

УДК 538.221

## МАГНИТНАЯ АНИЗОТРОПИЯ СОЕДИНЕНИЙ $R_2Fe_{14-x}Co_xV$ ( $R=Nd, Y$ )

**А.А. Рыбак, К.П. Скоков, Н.П. Супонев, Ю.Г. Пастушенков**

Кафедра магнетизма

Синтезированы интерметаллические соединения  $Nd_2Fe_{14-x}Co_xV$  и  $Y_2Fe_{14-x}Co_xV$  с тетрагональной кристаллической структурой при содержании кобальта  $x = 0 - 6$  и разработана технология получения на их основе монокристаллических образцов. Построены температурные зависимости двух констант и коэффициентов анизотропии для исследованных соединений. Показано, что магнитокристаллическая анизотропия соединений  $Nd_2Fe_{14-x}Co_xV$  удовлетворительно описывается температурной зависимостью анизотропии  $4f$ -ионов редкоземельной (РЗМ) подрешетки. Хорошее соответствие наблюдается при  $T < 135$  К.

Постоянные магниты на основе  $Nd_2Fe_{14}V$  до сегодняшнего дня удерживают первенство по максимальному энергетическому произведению  $BH_{max}$ , что поддерживает постоянный интерес к этому типу соединений [1-5]. Для физических исследований фундаментальных характеристик подобных материалов необходимы монокристаллические образцы.

Получение крупных монокристаллических образцов фазы  $Nd_2Fe_{14}V$  традиционными методами сопряжено с большими трудностями, т.к. нужная фаза получается в результате перитектической реакции. В связи с этим в данной работе проведено исследование возможностей получения монокристаллов с помощью нового метода, использующего гидрирование сплава перед отжигом.

Было установлено, что гидрирование сплавов позволяет значительно увеличивать массу получаемых монокристаллов. Оказалось, что для значительного ускорения процесса гидрирования необходима температура 150-200 °С. Предварительно поверхность слитка механически очищалась от окислов, затем слиток дробился в порошок с размерами частиц 0,1 - 1 мм и помещался в установку для гидрирования. Масса одной загрузки составляла ~ 100 г.

Для выращивания монокристаллов использовалась шахтная печь сопротивления типа СШВЛ. Процесс проводился в вакууме не хуже  $10^{-5}$  мм рт. ст. по следующему режиму: нагрев до температуры 1300 °С в течение часа, выдержка 20 минут, быстрое снижение температуры до 1180 °С в течение 30 мин, затем плавное охлаждение в течение 12 и более часов до 950 °С. Слитки, подвергнутые такой обработке, представляли собой сростки монокристаллов, разделенных достаточно большими порами. Монокристаллы имели форму пластинок и призм с квадратным сечением, были ограничены поверхностями роста и извлекались из слитка.

Для адекватного определения констант анизотропии необходимо использовать малые магнитные поля, поскольку использование высоких магнитных полей приводит к значительному вкладу в значения определяемых

констант. Константы, определяемые из экспериментальных данных, получаемые в больших полях, могут быть использованы для исследования межподрешеточных взаимодействий или взаимодействий ионов с внешним магнитным полем. Для корректного описания магнитной анизотропии кристалла необходимо при измерениях использовать малые магнитные поля, однако, в этом случае необходимо использовать методику определения констант анизотропии, учитывающую доменную структуру кристалла [6].

На рис. 1 показаны температурные зависимости первой константы и первого коэффициента анизотропии. Из рис. 1, а следует, что наибольшую анизотропию при комнатной температуре имеет соединение  $Y_2Fe_{12}Co_2B$ . Так, при увеличении концентрации кобальта при комнатной температуре анизотропия возрастает, а затем уменьшается. Видно, что с увеличением концентрации кобальта температурная зависимость становится более полой, растет температура Кюри соединения.

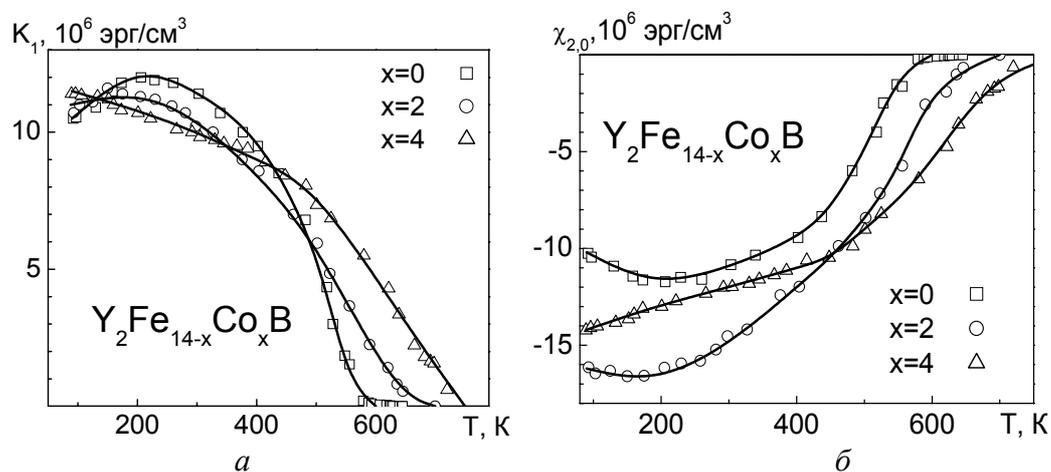


Рис. 1. Температурная зависимость первой константы анизотропии (а) и первого коэффициента анизотропии (б) соединений  $Y_2Fe_{14-x}Co_xB$

Для сравнения магнитных свойств  $3d$ -подрешетки исследуемых соединений температурные зависимости  $K_1(T)$  и  $\chi_{2,0}(T)$  были приведены к температуре Кюри. Как следует из рис. 2, а, б от  $T_c$  до  $0,3 \cdot T_c$  наибольшей анизотропией обладает соединение  $Y_2Fe_{14}B$ . При температурах, меньших  $0,3 \cdot T_c$  ситуация изменяется – высокоанизотропным соединением является  $Y_2Fe_{10}Co_4B$ . Таким образом, замещение железа на кобальт приводит к уменьшению анизотропии, но повышает температурную стабильность магнитокристаллической анизотропии  $3d$ -подрешетки.

Как видно из рис. 3, а при температурах, выше 350 К, наибольшей анизотропией обладает соединение  $Nd_2Fe_{12}Co_2B$ , но в области низких температур более анизотропными являются соединения  $Nd_2Fe_8Co_6B$  и  $Nd_2Fe_{14}B$ . Если характеризовать анизотропию с помощью  $\chi_{2,0}$  (рис. 6, б), то наибольший по модулю коэффициент анизотропии у соединения  $Nd_2Fe_{12}Co_2B$  во всем температурном интервале исследования.

Для оценки анизотропных свойств магнетиков с точки зрения подрешеточных взаимодействий были построены  $K_1(T)$  и  $\chi_{2,0}(T)$ . Как следует из рис. 4, а, максимум на кривых  $K_1(T)$  смещается с увеличением концентрации кобальта в низкотемпературную область.

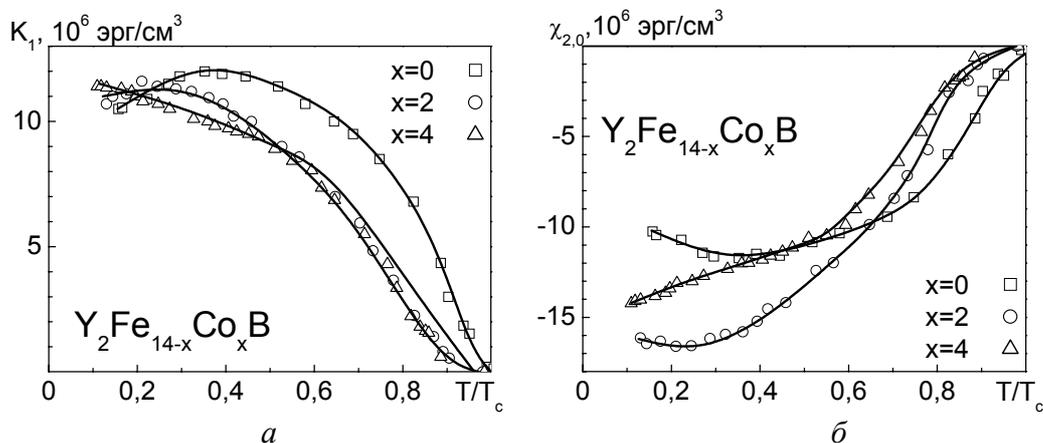


Рис. 2. Температурная зависимость первой констант анизотропии (а) и первого коэффициента анизотропии (б) соединений  $Y_2Fe_{14-x}Co_xB$ . Значения температуры приведены к температуре Кюри

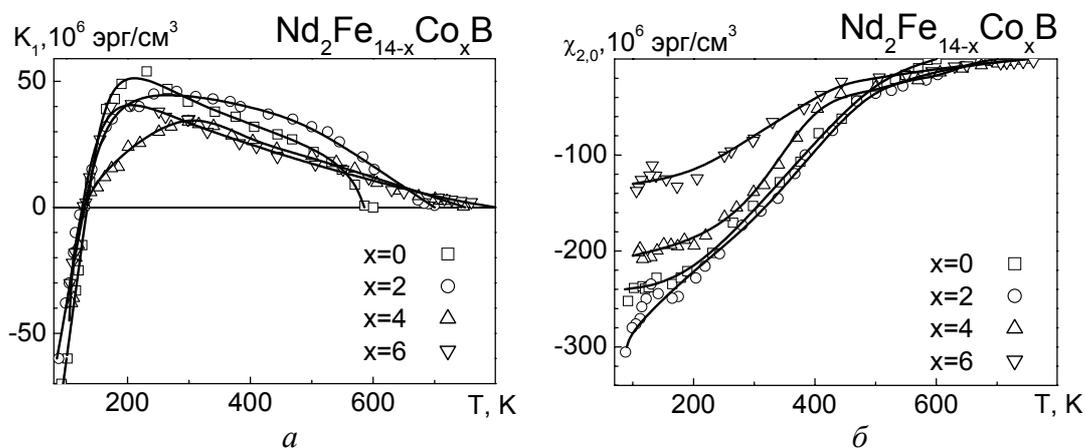


Рис. 3. Температурные зависимости первых констант (а) и коэффициентов (б) анизотропии соединений  $Nd_2Fe_{14-x}Co_xB$

На рис. 5 приведены зависимости  $K_2(T)$  (а) и  $\chi_{4,0}(T)$  (б) соединений  $Nd_2Fe_{14-x}Co_xB$ . Как следует из рис. 5, а при увеличении концентрации кобальта температура, при которой  $K_2$  становится отличной от нуля, возрастает. Температурные зависимости второй константы у  $Nd_2Fe_{14}B$  и  $Nd_2Fe_{12}Co_2B$  схожи, однако в области низких температур значение  $K_2$  соединения  $Nd_2Fe_{12}Co_2B$  больше.

После перечисленных построений зависимостей оказалось интересным исследовать зависимости  $K_2(T)$  и  $\chi_{4,0}(T)$ , приведенные к температуре Кюри.

Полученные  $K_2(T)$  и  $\chi_{4,0}(T)$  представлены на рис. 6. Видно, что при увеличении количества замещений железа кобальтом температурные зависимости становятся более пологими и смещаются в низкотемпературную область по шкале  $T/T_c$ .

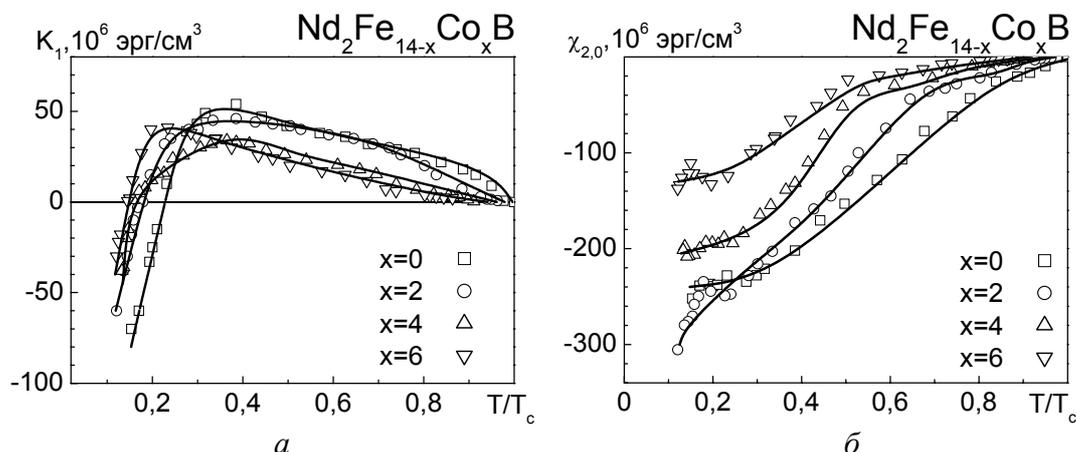


Рис. 4. Температурные зависимости первых констант (а) и коэффициентов (б) анизотропии соединений  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14-x}\text{Co}_x\text{B}$ , приведенные к температуре Кюри

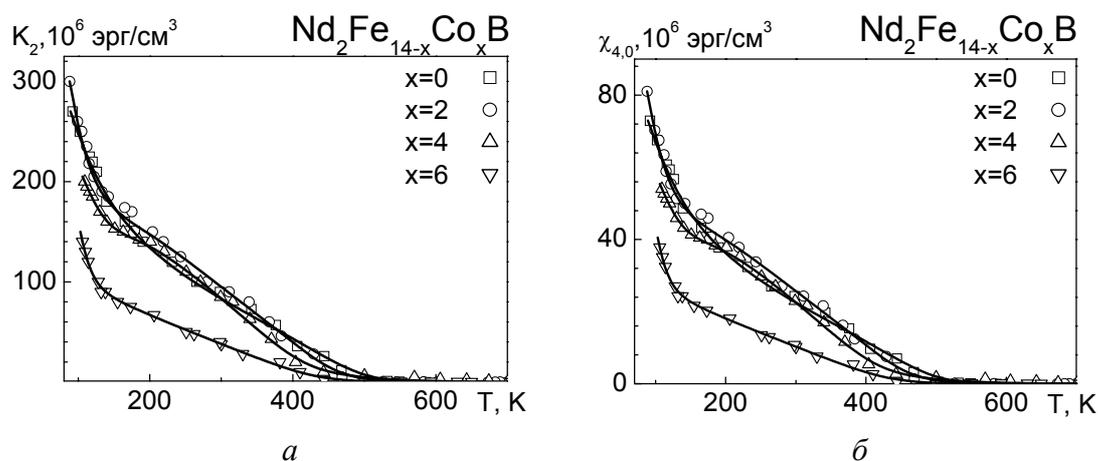


Рис. 5. Температурные зависимости первых констант (а) и коэффициентов (б) анизотропии соединений  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14-x}\text{Co}_x\text{B}$

На рис. 7 показана магнитная фазовая диаграмма для соединений  $\text{Y}_2\text{Fe}_{14-x}\text{Co}_x\text{B}$ . Диаграмма построена с помощью двух первых коэффициентов анизотропии. Видно, что фазовые траектории всех исследованных соединений находятся в области, соответствующей анизотропии типа «легкая ось».

Представленная на рис. 8 диаграмма показывает зависимость положения осей легкого намагничивания от значения коэффициентов магнитной анизотропии. Видно, что для образцов, в которых имеет место магнитный фазовый переход, траектории проходят через линию, разделяющую области, соответствующую анизотропии «легкая ось» и «легкий конус».

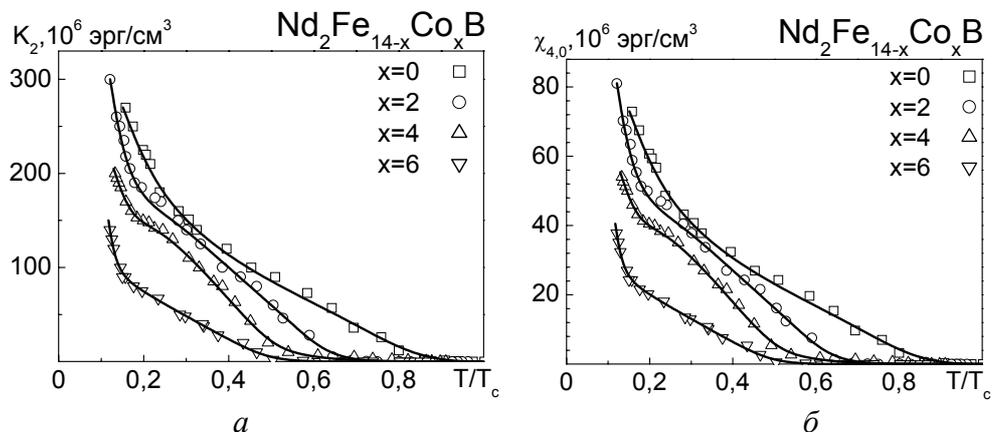


Рис. 6. Температурные зависимости вторых констант (а) и коэффициентов (б) анизотропии соединений  $Nd_2Fe_{14-x}Co_xB$ , приведенные к температуре Кюри

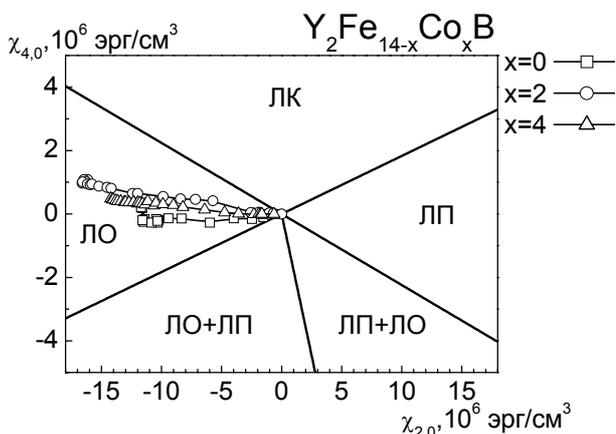


Рис. 7. Магнитная фазовая диаграмма соединений  $Y_2Fe_{14-x}Co_xB$ , построенная с учетом первых двух коэффициентов анизотропии

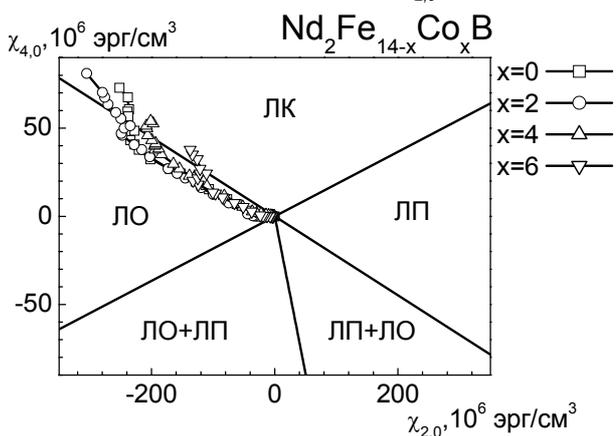


Рис. 8. Магнитная фазовая диаграмма соединений  $Nd_2Fe_{14-x}Co_xB$ , построенная с учетом первых двух коэффициентов анизотропии

Для дальнейшего анализа из кривой температурной зависимости первой константы анизотропии соединения  $Nd_2Fe_{14-x}Co_xB$  вычиталась кривая  $K_1(T)$  соединения  $Y_2Fe_{14-x}Co_xB$  для значений  $x = 0, 2, 4$ . В результате были получены кривые, представленные на рис. 9, на которых вертикальными отрезками

показаны интервалы ошибок. В области низких температур ( $T < 150$  К) наблюдается хорошее совпадение всех зависимостей.

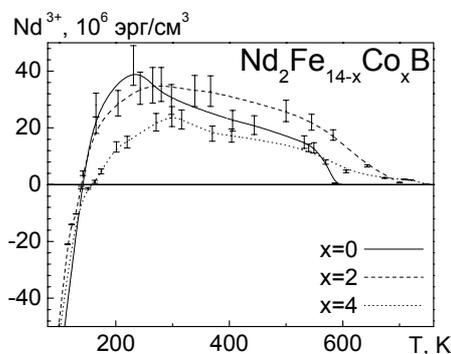


Рис. 9. Температурная зависимость анизотропии подрешетки  $\text{Nd}^{3+}$

Однако при увеличении температуры для кривых  $K_1(T)$  возникает разница, которая при некоторых температурах может достигать значений порядка 50 %.

Таким образом, приходим к выводу, что при низких температурах можно описывать анизотропию соединений  $\text{R}_2\text{Fe}_{14-x}\text{Co}_x\text{B}$  в рамках одноионной модели, а при высоких температурах это необходимо делать с определенной осторожностью, потому что теоретическая одноионная модель МКА может некорректно определять температурные зависимости констант анизотропии.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 02-02-16523 и программы "Университеты России" (проект УР 01.01.054)

#### Литература

1. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. М.: Высшая школа, 1981.
2. Белов К.П. Редкоземельные магнетики и их применение. М.: Наука, 1980.
3. Никитин С.А. Магнитные свойства редкоземельных металлов и их сплавов. М.: МГУ, 1989. С. 248.
4. Rare-earth Iron Permanent Magnets / Ed. J.M.D. Coey. Clarendon Press. Oxford, 1996.
5. Coey J.M.D., Li H.S., Gavigan J.P., Cadogan J.M., Hu B.P. Intrinsic magnetic properties of iron-rich compounds with the  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  or  $\text{ThMn}_{12}$  structure / Concerted European Action on Magnets [CEAM]. Elsevier Applied Science. London-New York, 1989. P. 76-97.
6. Рыбак А.А., Супонев Н.П. Метод определения констант анизотропии из кривых вращающих моментов в полях, сравнимых по величине с размагничивающим полем образца // Вестн. ТвГУ. 2004. Вып. 4(6). С. 38-42.