что согласуется с результатами магнитных измерений (рис. 2). Кроме того, поскольку сплав $NdCo_5$ обладает самыми низкими значениями поля анизотропии из всех интерметаллидов RCo_5 ($H_A=2400$ кА/м), то уменьшение поля анизотропии в исследуемых сплавах с увеличением содержания неодима становится понятным.

Результаты проведенных комплексных исследований магнитных свойств сплавов $Dy_{1-x}Nd_xCo_{4,5}Cu_{0,5}$ ($x = 0.2; 0.4; 0.6; 0.8$) свидетельствуют, что с увеличением концентрации неодима существенно изменяется их структурное состояние, что приводит к изменению характера процессов намагничивания и параметров одноосной магнитокристаллической анизотропии.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №05-02-17197 и гранта Минобрнауки России РНП.2.1.1.3674.

Список литературы

1. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. М.: Мир, 1987. С. 304-306.
2. F.Y.Zhang, D.Gignoux, D.Schmitt. High field induced first order magnetization process in single crystal $NdCo_5$ //J. Magn. Mater. 1994. V. 136. P. 245-250.