

СПИН-ПЕРЕОРИЕНТАЦИОННЫЙ ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД В СОЕДИНЕНИИ $\text{SmFe}_5\text{Co}_6\text{Ti}$

© С.А. Никитин, Т.И. Иванова, И.С. Терешина

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия
(Поступила в Редакцию 26 июня 1995 г.)

Методом анализа экспериментальных кривых вращающего момента проведено исследование температурной зависимости констант магнитной анизотропии монокристалла $\text{SmFe}_5\text{Co}_6\text{Ti}$ в широком интервале температур (от 77 до 1000 К) в магнитных полях до 16 кОе. Обнаружен спин-переориентационный фазовый переход типа ось легкого намагничивания-угловая фаза (при понижении температуры) при $T = 440$ К. Данный переход обладает свойствами фазового перехода второго рода.

Редкоземельные интерметаллиды $\text{RFe}_{12-x}\text{M}_x$, где R — редкоземельный металл, а M — Ti, V, Si, Mo, W, с кристаллической структурой типа ThMn_{12} являются в последние годы объектами пристального внимания исследователей как материалы для постоянных магнитов. Благодаря особенностям кристаллической и магнитной структуры эти сплавы также являются удобными модельными объектами для исследования ряда фундаментальных проблем физики магнитных явлений.

Известно [1-5], что замещение в подрешетке 3d-переходного металла атомов Fe атомами Co приводит к повышению температуры Кюри T_c . Однако исследование влияния подобного замещения на магнитную анизотропию изучено слабо; литературные данные, полученные в основном на текстурованных порошковых образцах, носят противоречивый характер. Значения констант магнитной анизотропии, найденные разными авторами из измерений намагниченности, различаются. Отсутствуют работы по исследованию магнитной анизотропии, выполненные на монокристаллических образцах.

Магнитная анизотропия — выжнейшая характеристика материала, которая определяет его практическое применение. В связи с этим в данной работе изучалось влияние на магнитную анизотропию замещения железа кобальтом на монокристаллах $\text{SmFe}_{11-x}\text{Co}_x\text{Ti}$ методом анализа кривых механического вращающего момента. Результаты этих исследований в области концентраций $0 \leq x \leq 5$, а также методы получения монокристаллов данных соединений и результаты их рентгеноструктурного и химического анализа подробно изложены в [6]. Показано, что все исследованные соединения системы $\text{SmFe}_{11-x}\text{Co}_x\text{Ti}$, где $x \leq 5$, в исследуемой области температур ($77\text{ К} - T_c$) являются одноосными ферромагнетиками. В настоящей работе приводятся данные о магнитной структуре соединения $\text{SmFe}_5\text{Co}_6\text{Ti}$, в котором нами обнаружен и подробно изучен спин-переориентационный фазовый переход.

1. Экспериментальная методика

С целью изучения характера этого перехода нами проведено измерение температурной зависимости кривых механического вращающего момента $L(\theta)$ монокристалла $\text{SmFe}_5\text{Co}_6\text{Ti}$ в интервале температур 77–1000 К. Технология приготовления и контроль качества образца были полностью аналогичны описанной ранее в [6] методике приготовления образцов системы $\text{SmFe}_{11-x}\text{Co}_x\text{Ti}$.

Измерения кривых вращающих моментов проводились на магнитном анизометре в интервале температур 77–1000 К. Исследуемый образец представлял собой диск диаметром ~ 2 мм и толщиной ~ 0.2 мм. Кристаллографическая ориентировка образца выявила расположение в плоскости диска направлений $[001]$ и $[110]$. Размагничивающее поле образца при максимальном внешнем магнитном поле не превышало 800 Ое. Полученные экспериментальные кривые вращающих моментов анализировались с целью получения значений констант выделением последовательных гармоник методом наименьших квадратов.

2. Результаты и обсуждение

Кривые вращающего момента $L(\theta)$ соединения $\text{SmFe}_5\text{Co}_6\text{Ti}$, снятые при разных температурах, представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, форма кривых вращающего момента при высоких температурах, а именно при $T > 440$ К, имеет обычный вид, характерный для одноосного состояния (тетрагональная ось \bar{c} является при этом осью легкого намагничивания). При более низких температурах форма кривой изменяется существенным образом. Сначала появляется небольшой излом около направления $[001]$ при $T = 440$ К. Далее с понижением температуры возникают дополнительные максимум и минимум около этого направления, причем величина пиков значительно возрастает с понижением температуры. По точкам пересечения экспериментальных кривых вращающего момента $L(\theta)$ с осью абсцисс можно легко определить положение оси легкого намагничивания, соответствующей значениям угла θ_0 , при котором $L = 0$ и $\partial L/\partial\theta < 0$ [4].

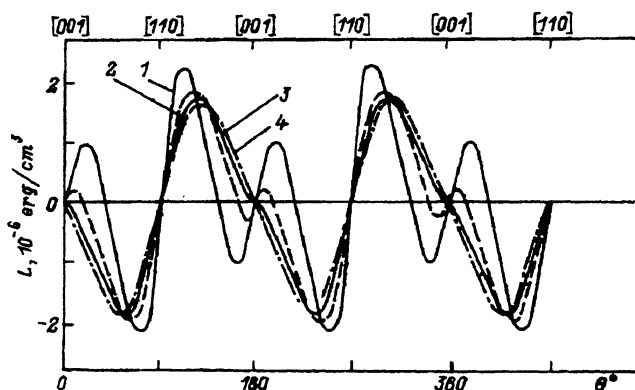


Рис. 1. Экспериментальные кривые вращающего момента для монокристалла $\text{SmFe}_5\text{Co}_6\text{Ti}$.

T (К): 1 — 300, 2 — 380, 3 — 440, 4 — 480.

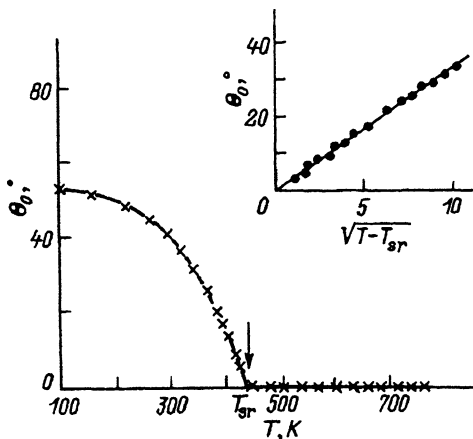


Рис. 2. Температурная зависимость угла отклонения магнитного момента θ_0 соединения $\text{SmFe}_5\text{Co}_6\text{Ti}$ от кристаллографической оси \bar{c} .

Найденная таким образом температурная зависимость угла θ_0 между кристаллографической осью \bar{c} и направлением легкого намагничивания представлена на рис. 2. Максимальное зафиксированное значение угла θ_0 при $T = 77 \text{ K}$ составило 53° .

Таким образом, из наших измерений следует, что при понижении температуры в соединении $\text{SmFe}_5\text{Co}_6\text{Ti}$ происходит спин-переориентационный фазовый переход типа ось легкого намагничивания–угловая фаза: при этом магнитный момент соединения отклоняется от кристаллографической оси \bar{c} и уже при $T = 300 \text{ K}$ образует с кристаллографической осью угол $\sim 40^\circ$ в плоскости (110). Исследования, проведенные вплоть до температуры кипения жидкого азота, не выявили наличия перехода магнитного момента в базисную плоскость, т.е. при температурах 77–440 K сохраняется угловая фаза.

Энергия магнитокристаллической анизотропии для кристалла с тетрагональным типом симметрии может быть рассчитана на основе феноменологического выражения

$$E_a = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + K_3 \sin^4 \theta \cos 4\psi + \dots, \quad (1)$$

где θ — есть угол между направлением спонтанной намагниченности M_s и направлением [001], а ψ — угол между проекцией M_s на базисную плоскость и направлением [100]. Тогда механический вращающий момент $L(\theta)$ в плоскости (110) можно представить, принимая во внимание $\psi = \pi/4$, в виде

$$L_{110} = -\partial E_a / \partial \theta = -2K_1 \sin \theta \cos \theta - 4(K_2 - K_3) \sin^3 \theta \cos \theta. \quad (2)$$

Из экспериментальных кривых вращающего момента $L(\theta)$ были определены константы магнитокристаллической анизотропии путем последовательного выделения гармоник методом наименьших квадратов.

В данных измерениях получить отдельно K_2 и K_3 не представляется возможным.

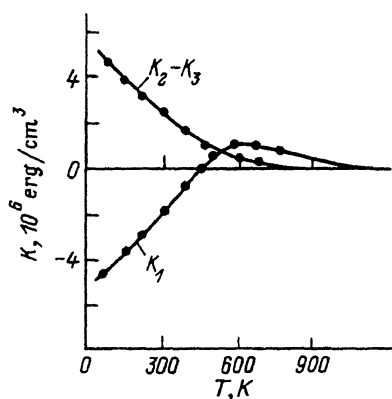


Рис. 3. Температурная зависимость констант магнитной анизотропии соединения $\text{SmFe}_5\text{Co}_6\text{Ti}$.

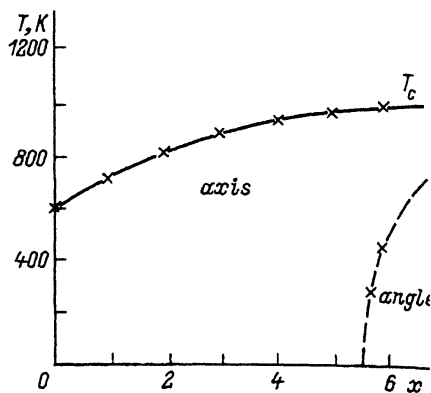


Рис. 4. Магнитная фазовая диаграмма системы $\text{SmFe}_{11-x}\text{Co}_x\text{Ti}$.

На рис. 3 изображен температурный ход констант магнитной анизотропии. Как видно из этого рисунка, константа анизотропии K_1 изменяет свой знак при температуре $T = 440$ К и при дальнейшем понижении температуры становится отрицательной. Значение константы анизотропии ($K_2 - K_3$) с понижением температуры резко возрастает.

Описанный выше спин-переориентационный фазовый переход характеризуется тем, что при изменении температуры происходит изменение ориентации магнитного момента соединения $\text{SmFe}_5\text{Co}_6\text{Ti}$ относительно осей кристалла. Параметром упорядочения η здесь является угол θ_0 отклонения магнитного момента от тетрагональной оси \bar{c} в плоскости (110). Данный переход с большой степенью вероятности можно отнести к фазовому переходу второго рода, поскольку θ_0 изменяется без скачков и зависимость угла θ_0 от приведенной температуры следует закону $\theta_0 = \xi(T - T_{sr})^{1/2}$, что характерно для параметра упорядочения при фазовых переходах второго рода (ξ — некоторая постоянная, равная $\xi = 0.06 \text{ K}^{-1/2}$, T_{sr} — температура спин-переориентационного перехода). Как видно из вставки к рис. 2, экспериментальные точки хорошо укладываются на теоретическую кривую. Обнаруженный нами спин-переориентационный переход может быть рассмотрен на основе расчетов [7], из которых следует, что в случае магнитоодноосных кристаллов спонтанный переход спиновой переориентации возникает при температуре, где первая константа магнитной анизотропии K_1 изменяет знак. Если $K_2 > 0$, то переориентация вектора I_s происходит постепенно, как фазовый переход второго рода. В нашем случае этот переход наблюдается в довольно большом интервале температур и обладает свойствами фазового перехода второго рода. Итак, исследования, проведенные на монокристаллическом образце $\text{SmFe}_5\text{Co}_6\text{Ti}$ методом анализа температурной зависимости констант магнитной анизотропии, позволили сделать следующие выводы: 1) в соединении существует спин-переориентационный фазовый переход типа ось легкого намагничивания—угловая фаза при $T = 440$ К; 2) магнитный момент соединения при охлаждении отклоняется от тетрагональной оси \bar{c} при $T < 440$ К и при комнатной температуре образует с ней угол 40° ; 3) в исследуемой области температур 77–1000 К

полной спиновой переориентации (от оси \bar{c} к базисной плоскости) не происходит; 4) данный фазовый переход обладает свойствами фазового перехода второго рода.

Проведенное исследование концентрационной и температурной зависимостей магнитной анизотропии для системы $\text{SmFe}_{11-x}\text{Co}_x\text{Ti}$ позволяет нам построить магнитную фазовую диаграмму для этой системы (рис. 4) и выявить большую область одноосных состояний в широкой области концентраций кобальта ($0 \leq x \leq 5.5$), что немаловажно для практического применения данной системы при изготовлении материалов с высокой магнитной энергией и коэрцитивной силой.

Авторы благодарят В.В. Сергеева и О.А. Золотухина за предоставление монокристаллов, а также В.В. Зубенко и И.В. Телегину за рентгеноструктурный анализ исследованных монокристаллов.

Данная работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований и Международным научным фондом Дж. Сороса (грант N M 12 000).

Список литературы

- [1] Андреев А.В., Богаткин А.Н., Кудреватых Н.В., Сигаев С.С., Тарасов Е.Н. ФММ **68**, 1, 70 (1989).
- [2] Yang Y.-C., Hong S. Solid State Commun. **68**, 2, 175 (1988).
- [3] Long G.I., Grandjean F. Supermagnets, Hard Magnetic Materials. Kluwer Academic Publishers (1991). 680 p.
- [4] Yang Y.-C., Sun H., Kong L. J. Appl. Phys. **67**, 9, 4632 (1990).
- [5] Li Z.W., Zhou X.Z., Morrish A.H. J. Appl. Phys. **69**, 8, 5602 (1991).
- [6] Золотухин О.А., Зубенко В.В., Иванова Т.И., Никитин С.А., Сергеев В.В., Телегина И.В., Терешина И.С. Вестн. МГУ. Сер. 3, Физика, астрономия **34**, 5, 80 (1993).
- [7] Белов К.П., Звездин А.К., Кадомцева А.М., Левитин Р.З. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках. М. (1979). 317 с.