

УДК 538.665:669.85/86

С. А. НИКИТИН, А. С. АНДРЕЕНКО, Г. Е. ЧУПРИКОВ

## МАГНЕТОКАЛОРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА В СПЛАВАХ ТЕРБИЙ-ГАДОЛИНИЙ

Значительный интерес представляет изучение сложных магнитных фазовых переходов в редкоземельных металлах (РЗМ) и их сплавах [1, 2]. Вследствие громадной магнитной анизотропии РЗМ измерения многих магнитных свойств целесообразно проводить на монокристаллах. Ранее в монокристаллах сплавов тербий — гадолиний исследовались магнитные, гальваномагнитные и магнитострикционные свойства [3, 4]. Дополнительную информацию об изменении энтропии и энергии магнитной системы при фазовых переходах предоставляют измерения магнетокалорического эффекта, позволяющие непосредственно определить изменение энергии магнитной системы при адиабатическом намагничивании [5]. В настоящей статье приводятся результаты исследования магнетокалорического эффекта и намагниченности на монокристаллических образцах системы сплавов тербий — гадолиний.

Измерения намагниченности проводились на вибрационном магнитометре в полях до 15 кЭ при температурах 78—350 К. Методика измерения магнетокалорического эффекта ( $\Delta T$ -эффекта) описана ранее [6]. Подробное описание методики выращивания и качественного анализа монокристаллов сплавов тербий — гадолиний опубликовано в работе [4]. Ошибка измерений  $\Delta T$ -эффекта не превышала 5%, намагниченности — 3%.

Редкоземельные сплавы тербий — гадолиний обладают гексагональной структурой, причем магнитный момент лежит в базисной плоскости и направлением легкого намагничивания является ось *b*. Во всех сплавах  $Tb_xGd_{1-x}$ , как показали наши измерения, зависимость намагниченности от температуры в базисной плоскости имеет обычный «вейсовский» характер. Увеличение содержания гадолиния понижает поле технического насыщения сплава. Это можно объяснить уменьшением констант магнитной анизотропии с ростом содержания гадолиния, анизотропия которого на два порядка меньше анизотропии тербия [1].

Магнетокалорический эффект в сплавах  $Tb_xGd_{1-x}$  в поле, приложенном в базисной плоскости, имеет максимум в точке Кюри  $\Theta$  (рис. 1), причем величина  $\Delta T$ -эффекта в  $\Theta$  достигает довольно большого значения (2—3 К) в поле 8 кЭ, что существенно превышает величину магнетокалорического эффекта в 3d-металлах [7]. Этот максимум обусловлен интенсивным парапроцессом вблизи точки Кюри.

Температуры Кюри сплавов, определенные нами из измерений магнетокалорического эффекта ( $\Theta_{\Delta T}$ ) и намагниченности (методом термодинамических коэффициентов [8]) ( $\Theta_\sigma$ ), хорошо коррелируют друг с другом (см. таблицу).

Наблюдаемая в редкоземельных металлах и их сплавах гигантская магнитная анизотропия является причиной существенного различия их физических свойств по различным кристаллографическим осям. На рис. 2 приведены температурные зависимости магнетокалорического эффекта для сплавов системы  $Tb_xGd_{1-x}$  в поле, приложенном вдоль оси трудного намагничивания. Как видно из рисунка, температурные

зависимости  $\Delta T$ -эффекта в поле, направленном вдоль оси  $c$ , существенно отличаются от случая, когда поле лежит в базисной плоскости. Вблизи точки  $\Theta$  существует максимум  $\Delta T$ -эффекта, однако он имеет другой характер и захватывает более широкий интервал температур.

Содержание Gd, ат. %	0	6	30	50	60	80	90
$\Theta_{\Delta T}$ , К	229	232	252	264	270	281	286
$\Theta_{\sigma}$ , К	230	235	253	267	271	282	289

Кроме того, если при  $H \parallel b$   $\Delta T > 0$ , как в области низких температур ( $78 < T < \Theta$ ), так и вблизи  $\Theta$  и в парамагнитной области, то при  $H \parallel c$  при низких температурах  $\Delta T$ -эффект отрицателен и становится положительным лишь при приближении к температуре Кюри.

В тербии и сплаве  $Tb_{0,94}Gd_{0,06}$  наблюдается также дополнительный максимум при более низких температурах (в Tb  $\Theta_1 = 221$  К, в сплаве с  $x = 0,94$   $\Theta_1 = 218$  К). Эта особенность в ходе температурной зависимости  $\Delta T$ -эффекта связана с наличием в этих материалах магнитного фазового перехода геликоидальный антиферромагнетизм — ферромагнетизм. Основанием для такого заключения служат нейтронографические и магнитные измерения, проведенные в тербии [1]. В сплавах, содержащих более 6 ат. % Gd, фазовый переход геликоидальный антиферромагнетизм — ферромагнетизм не обнаружен. Таким образом, даже сравнительно небольшое содержание ферромагнитного гадолиния приводит к стабилизации ферромагнитной структуры сплавов.

Для объяснения сложной температурной зависимости  $\Delta T$ -эффекта нами были проведены измерения намагниченности сплавов Tb—Gd в поле  $H \parallel c$ . На рис. 3 представлена температурная зависимость намагниченности для сплава  $Tb_{0,2}Gd_{0,8}$  в поле, направленном вдоль оси  $c$ . При увеличении температуры наблюдается рост намагниченности, которая достигает своего максимума в области температуры Кюри. Температура максимума намагниченности  $\sigma_c$  сильно зависит от величины внешнего магнитного поля, которое смещает его в сторону более низких температур. Существование максимума намагниченности можно объяснить следующим образом [9]. В парамагнитной области спины ионов расположены хаотически, корреляция между ними практически отсутствует. Внешнее магнитное поле, действуя на каждый спин в отдельности, преодолевает в основном дезориентирующее действие теплового движения. В этой температурной области ход намагниченности в базисной плоскости и вдоль оси  $c$  почти совпадают. При  $H = 0$  и понижении температуры ниже точки Кюри  $\Theta$  спины ионов в результате обменного взаимодействия и магнитной одноосной анизотропии распо-

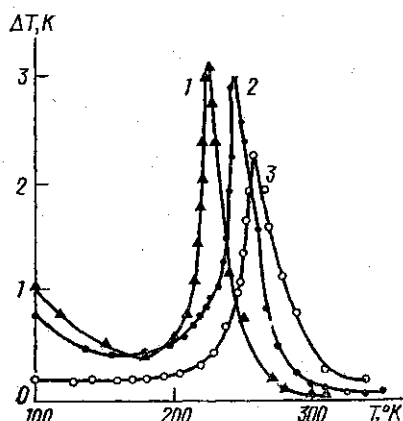


Рис. 1. Температурные зависимости магнетокалорического эффекта в поле  $H = 8$  кЭ, приложенного вдоль оси  $b$ , в тербии (1) и сплавах  $Tb_xGd_{1-x}$ , где  $x = 0,70$  (2) и  $0,20$  (3)

лагаются в базисных плоскостях. При  $T < \Theta$  в магнитном поле, направленном по оси  $c$ , «выворачивается» из базисной плоскости не отдельный спин, а суммарный магнитный момент всего слоя. Таким образом, вследствие роста магнитной анизотропии при понижении температуры ниже  $\Theta$  проекция магнитного момента на ось  $c$  начинает уменьшаться.

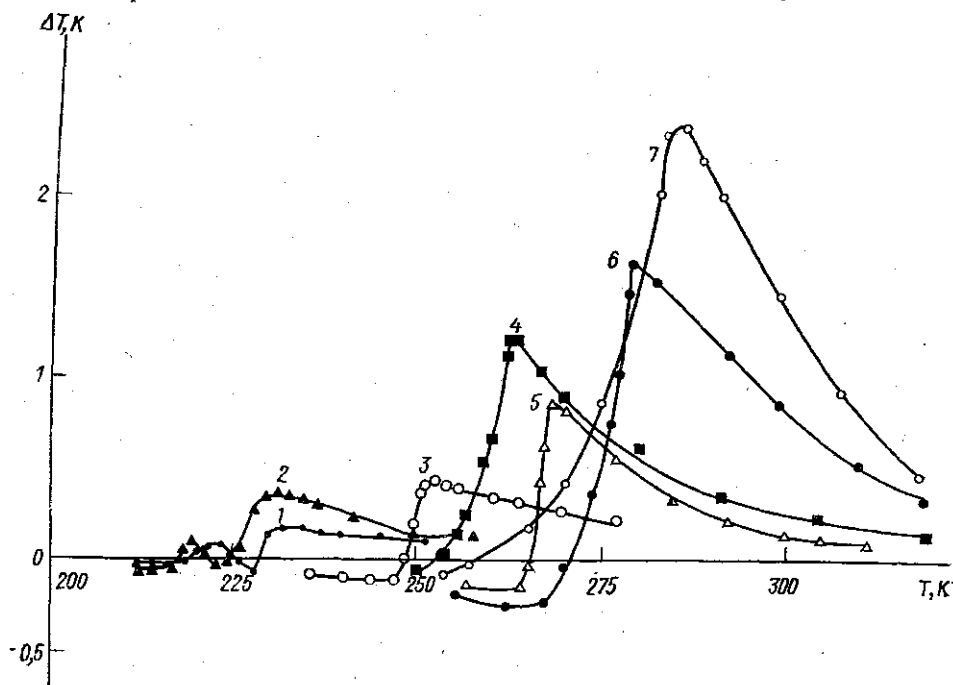


Рис. 2. Температурная зависимость магнетокалорического эффекта в сплавах  $Tb_xGd_{1-x}$  в поле  $H=12$  кЭ, приложенном вдоль оси  $c$ :  $x=1$  (1); 0,94 (2); 0,70 (3); 0,50 (4); 0,39 (5); 0,20 (6); 0,09 (7)

Такой ход температурной зависимости намагниченности (рис. 3) хорошо коррелирует с температурным ходом магнетокалорического эффекта (рис. 2), связанного, как известно из термодинамики, с намагниченностью следующим соотношением:

$$\Delta T = -\frac{T}{C_H} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right) \Delta H, \quad (1)$$

где  $C_H$  — теплоемкость.

Согласно этой термодинамической формуле в области температур, где намагниченность при охлаждении уменьшается ( $\frac{\partial \sigma}{\partial T} > 0$ ), наблюдается отрицательный  $\Delta T$ -эффект, а там, где увеличивается ( $\frac{\partial \sigma}{\partial T} < 0$ ) — положительный.

Изменение знака  $\Delta T$ -эффекта в этом случае можно объяснить сменой механизмов, приводящих к выделению и поглощению тепла. Вблизи точки Кюри и в парамагнитной области происходит выделение тепла при включении магнитного поля вследствие возрастания степени магнитного порядка и уменьшения энтропии магнитной подсистемы, что, в свою очередь, приводит к возрастанию энтропии кристаллической решетки при адиабатическом намагничивании. При температурах значительно ниже точки Кюри превалирует эффект, связанный с работой.

производимой внешним магнитным полем против сил магнитной анизотропии. Этот эффект можно, ограничившись первыми основными членами разложения энергии магнитной анизотропии, вычислить по следующей формуле [10]:

$$\Delta T_A = \frac{T}{C_{p,H}} \left( \frac{\partial K_1}{\partial T} \right)_H (\sin^2 \theta_K + \sin^2 \theta_0), \quad (2)$$

где  $K_1$  — первая константа магнитной анизотропии,  $\theta_K$  и  $\theta_0$  — углы между направлением магнитного момента и осью  $c$  после включения поля  $H$  и в его отсутствие соответственно.

Как показали наши измерения, температурной зависимости  $K_1$  в сплавах Tb—Gd величина  $\frac{\partial K_1}{\partial T} > 0$ . Поскольку при возрастании поля, параллельного оси  $c$ , угол между осью  $c$  и направлением магнитного момента уменьшается, то в соответствии с формулой (2) сопровождающий этот процесс магнетокалорический эффект отрицателен.

На рис. 4 приведены зависимости магнетокалорического эффекта в сплаве Tb<sub>0,39</sub>Gd<sub>0,61</sub> от направления приложенного магнитного поля. Вращение образца в поле производится в плоскости {bc}, включающей направления легкого и трудного намагничивания. В сплавах с концентрациями  $x > 0,4$

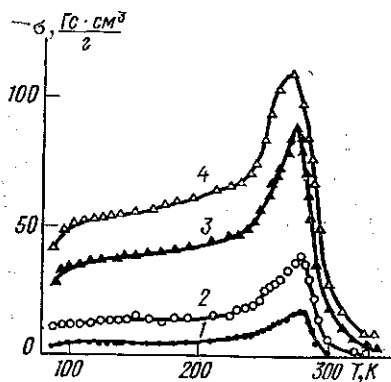


Рис. 3. Температурная зависимость намагниченности в сплаве Tb<sub>0,39</sub>Gd<sub>0,61</sub> в поле, приложенном вдоль оси  $c$ :  $H=1,7$  (1); 3,4 (2); 8 (3) и 12 (4) кЭ

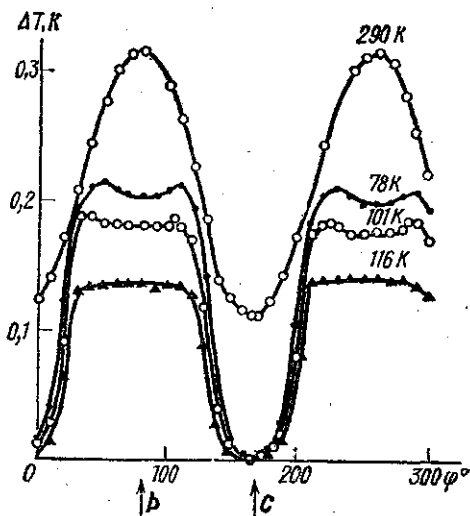


Рис. 4. Зависимость магнетокалорического эффекта от направления приложенного поля  $H=8,2$  кЭ в сплаве Tb<sub>0,39</sub>Gd<sub>0,61</sub>

зависимость  $\Delta T(\varphi)$ , где  $\varphi$  — угол между направлением  $H$  и выбранным произвольным направлением в кристалле, имеет сравнительно простой вид — максимум при поле, направленном по оси  $b$ , и минимум при поле, направленном по оси  $c$ . В сплавах с  $x < 0,4$  зависимость  $\Delta T(\varphi)$  становится более сложной. При температурах от 78 до 101 К на кривых  $\Delta T(\varphi)$  вместо одного максимума вдоль оси  $b$  обнаруживаются два максимума, расположенные симметрично по отношению к оси  $b$ . С повышением температуры эти максимумы сглаживаются (кривая  $T=116$  К) и кривые приобретают вид (кривая  $T=290$  К) такой же, как у сплавов с большим содержанием тербия.

Для объяснения этих результатов следует принять во внимание чрезвычайно сложную полярную диаграмму для энергии анизотропии

гадолиния [11]. Известно, что ниже 240 К магнитные моменты в гадолинии образуют конус легкого намагничивания вследствие уменьшения аксиальной магнитной анизотропии. Этот фазовый переход сопровождается быстрым ростом полной энергии в направлении базисной плоскости. Поэтому можно предположить, что в сплавах, содержащих много гадолиния, полярная диаграмма анизотропии при низких температурах имеет добавочные экстремумы, кроме экстремумов вдоль кристаллографических направлений  $b$  и  $c$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов К. П., Бемянчикова М. А., Левитин Р. З., Никитин С. А. Редкоземельные ферро- и антиферромагнетики. М., 1965.
2. Белов К. П., Никитин С. А. Ферро- и антиферромагнетизм сплавов на основе редкоземельных металлов.— В кн.: Ферромагнетизм. 1975, с. 92—105.
3. Никитин С. А., Шелудко Н. А., Посядо В. П., Чуприков Г. Е. Магнитные, магнитоупругие и электрические свойства монокристаллов сплавов тербий—гадолиний.— ЖЭТФ, 1977, 73, с. 1001—1008.
4. Посядо В. П. Магнитные, магнитоупругие и электрические свойства монокристаллов сплавов Tb-Y и Tb-Gd.— Автореф. канд. дис. М., 1977.
5. Талалаева Е. В., Черникова Л. А., Кудрявцева Т. В., Ивановский В. И. Исследование особенностей парапроцесса в редкоземельных ферритах-гранатах.— В кн.: Ферромагнетизм. М., 1975, с. 60—75.
6. Андреевко А. С. Магнетокалорический эффект и магнитные свойства редкоземельных сплавов и соединений на основе тербия.— Автореф. канд. дис. М., 1978.
7. Weiss P., Forger R. Gmagnetation et rhénone de magnéto-calorique du nickel.— Ann. de Phys., 1926, 5, p. 153—213.
8. Белов К. П. Магнитные превращения, М., 1959.
9. Никитин С. А., Андреевко А. С., Арутюнян Н. П. Спиновая переориентация в магнитном поле, приложенном вдоль оси трудного намагничивания, в сплавах тербий—гадолиний.— Физ. тв. тела, 1978, 20, № 12, с. 3685—3687.
10. Никитин С. А., Талалаева Е. В., Черникова Л. А., Чуприков Г. Е., Иванова Т. И., Казаков Г. Е., Ярхо Г. А. Особенности магнитного поведения и магнетокалорический эффект в монокристалле гадолиния.— ЖЭТФ, 1978, 74, с. 205—213.
11. Darby M. J., Roe W. C., Taylor K. N. The magnetocrystalline anisotropy of gadolinium.— Proc. Phys., 1962, 80, p. 927—933.

Поступила в редакцию  
27.02.79

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1981, т. 22, № 1

УДК 539.29; 548.4

Н. А. ТЯПУНИНА, А. А. СВЕТАШОВ, Э. П. БЕЛОЗЕРОВА

### ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ДВИЖЕНИЕ ДИСЛОКАЦИЙ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ВИБРАЦИИ ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ. КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ДИСЛОКАЦИЙ

**1. Введение.** Ранее [1—4] сообщалось, что в щелочно-галлоидных кристаллах под действием высокочастотной вибрации наблюдаются не только колебательное движение дислокаций, но и поступательное. Поскольку дислокации в щелочно-галлоидных кристаллах несут на себе эффективный электрический заряд, представляло интерес продолжить эти исследования при испытаниях кристаллов в электростатическом поле. Данная работа посвящена изучению влияния электрического по-