

УДК 539.172

## РЕНТГЕНОВСКОЕ И МЁССБАУЭРОВСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{2-x}Co_x$

А. С. Илюшин, С. А. Никитин, Нгуен Ван Нгиеп, А. А. Опаленко,  
И. С. Терешина, А. И. Фиров

(кафедра физики твердого тела; кафедра общей физики  
для естественных факультетов)

E-mail: tellur125@mail.ru

Проведено комплексное исследование фазового состава, атомно-кристаллической структуры, магнитных свойств и сверхтонких взаимодействий сплавов системы  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{2-x}Co_x$  ( $x = 0-1.3$ ). Синтезированные сплавы изотипны кубической фазе Лавеса С15 с параметром элементарной ячейки, монотонно уменьшающимся с увеличением содержания кобальта. Как следствие величина магнитострикции насыщения также уменьшается. Однако концентрационные зависимости температуры Кюри, намагниченности насыщения и величины сверхтонкого магнитного поля, измеренного в мёссбауэровском эксперименте, демонстрируют немонотонный (куполообразный) характер.

Среди новых магнитных материалов для радиотехники и электроники особое место принадлежит сплавам и соединениям редкоземельных 4f-металлов с 3d-переходными металлами. Наибольший интерес вызывают редкоземельные фазы Лавеса  $RT_2$  ( $T = Fe, Co$ ), обладающие гигантской магнитострикцией [1–4]. Особенностью псевдобинарных сплавов  $(R_{1-x}R'_x)Fe_2$  является тот факт, что гигантская магнитострикция реализуется при комнатных температурах в сравнительно слабых магнитных полях. Это осуществляется благодаря компенсации результирующей магнитокристаллической анизотропии (МКА) в области комнатной температуры за счет использования R-элементов с разными знаками констант МКА. Так был обнаружен широко используемый в настоящее время состав  $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_2$ , получивший название терфенол. Для более глубокой компенсации МКА, на наш взгляд, перспективным является замещение атомов Fe атомами Co, так как ионы этих элементов в кристаллической структуре  $RFe_2$  обладают различными знаками констант МКА.

Целью настоящей работы является комплексное исследование структуры и магнитных свойств сплавов системы  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{2-x}Co_x$  ( $x = 0 \div 1.6$ ).

В качестве методов исследования были выбраны рентгенофазовый анализ, мёссбауэровская спектроскопия, а также измерение намагниченности и магнитострикции.

### Результаты и обсуждение

Образцы  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{2-x}Co_x$  (где  $x = 0, 0.2, 1.0, 1.1, 1.3, 1.6$ ) были синтезированы по методике, подробно описанной в работе [5] (Дуговая плавка с последующим гомогенизирующим отжигом при

$T = 750^\circ C$  в течение 200 ч). Фазовый состав сплавов исследовался с помощью метода рентгеновской дифракции. Все полученные дифрактограммы демонстрируют наличие дифракционных пиков, однозначно индуцируемых в кубической сингонии редкоземельной фазы Лавеса типа С15. Полученные сплавы оказались рентгеновски однофазны. По данным расчетов параметров элементарных ячеек сплавов системы  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{2-x}Co_x$  была построена их концентрационная зависимость  $a(x)$ , приведенная на рис. 1. Из рисунка видно, что с увеличением содержания кобальта от  $x = 0$  до  $x = 1.6$  в системе параметр  $a$  монотонно, но нелинейно уменьшается вследствие того, что металлический радиус у атома кобальта меньше, чем у атома железа. Этот результат коррелирует с изменением параметров решетки, рассчитанным по правилу Вегарда.

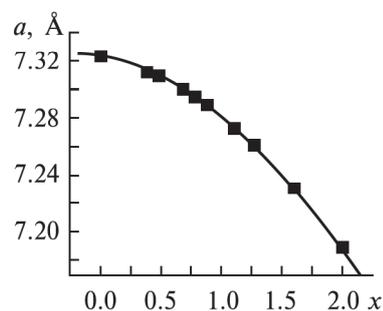


Рис. 1. Концентрационная зависимость параметра элементарной ячейки  $a(x)$

Методика измерения намагниченности и магнитострикции подробно описана нами ранее в работе [5].

Температура Кюри ( $T_C$ ) определялась из температурных зависимостей  $\sigma(T)$  (измеренных в слабом

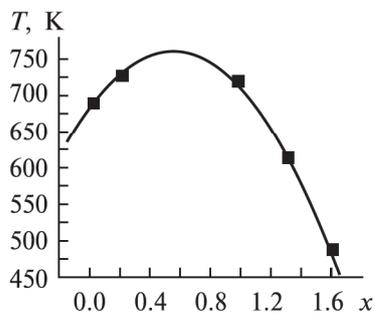


Рис. 2. Температура Кюри в зависимости от концентрации

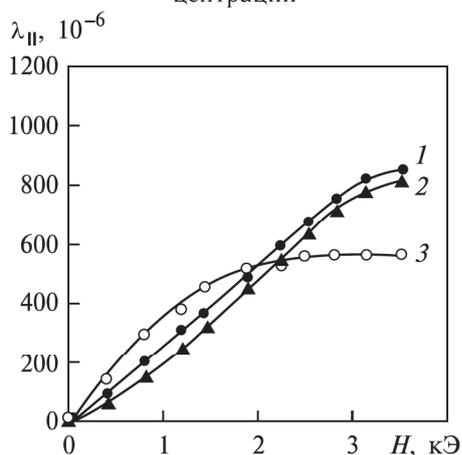


Рис. 3. Полевая зависимость продольной магнитострикции  $\lambda_{||}$  при  $T = 300$  К для соединений  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{2-x}Co_x$ :  $x = 0$  (1), 0.2 (2), 1.3 (3)

магнитном поле  $H = 500$  Э) как температура наиболее резкого падения намагниченности при переходе из ферромагнитного состояния в парамагнитное. На рис. 2 приведена концентрационная зависимость  $T_C$ . Кривая  $T_C = f(x)$  имеет куполообразную форму с максимумом, приходящимся на область промежуточных концентраций  $0.2 < x < 1.0$ .

На рис. 3 приведены полевые зависимости продольной магнитострикции для изученных соединений при  $T = 300$  К в магнитных полях с напряженностью от 0 до 3.5 кЭ. Видно, что с увеличением содержания кобальта значение магнитострикции уменьшается. Однако для технического использования сплавов, как уже упоминалось выше, важно, чтобы высокие значения магнитострикции достигались в области слабых магнитных полей (т.е. важно получить высокие значения магнитострикционной восприимчивости). Из рисунка видно, что в области слабых магнитных полей ( $H \leq 2$  кЭ) для состава  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{0.7}Co_{1.3}$  (кривая 3) значения магнитострикции превышают значения для составов с высоким содержанием Fe:  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  (кривая 1) и  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.8}Co_{0.2}$  (кривая 2). На рис. 4 показано, как выглядит зависимость магнитострикционной восприимчивости  $\partial\lambda_{||}/\partial H$  от концентрации Co для сплавов системы  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{2-x}Co_x$  при  $T = 300$  К. Видно, что состав с  $x = 1.3$  обладает максимальным значением  $\partial\lambda_{||}/\partial H$ .

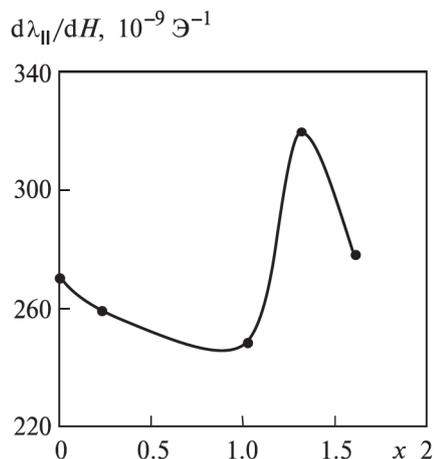


Рис. 4. Концентрационная зависимость  $\partial\lambda_{||}/\partial H$  для сплавов системы  $Tb_{0.3}Dy_{0.67}Fe_{2-x}Co_x$  при  $T = 300$  К

Мёссбауэровские спектры сплавов системы  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{2-x}Co_x$  измерялись на спектрометре Ms1104E<sub>m</sub>. На рис. 5 приведен мёссбауэровский спектр сплава  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ . Полученные мёссбауэровские спектры образцов обрабатывались с помощью программы UNIVEM MS.

Особенностью кристаллографической структуры сплавов  $RFe_2$  является тот факт, что из четырех атомов Fe три атома имеют одинаковое расположение осей градиента электрического поля (ГЭП) по отношению к оси легкого намагничивания (это ось [111]). Этот угол составляет  $72^\circ$ . И только один атом имеет совпадающие по направлению оси ГЭП и магнитного поля. Поэтому при обработке мёссбауэровских спектров использовалась модель двух секстетов (один соответственно для трех атомов Fe и другой — для одного атома в элементарной ячейке). В результате обработки получено, что: 1) изомерные сдвиги и квадрупольные расщепления практически не изменяются от сплава к сплаву; 2) соотношение интенсивностей двух секстетов колеблется около величины 3:1; 3) ширины линий изменяются от 0.28 мм/с для сплава с  $x = 0$  до 0.48 мм/с для сплава с  $x = 1.3$  (это свидетельствует о появлении локальных неоднородностей при замене атомов железа на атомы кобальта).

Наиболее информативным параметром оказалась величина сверхтонкого поля  $H_{\text{eff}}$ . Мы построили концентрационную зависимость сверхтонкого магнитного поля  $H_1$  и  $H_2$  ( $H_{\text{eff}} = f(x)$ , рис. 6). Форма полученных зависимостей куполообразна.

Интересно сравнить свойства этих сплавов со свойствами сплавов Fe–Co, а также Fe–Ni и другими сплавами переходных металлов. Значения намагниченности насыщения на атом сплава, измеренной в магнетонах Бора, принимают максимальные величины в области сплава железо–кобальт и затем линейно уменьшаются как по направлению к Mn, Cr, так и к Ni, Cu (кривая Слэтера–Паулинга).

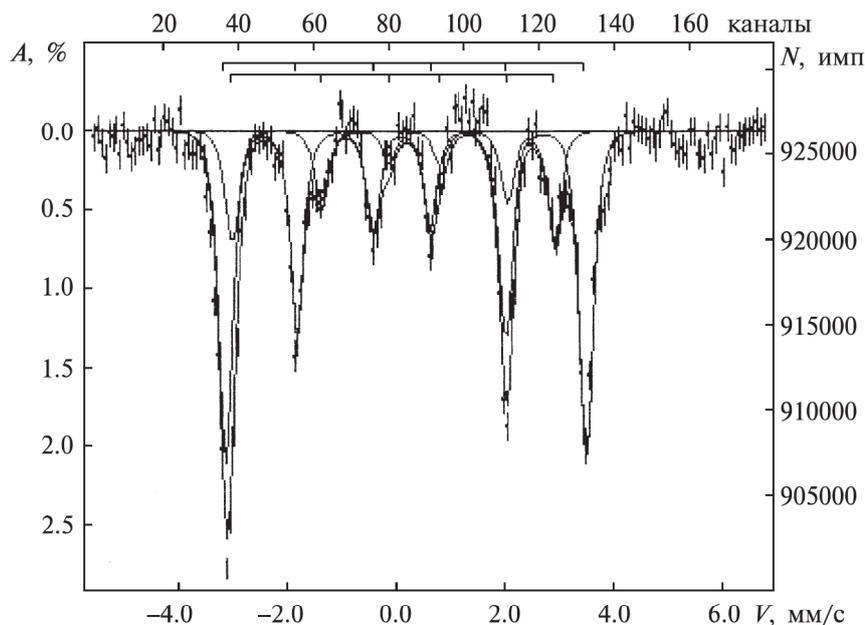


Рис. 5. Мёссбауэровский спектр сплава  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$

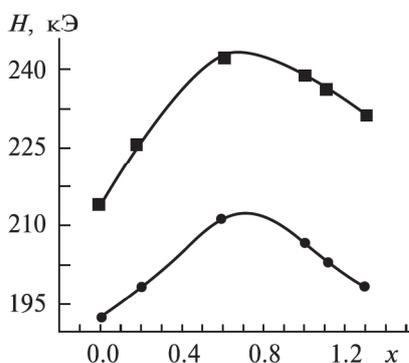


Рис. 6. Сверхтонкое поле в сплаве  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  в зависимости от  $x$

Проведенное сравнение позволяет нам сделать выводы о том, что соединения на основе железа со структурой фаз Лавеса имеют простые магнитные свойства. Простота этих свойств связана с тем, что магнитные свойства подрешетки железа почти совсем не зависят от ионов редких земель. Последние ведут себя почти как парамагнитные ионы, выстраиваемые полем, действующим на них со стороны подрешетки железа.

Таким образом, в результате комплексных исследований системы  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{2-x}Co_x$  получены следующие результаты: 1) синтезированы практически однофазные соединения в интервале концентраций  $0 \leq x \leq 1.6$ , изотипные кубической фазе Лавеса  $C15$ ; 2) установлено, что концентрационная зависимость параметра элементарной ячейки с увеличением содержания кобальта от  $x=0$  до  $x=1.3$  демонстрирует монотонное уменьшение от  $a = 7.328 \text{ \AA}$  до  $a = 7.295 \text{ \AA}$ ; 3) установлено, что температура Кюри возрастает в области концентраций  $0.2 \leq x \leq 1.0$ , а затем падает, демонстрируя

куполообразную форму; 4) определены значения сверхтонких полей на ядрах  $^{57}Fe$  в двух положениях атома железа  $H_1$  и  $H_2$ , и установлено, что форма их концентрационной зависимости также куполообразна; 5) установлено, что ось легкого намагничивания во всех сплавах совпадает с направлением  $\langle 111 \rangle$ , в результате чего атомы железа оказываются в двух магнитно неэквивалентных положениях; 6) показано, что высокая концентрация кобальта в этих сплавах позволяет достичь высоких значений магнитострикции в слабых (до 2 кЭ) магнитных полях. Состав с содержанием кобальта  $x = 1.3$  обладает максимальным значением  $\partial \lambda_{\parallel} / \partial H$  и потому наиболее перспективен для практического использования в области полей от 1 до 2 кЭ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной программы поддержки ведущих научных школ (грант НШ-8701.2006.2) и РФФИ (грант 06-03-32850).

#### Литература

1. Белов К.П. Магнитострикционные явления и их приложения. М., 1987.
2. Белов К.П., Белянчикова В.А., Левитин Р.З., Никитин С.А. Редкоземельные ферро- и антиферромагнетики. М., 1965.
3. Тейлор К. Интерметаллические соединения редкоземельных металлов. М., 1974.
4. Илюшин А.С. Введение в структурную физику редкоземельных интерметаллических соединений. М., 1991.
5. Никитин С.А., Терешина И.С. и др. // Материаловедение. 2001. **12**, № 57. С. 29.

Поступила в редакцию  
03.07.06