

## Спонтанный спин-переориентационный переход в сплавах (NdSmDy)(FeCo)B

С.А. Костюченко<sup>1</sup>, А.И. Дмитриев<sup>2</sup><sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова<sup>2</sup>Институт проблем химической физики РАН

Измерены температурные и полевые зависимости намагниченности многокомпонентного образца (NdSmDy)(FeCo)B, охлажденного в нулевом магнитном поле. В окрестности температуры  $T = 110$  К в образце происходит магнитный фазовый переход, сопровождающийся резким уменьшением спонтанной намагниченности. Целью настоящей работы являлось установление механизма и закономерностей магнитного фазового перехода, наблюдаемого в многокомпонентных редкоземельных постоянных магнитах (NdSmDy)(FeCo)B.

Полная энергия образца в магнитном поле описывается выражением:

$$E = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta - M_s H \cos(\varphi - \theta), \quad (1)$$

в котором первые два слагаемых соответствуют энергии магнитной анизотропии, второе слагаемое – магнитостатической энергии; здесь  $K_1$  – константа магнитной анизотропии первого порядка,  $K_2$  – константа магнитной анизотропии второго порядка,  $M_s$  – намагниченность насыщения,  $\theta$  – угол между осью  $c$  и вектором намагниченности,  $\varphi$  – угол между осью  $c$  и вектором напряженности  $H$  магнитного поля. Из минимизации полной энергии образца  $\partial E / \partial \theta = 0$ :

$$\frac{\partial E}{\partial \theta} = 2K_1 \sin \theta \cos \theta + 4K_2 \sin^3 \theta \cos \theta - M_s H \sin(\varphi - \theta) = 0 \quad (2)$$

следует три возможных магнитных состояниях [1]: а)  $K_1 > 0$  – анизотропия типа «легкая ось»;  $K_1 < 0$ ,  $K_1 + 2K_2 < 0$  – анизотропия типа «легкая плоскость»;  $K_1 < 0$ ,  $K_1 + 2K_2 > 0$  – анизотропия типа «конус легких осей»; направления осей легкого намагничивания образуют конус с углом раствора  $2\theta$  и высотой, направленной вдоль оси  $c$ .

Измеряемая намагниченность образца есть проекция вектора намагниченности насыщения на направление магнитного поля:

$$M = M_s \cos(\varphi - \theta) \quad (3)$$

Подстановка (3) в выражение (2) с учетом того, что в экспериментах угол  $\varphi = 90^\circ$ , приводит к уравнению [2]:

$$\frac{4K_2}{M_s^4} M^2 + \frac{2K_1}{M_s^2} = \frac{H}{M} \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что зависимость намагниченности образца от напряженности магнитного поля  $M(H)$ , построенная в координатах  $H/M(M^2)$ , должны быть прямой  $y = kx + b$  с угловым коэффициентом  $k = 4K_2/M_s^4$ ,  $b = 2K_1/M_s^2$  (здесь  $y = H/M$ ,  $x = M^2$ ). Измеренные с помощью СКВИД магнитометра зависимости  $M(H)$ , построенные в соответствующих координатах, действительно оказались линейными. Полученные таким образом угловые коэффициенты спрямленных в соответствующих координатах зависимостей  $M(H)$  были пересчитаны в константы магнитной анизотропии. Температурные зависимости констант магнитной анизотропии изображены на рис. 1.

Таким образом, анализ зависимостей  $M(H)$ , измеренных при различных температурах, позволил определить температурные зависимости констант анизотропии первого  $K_1$  и второго  $K_2$

порядков. Из рис. 1 видно, что при температуре  $T = 110$  К константа  $K_1$  изменяет знак, что позволяет квалифицировать наблюдаемый магнитный переход, как спин-переориентационный. Поворот оси легкого намагничивания сопровождается изменением типа магнитной анизотропии. Высоким температурам  $T > 110$  К соответствует анизотропия типа «легкая ось» [3]. При низких температурах  $T < 110$  К формируется магнитная структура типа «конус осей легкого намагничивания» [3].

Работа поддержана грантом РФФИ 16-07-00863 а.

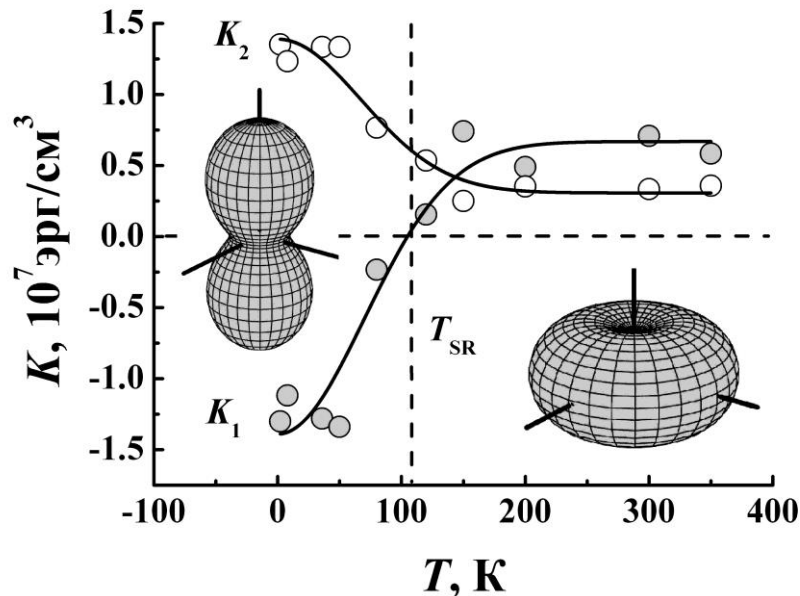


Рис. 1. Температурные зависимости констант магнитной анизотропии первого  $K_1$  и второго  $K_2$  порядков. Вертикальной пунктирной линией отмечена температура спонтанного спин-переориентационного перехода  $T_{SR}$ . На врезке показаны схематические изображения эллипсоидов магнитной анизотропии, соответствующих анизотропии типа «легкая ось» (справа) и «легкая плоскость» (слева).

### Литература

1. Белов К.И., Звездин А.Е., Кадомцева А.М., Левитин Р.З. Переходы спиновой переориентации в редкоземельных магнетиках // УФН. 1976. Т. 119. С. 447.
2. Sucksmith W., Thompson J.E. The Magnetic Anisotropy of Cobalt // Proc. Roy. Soc. Lond. A. 1954. V. 225. P. 362.
3. Дмитриев А.И. Спонтанный спин-переориентационный переход в сплавах (NdSmDy)(FeCo)B // ФТТ. 2016. Т. 58. С. 2361.