

УДК 537.622

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$

© 2024 г. А. И. Синкевич^{1,*}, М. Б. Ляхова¹, А. Ю. Карпенков¹, Е. М. Семенова¹,
Д. Ю. Карпенков², Ю. Г. Пастушенков¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тверской государственный университет», Тверь, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

* E-mail: Sinkevich.AI@tversu.ru

Поступила в редакцию 04.12.2023

После доработки 20.12.2023

Принята к публикации 29.01.2024

Представлены результаты анализа кривых намагничивания соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$, измеренных в температурном интервале 300–923 К вдоль направлений легкого и трудного намагничивания. Рассчитаны константы магнитокристаллической анизотропии $K_{1,2}$ образцов. Обсуждаются концентрационные и температурные зависимости констант анизотропии $K_{1,2}$, а также намагниченности насыщения M_s . Показано, что с увеличением относительного содержания железа в образцах наблюдается рост первой константы анизотропии K_1 с максимумом $5.1 \cdot 10^5$ Дж·м⁻³ при $x = 0.29$.

Ключевые слова: магнитокристаллическая анизотропия, константы магнитокристаллической анизотропии, намагниченность, редкоземельные интерметаллиды

DOI: 10.31857/S0367676524050228, EDN: QDPNNG

ВВЕДЕНИЕ

Редкоземельные интерметаллиды на основе 3d- и 4f-переходных металлов демонстрируют выдающиеся магнитные свойства, фундаментальная природа которых обсуждается до настоящего времени. Среди большого разнообразия этих соединений выделяются составы на основе редкоземельных металлов (R) с железом (R-Fe) и кобальтом (R-Co), которые характеризуются высокой спонтанной намагниченностью, магнитокристаллической анизотропией (МКА), магнитоотрицательной и температурой Кюри и поэтому используются как основа для высокоэнергетических постоянных магнитов, магнитоотрицательных и магнитокалорических материалов [1–4].

В данной работе рассматриваются соединения Y_2M_{17} ($M = Fe, Co$), для которых обменные взаимодействия 3d-подрешетки обладают наибольшей интенсивностью и определяют их температуру Кюри. Соединения Y_2Fe_{17} и Y_2Co_{17} имеют гексагональную структуру и являются коллинеарными ферромагнетиками, магнитные моменты которых лежат в базисной плоскости [5,6]. Таким образом, бинарные интерметаллиды Y_2Fe_{17} и Y_2Co_{17} характеризуются МКА типа «легкая плоскость» с отрицательными значениями первых констант МКА: $K_1(Y_2Fe_{17}) = -0.4$ МДж·м⁻³ [7] и $K_1(Y_2Co_{17}) = -0.38$ МДж·м⁻³ [8] соответственно. Однако для квазибинарных соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$, в которых кобальт частично замещается на железо,

тип МКА определяется относительным содержанием железа и кобальта, что при определенных концентрациях приводит к формированию магнитного порядка, соответствующего другим типам МКА [9–12].

Магнитокристаллическая анизотропия $R_2(Co_{1-x}Fe_x)_{17}$ формируется благодаря сочетанию вкладов подрешеток переходного и редкоземельного металлов. В работе [13] представлена фазовая диаграмма магнитной анизотропии $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$, согласно которой при комнатной температуре соединения с $x < 0.07$ и $x > 0.5$ имеют МКА типа «легкая плоскость», тогда как в интервале концентраций $0.07 \leq x \leq 0.5$ характеризуются МКА типа «легкая ось» [14, 15]. Кроме того, в [11, 15] сообщалось, что переход от «легкой плоскости» к «легкой оси» в крайних точках концентрационного интервала может происходить через магнитоупорядоченное состояние, соответствующее МКА «легкий конус».

Поскольку иттрий немагнитен, магнитные свойства этих соединений полностью обусловлены магнетизмом подрешеток Co и Fe [13]. При этом температура Кюри монотонно снижается с увеличением содержания железа, а значение намагниченности насыщения, в свою очередь, увеличивается. Таким образом, путем замещения 3d-компонентов в $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ можно контролировать некоторые фундаментальные константы и их температурное поведение. В связи с вышеизложенным, в данной работе была поставлена задача провести комплексный анализ концентрационных и температурных зависимостей констант МКА

соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ в интервале концентраций, соответствующих анизотропии типа «легкая ось».

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исходные образцы $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ ($x = 0.03–0.5$) получены методом индукционной плавки в атмосфере

аргона из высокочистых компонентов. Исследуемые соединения образуются конгруэнтно [16, 17], что позволяет получать образцы в однофазном состоянии после выплавки. Фазовый анализ и кристаллическая структура образцов анализировались методом рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-7.0 (излучение $Cu-K\alpha$). Измерения кривых намагничивания выполнялись методом вибрационного магнитометра

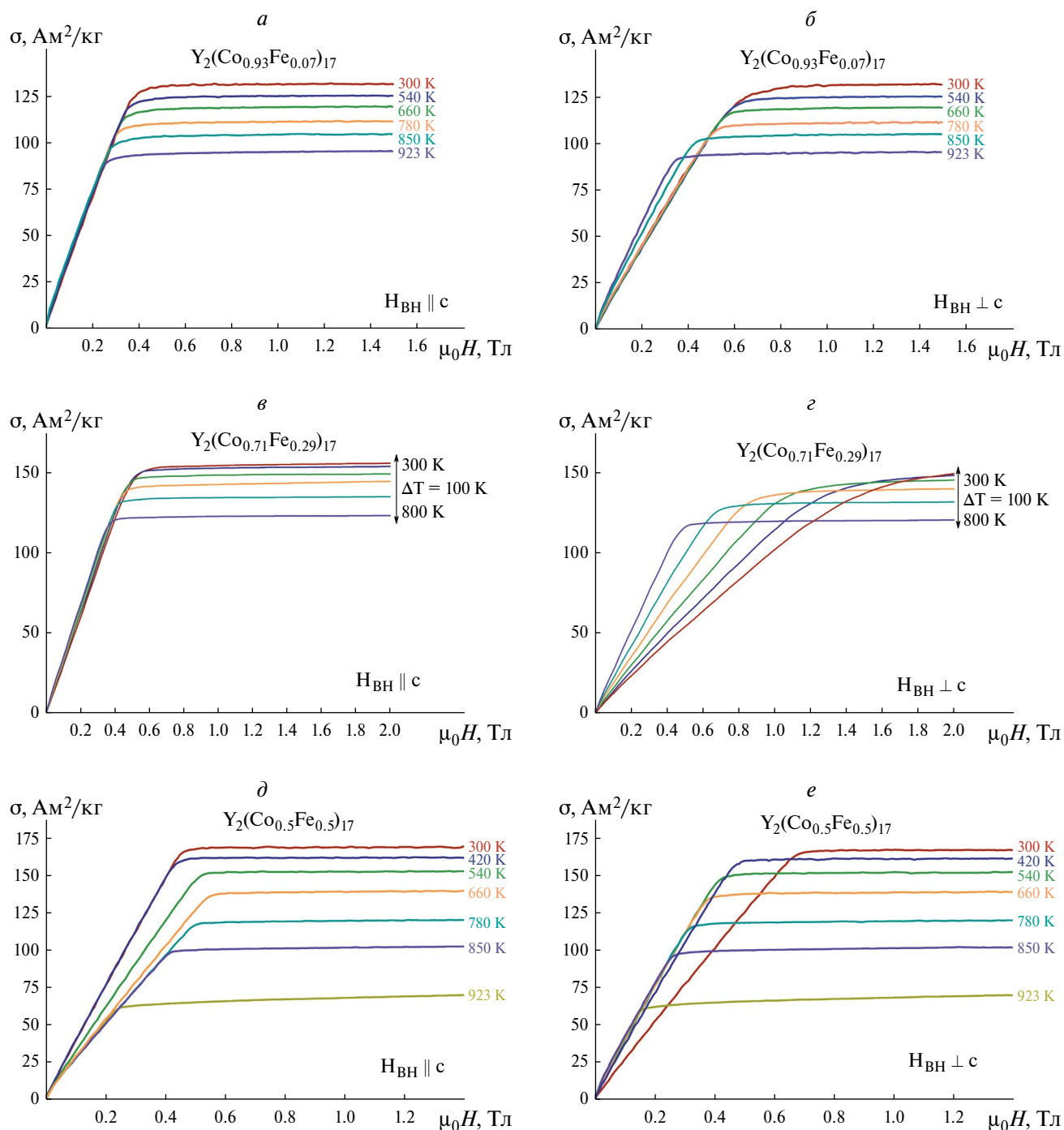


Рис. 1. Кривые намагничивания, полученные для соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ ($x = 0.07, 0.29, 0.50$) при температурах $T = 300–923$ К вдоль (а, в, д) и перпендикулярно (б, г, е) оси легкого намагничивания.

в полях до 2.5 Тл в температурном интервале 300—923 К на образцах сферической формы в двух направлениях: вдоль оси легкого и трудного намагничивания. Ось трудного намагничивания для МКА типа «легкая ось» соответствует направлению вдоль кристаллографической оси c , а для МКА типа «легкая плоскость» — направлению перпендикулярному оси c .

Для определения констант МКА применялся метод Сексмита — Томпсона. Кривые намагничивания вдоль трудной оси перестраивались в координатах истинного поля с использованием соотношения (1) для учета фактора формы образца N . Затем полученные графики перестраивались в координатах $H_i/M_s(M_s^2)$ и для них определялись секущие с учетом формы изначальной кривой намагничивания [18]. По координатам и углу наклона получившейся секущей рассчитывались константы анизотропии соединений.

$$H_i = H_e - NM, \quad (1)$$

где M — намагниченность, N — размагничивающий фактор образца, H_e — внешнее магнитное поле, H_i — истинное поле, в котором находится образец.

Полевые зависимости намагниченности, измеренные вдоль и перпендикулярно оси легкого намагничивания для составов с $x = 0.07, 0.29$ и 0.5 в диапазоне температур 300—923 К, представлены на рисунках 1а—1е. Путем сопоставления кривых намагничивания вдоль и перпендикулярно оси c можно сделать вывод об анизотропии соединения. Определение констант МКА анизотропных образцов проводилось методом Сексмита — Томпсона по соотношениям

$$\frac{H_e}{M_{ab}} = \frac{2K_1}{M_s^2} + N_{ab} + \frac{4K_2}{M_s^4} M_{ab}^2, \quad (2)$$

$$\frac{H_e}{M_c} = -\frac{2K_1 + 4K_2}{M_s^2} + N_c + \frac{4K_2}{M_s^4} M_c^2, \quad (3)$$

где M_s — намагниченность насыщения, M_c — намагниченность, измеренная вдоль оси c , M_{ab} — намагниченность, измеренная вдоль плоскости ab , N_c — размагничивающий фактор вдоль оси c , N_{ab} — размагничивающий фактор вдоль плоскости ab .

Данные, полученные из магнитных измерений, а также результаты расчета констант анизотропии

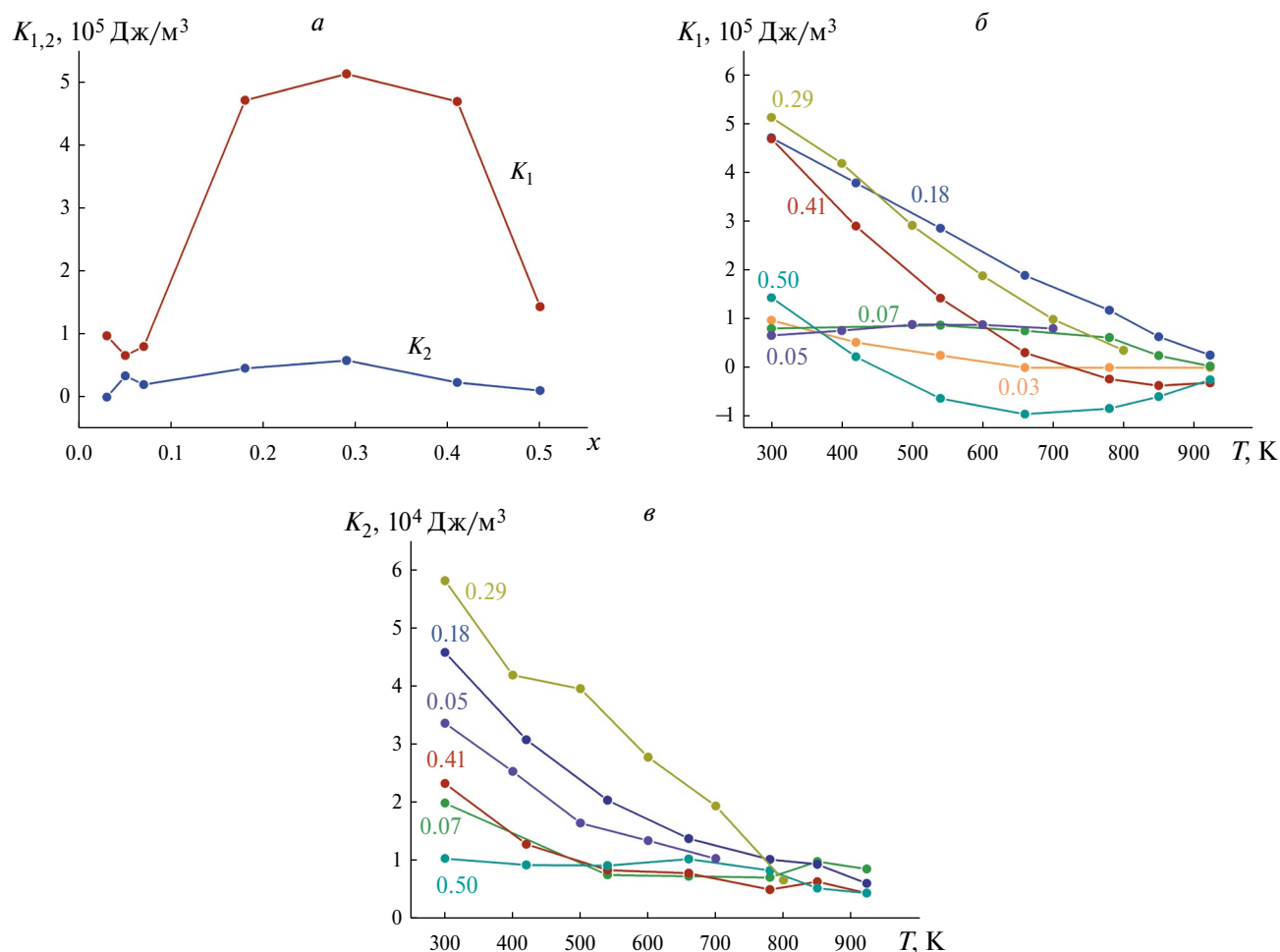


Рис. 2. Концентрационные (при $T = 300$ К) (а) и температурные (б, в) зависимости первой и второй констант анизотропии для соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$.

Таблица 1. Намагниченность насыщения (M_s), первая (K_1) и вторая (K_2) константы МКА для соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$.

Состав	x	$M_s, 10^3 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$	$K_1, 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}$	$K_2, 10^5 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}$
$Y_2(Fe_{0.03}Co_{0.97})_{17}$	0.03	1056	0.10	0
$Y_2(Fe_{0.05}Co_{0.95})_{17}$	0.05	1054	0.03	0.06
$Y_2(Fe_{0.07}Co_{0.93})_{17}$	0.07	1051	0.08	0.20
$Y_2(Fe_{0.18}Co_{0.82})_{17}$	0.18	1136	0.47	0.46
$Y_2(Fe_{0.29}Co_{0.71})_{17}$	0.29	1150	0.51	0.58
$Y_2(Fe_{0.41}Co_{0.59})_{17}$	0.41	1234	0.47	0.23
$Y_2(Fe_{0.50}Co_{0.50})_{17}$	0.50	1267	0.14	0.10

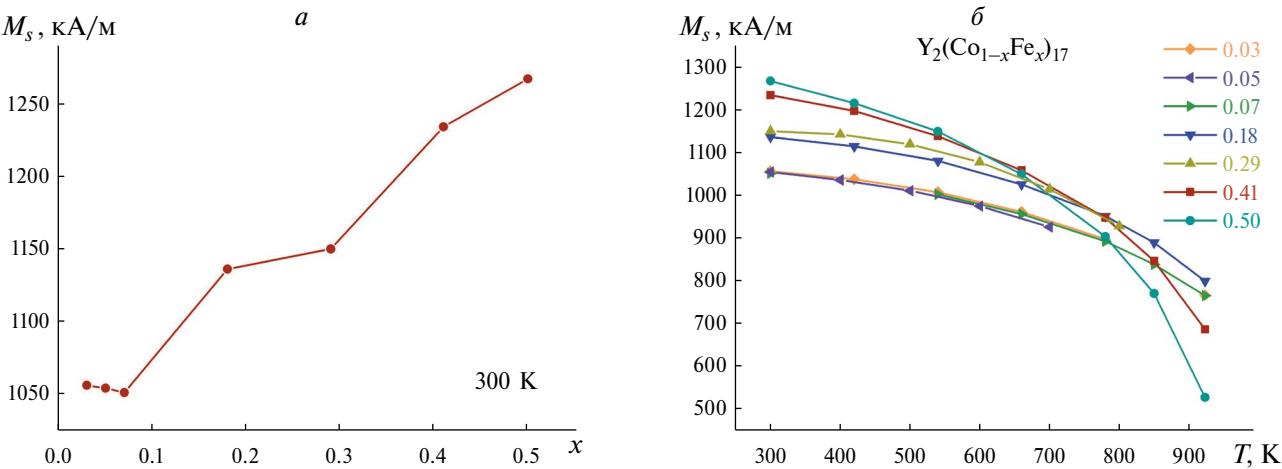


Рис. 3. Концентрационная (при $T = 300 \text{ К}$) (а) и температурные (б) зависимости намагниченности насыщения M_s для соединения $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$.

представлены в таблице 1. По полученным данным построены концентрационные и температурные зависимости первой и второй констант анизотропии (рис. 2), а также намагниченности насыщения (рис. 3). Из зависимости на рисунке 2а видно, что константа анизотропии K_1 обладает наименьшим значением для состава с $x = 0.05$, который находится на левом краю одноосного концентрационного интервала и составляет всего лишь порядка $0.07 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-3}$. Образец с $x = 0.03$ относится к переходной области и обладает анизотропией типа «легкий конус». С дальнейшим увеличением концентрации железа x первая константа анизотропии K_1 начинает расти и достигает максимального значения $K_1 = 0.51 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-3}$ в середине одноосного интервала для образца с $x = 0.29$. При дальнейшем увеличении x значения первой константы анизотропии начинают падать вплоть до конца одноосного интервала ($x = 0.50$).

Значения второй константы анизотропии K_2 , имеющей максимум $0.58 \cdot 10^5 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}$ при значении $x = 0.29$, уменьшаются с ростом температуры для всех

исследованных образцов. Данное концентрационное поведение констант анизотропии рассматриваемых соединений может быть объяснено особенностями расположения атомов кобальта и железа в кристаллической ячейке. Авторы [19], анализируя структуру соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ методом ядерно-магнитного резонанса, связывают изменение типа МКА с тем, что с учетом предпочтительных позиций, которые занимают атомы Fe, магнитная анизотропия замещенных атомов Fe мала по сравнению с атомами Co. При этом изменение анизотропии соединений в интервале концентраций $x = 0–0.2$ объясняется наличием антиферромагнитного обменного взаимодействия пары Fe-Fe с кратчайшим расстоянием в $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$.

Температурные зависимости констант анизотропии (рис. 2б, в) демонстрируют закономерное падение их значений с увеличением температуры для высокоанизотропных образцов в середине одноосного интервала ($x = 0.18, 0.29, 0.41$). Для образцов с $x = 0.05$ и 0.07 характерно слабое изменение

значений первой константы анизотропии K_1 с ростом температуры, их величина остается практически неизменной на протяжении всего исследованного температурного интервала.

Несмотря на заметную разницу значений первой константы для образцов в середине одноосного интервала ($0.18 < x < 0.41$) и на его краях ($x < 0.18$, $x > 0.41$), рассчитанных для $T = 300$ К, их значения на правом конце температурного интервала для каждого образца лежат близко друг к другу и не превышают $0.1 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-3}$. Из температурных зависимостей констант анизотропии также видно, что два образца из серии претерпевают температурный фазовый переход в исследованном интервале температур — образцы с $x = 0.41$ и $x = 0.50$. Для определения температур спин-переориентационных фазовых переходов из состояния «легкая ось» в состояние «легкая плоскость» через состояние с анизотропией типа «легкий конус» расчетные значения констант МКА наносились на диаграмму магнитокристаллической анизотропии. Соответствующие температуры переходов T_1 и T_2 представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения температур перехода «легкая ось» — «легкий конус» — «легкая плоскость» для образцов $Y_2(Fe_{0.41}Co_{0.59})_{17}$ и $Y_2(Fe_{0.50}Co_{0.50})_{17}$

x	T_1 , К	T_2 , К
0.41	730	758
0.5	455	480

На рисунке 3 представлены температурная (для $x = 0.03—0.50$) и концентрационная ($T = 300$ К) зависимости намагниченности насыщения исследуемых образцов. Из них видно, что намагниченность соединений растет с увеличением относительного содержания железа и падает с увеличением температуры для всех представленных составов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование констант МКА соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ ($x = 0.03—0.5$) показало, что с увеличением относительного содержания железа наблюдается рост первой константы анизотропии K_1 , которая достигает максимального значения $5.1 \cdot 10^5 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}$ при $x = 0.29$, что соответствует середине концентрационного интервала составов с МКА типа «легкая ось». Анализ температурного поведения констант анизотропии показывает, что образцы с $x = 0.41$ и $x = 0.50$ претерпевают спин-переориентационный фазовый переход в заданном интервале температур. При этом,

основываясь на анализе диаграммы МКА, определены температуры фазовых переходов этих образцов из состояния «легкая ось» в «легкая плоскость» через состояние с МКА типа «легкий конус».

Работа выполнена в рамках темы государственного задания в сфере научной деятельности (проект №0817-2023-006) с использованием ресурсов Центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Buschow K.H.J. // Rep. Progr. Phys. 1977. V. 40. No. 10. P. 1179.
2. Coey J.M.D. // Engineering. 2020. V. 6. No. 2. P. 119.
3. Coey J.M.D. // IEEE Trans. Magn. 2011. V. 47. No. 12. P. 4671.
4. Лукин А.А., Кольчугина Н.Б. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 7. С. 879. Lukin A.A., Kolchugina N.B. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 7. P. 798.
5. Андреев А.С., Никитин С.А., Спичкин Ю.И., Тушин А.М. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 8. С. 2463.
6. Givord D., Lemaire R. // IEEE Trans. Magn. 1974. V. 10. No. 2. P. 109.
7. Brennan S., Skomski R., Cugat O. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 1995. V. 140. P. 971.
8. Miller A.E., D'Silva T., Shanley J. // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. P. 3466.
9. Perkins R.S., Nagel H. // Physica B. 1975. V. 80. P. 143.
10. Callen E. // Physica B. 1982. V. 114. No. 1. P. 71.
11. Zhang P., Wang Y., Yang W. et al. // AIP Advances. 2023. V. 13. No. 2. Art. No. 025251.
12. Semenova E.M., Lyakhova M.B., Sinkevich A.I. et al. // IEEE Magn. Lett. 2020. V. 11. Art. No. 2501005.
13. Chen H., Ho W.W., Sankar S.G., Wallace W.E. // J. Magn. Magn. Mater. 1989. V. 78. No. 2. P. 203.
14. Ray A.E., Strnat K.J. // IEEE Trans. Magn. 1972. V. MAG-8. P. 516.
15. Shanley C.W., Harmer R.S. // AIP Conf. Proc. 1974. V. 18. P. 1217.
16. Katayama T., Shibata T. // J. Cryst. Growth. 1974. V. 24. P. 396.
17. Kardellass S., Servant C., Selhaoui N. et al. // J. Alloys Compounds. 2014. V. 583. P. 598.
18. Lyakhova M.B., Zhdanova O.V. // Met. Sci. Heat Treat. 2017. V. 58. No. 9. P. 587.
19. Inomata K. // Japan. J. Appl. Phys. 1976. V. 15. No. 5. P. 821.

Magnetic properties of the $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ compounds

A. I. Sinkevich^{1,*}, M. B. Lyakhova¹, A. Yu. Karpenkov¹, E. M. Semenova¹, D. Yu. Karpenkov²,
Yu. G. Pastushenkov¹

¹*Tver State University, Tver, 170100, Russia*

²*National University of Science and Technology MISIS, Moscow, 119049, Russia*

** e-mail: Sinkevich.AI@tversu.ru*

The results of magnetization curves analysis of $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ compounds, measured in 300—923 K temperature interval along easy and hard magnetization direction, were represented. Magnetocrystalline anisotropy constants $K_{1,2}$ of the samples were calculated. Temperature and compositional dependence of anisotropy constants $K_{1,2}$ and saturation magnetization M_s were discussed. There is an increase of first anisotropy constant K_1 value with the increase of relative samples iron concentration with maximum value of $5.1 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ in $x = 0.29$ point, correspond to the middle of the easy-axis interval.

Keywords: magnetocrystalline anisotropy, magnetocrystalline anisotropy constant, magnetization, rare-earth intermetallic