

05,11

## Сверхтонкие магнитные взаимодействия в сплавах системы $Tb(Fe_{1-x}Al_x)_2$

© А.С. Илюшин, А.А. Опаленко, А.И. Фиров, Е.В. Солодов, З.С. Умхаева

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

E-mail: tellur125@mail.ru

(Поступила в Редакцию 25 июля 2013 г.)

Измерены структурные и магнитные характеристики фазовых превращений в системе сплавов  $Tb(Fe_{1-x}Al_x)_2$  с концентрациями  $x = 0-0.9$  в области температур от 90 до 450 К. Методом мёссбауэровской спектроскопии найдены температурные зависимости сверхтонких магнитных полей для каждой локальной конфигурации окружения атомов железа при замещении атомов железа атомами алюминия.

### 1. Введение

Редкоземельные интерметаллические соединения со структурой фаз Лавеса на протяжении многих лет являются модельными объектами теоретического и экспериментального исследования [1]. Разработанные на их основе магнитные материалы уже нашли широкое применение в качестве магнитоотрицателей [2]. Открытая для соединения терфенол гигантская магнитоотрицательность позволила исследователям наметить пути поисков составов сплавов, обеспечивающих нужные магнитоупругие свойства. В последние годы интерес исследователей вызывают многокомпонентные системы на основе этих интерметаллидов, в частности разбавленных немагнитными атомами [3,4].

Целью настоящей работы является измерение сверхтонких магнитных взаимодействий в сплавах квазибинарной системы  $Tb(Fe_{1-x}Al_x)_2$  и их зависимостей от температуры. В качестве методов исследования выбраны рентгеноструктурный анализ поликристаллов и температурная мёссбауэровская спектроскопия.

### 2. Эксперимент

Образцы системы сплавов  $Tb(Fe_{1-x}Al_x)_2$  были приготовлены путем дуговой плавки на медном водоохлаждаемом поду в атмосфере аргона. В качестве исходных компонентов использовались металлы чистой не менее 99.98%. После плавки слитки массой около 2 г переплавлялись еще 2–3 раза и подвергались гомогенизирующему отжигу при температуре 750°C в течение 200 ч. Рентгеновское исследование проводилось на порошковых образцах на дифрактометре ДРОН-3М. Съемка велась в автоматическом режиме на фильтрованном  $Fe K\alpha$ -излучении.

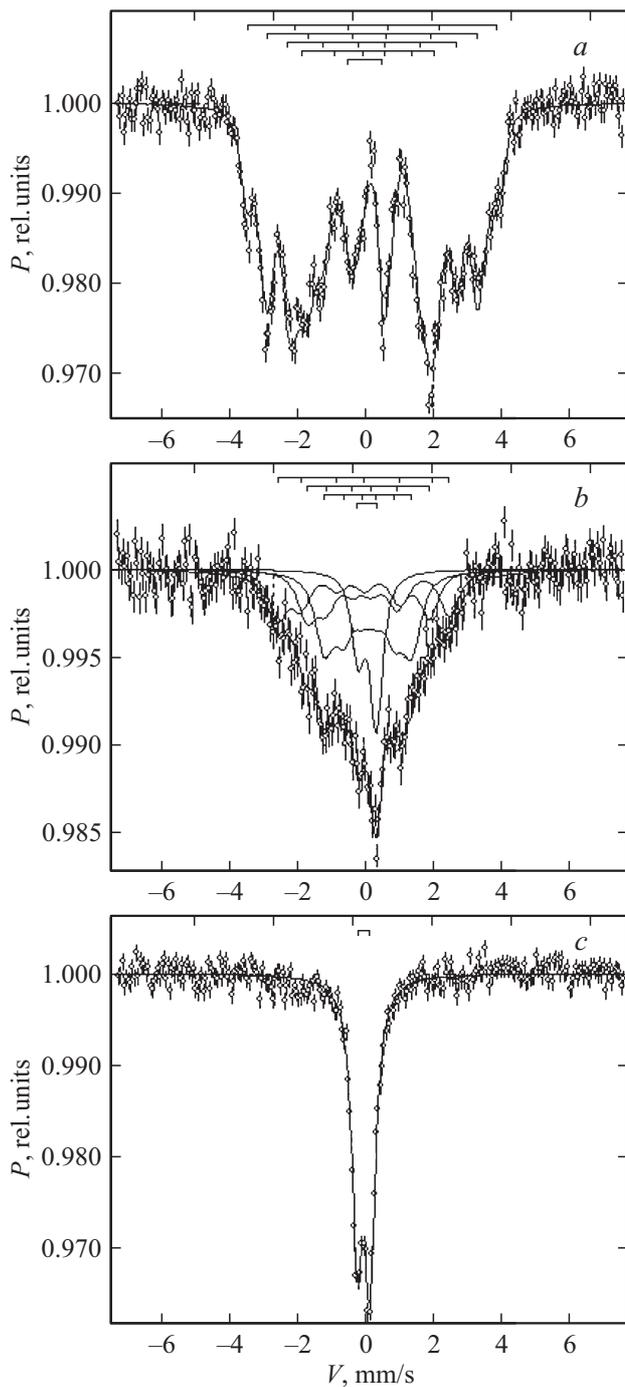
Рентгеноструктурный анализ сплавов показал, что в области концентраций  $Al$   $0 \leq x < 0.3$  они однофазны и их структура изотипна кубической фазе Лавеса типа  $C15$ . На дифрактограммах сплавов в области концентраций  $0.3 < x \leq 0.5$  присутствуют рефлексы, од-

нозначно индицирующиеся в гексагональной сингонии, характерной для структуры фазы Лавеса типа  $C14$ . Наконец, в области  $0.6 < x \leq 1$  формируется кубическая структура  $C15$ . В таблице представлены параметры элементарных ячеек для сплавов различного состава.

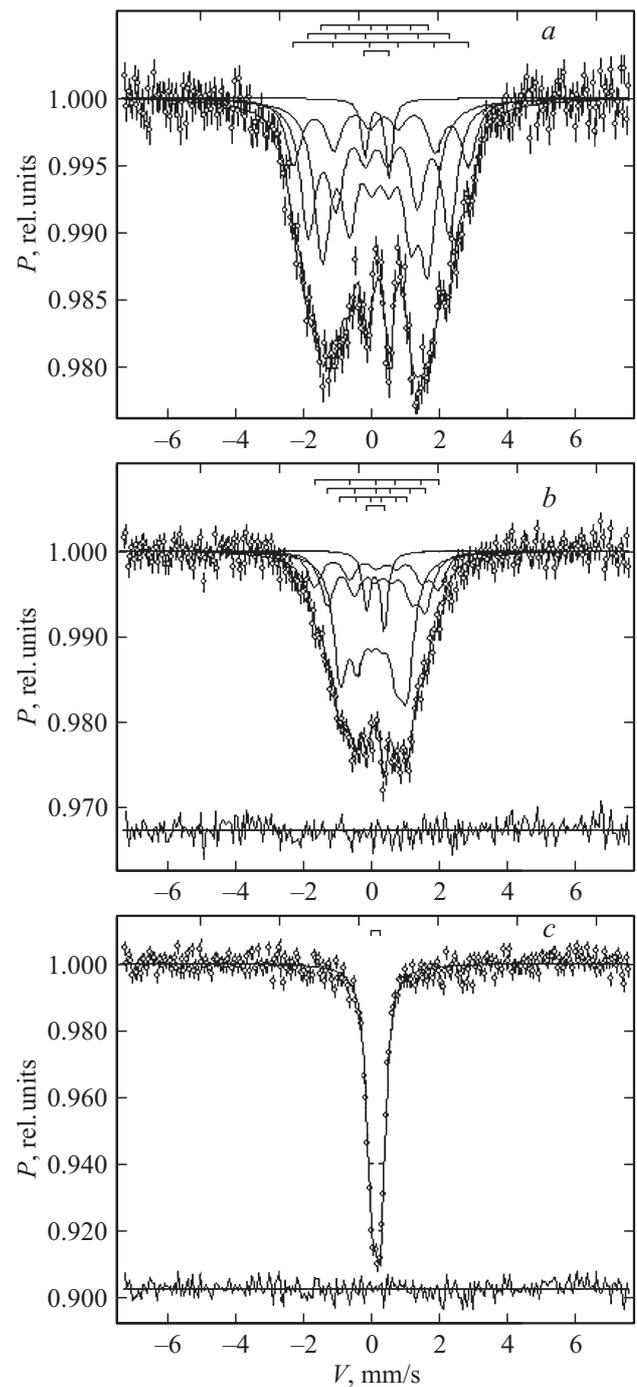
Мёссбауэровские спектры измерялись на спектрометре MS 1104Em с температурными приставками, обеспечивающими возможность изменять температуру в интервале от 90 до 450 К. Образцы полученных мёссбауэровских спектров для концентрации  $x = 0.2$  и  $0.4$  приведены на рис. 1 и 2. Из рис. 1 видно, что при температуре 90 К мёссбауэровский спектр обладает хорошо разрешенной сверхтонкой структурой. Это обстоятельство свидетельствует о том, что сплав находится в магнитоупорядоченном состоянии. По мере увеличения температуры происходит сужение мёссбауэровского спектра и уменьшение его разрешения. При температуре 450 К спектр представляет собой квадрупольный парамагнитный дублет. Аналогичная картина наблюдается при температурных измерениях сплава состава с  $x = 0.4$  (рис. 2). С повышением температуры от 90 до 250 К ширина спектра уменьшается. При достижении температуры 250 К сплав полностью переходит в парамагнитное состояние.

Параметры решетки сплавов системы  $Tb(Fe_{1-x}Al_x)_2$

Состав сплава	$a$ , Å	$c$ , Å
$Tb(Fe_{0.95}Al_{0.05})_2$	$7.367 \pm 0.005$	
$Tb(Fe_{0.9}Al_{0.1})_2$	$7.394 \pm 0.005$	
$Tb(Fe_{0.8}Al_{0.2})_2$	$7.436 \pm 0.005$	
$Tb(Fe_{0.75}Al_{0.25})_2$	$7.480 \pm 0.005$	
$Tb(Fe_{0.7}Al_{0.3})_2$	$7.493 \pm 0.005$	
$Tb(Fe_{0.65}Al_{0.35})_2$	$5.319 \pm 0.007$	$8.695 \pm 0.009$
$Tb(Fe_{0.6}Al_{0.4})_2$	$5.331 \pm 0.007$	$8.717 \pm 0.009$
$Tb(Fe_{0.5}Al_{0.5})_2$	$5.389 \pm 0.007$	$8.739 \pm 0.009$
$Tb(Fe_{0.4}Al_{0.6})_2$	$7.662 \pm 0.005$	
$Tb(Fe_{0.3}Al_{0.7})_2$	$7.703 \pm 0.005$	
$Tb(Fe_{0.2}Al_{0.8})_2$	$7.769 \pm 0.005$	
$Tb(Fe_{0.1}Al_{0.9})_2$	$7.811 \pm 0.005$	



**Рис. 1.** Мёссбауэровские спектры сплава  $Tb(Fe_{0.8}Al_{0.2})_2$  при температуре 90 (a), 375 (b) и 450 К (c).



**Рис. 2.** Мёссбауэровские спектры сплава  $Tb(Fe_{0.6}Al_{0.4})_2$  при температуре 90 (a), 200 (b) и 250 К (c).

### 3. Результаты и обсуждение

Мёссбауэровские спектры были обработаны по программе Univem MS и представлены в виде суперпозиции секстетов, отвечающих за магнитоупорядоченное состояние, и дублетов, характеризующих парамагнитное состояние.

Известно, что исходное соединение  $TbFe_2$  представляет собой ферромагнетик с направлением оси легкого

намагничивания вдоль кристаллографической оси  $\langle 111 \rangle$ . Для соединения  $TbFe_2$  величины сверхтонких магнитных полей на ядре  $Fe^{57}$  и значение температуры Кюри хорошо известны из литературы. Атомы железа в этом соединении находятся в двух магнитно-неэквивалентных положениях, причем соотношение этих атомов 3 : 1. Это в свою очередь приводит к появлению в мёссбауэровском спектре двух парциальных спектров с отношением интегральных интенсивностей 3 : 1.

Известно, что в решетках фаз Лавеса типа C14 и C15 каждый атом железа имеет в ближайшем окружении шесть атомов железа [5] и при однородном распределении атомов примеси вероятность нахождения  $m$  атомов алюминия в ближайшем окружении атома железа определяется по формуле биномиального распределения  $P_6^m(x) = C_6^m x^m (1-x)^{6-m}$ .

Спектры образцов, приведенные на рис. 1 и 2, могут быть представлены в виде суммы четырех секстетов. Первые два поля с отношением интенсивностей, близким к 3:1, мы трактуем как относящиеся к случаю, когда в ближайшем окружении атома железа нет атомов алюминия ( $m = 0$ ). Третье поле отвечает наличию одного атома алюминия ( $m = 1$ ) в ближайшем окружении атома железа, четвертое поле — наличию двух атомов алюминия ( $m = 2$ ). Суммарная интенсивность  $H_1$  и  $H_2$  составляет 73%, для  $H_3$  интенсивность равна 20%, для  $H_4$  — 3%. Эти цифры полностью соответствуют одно-

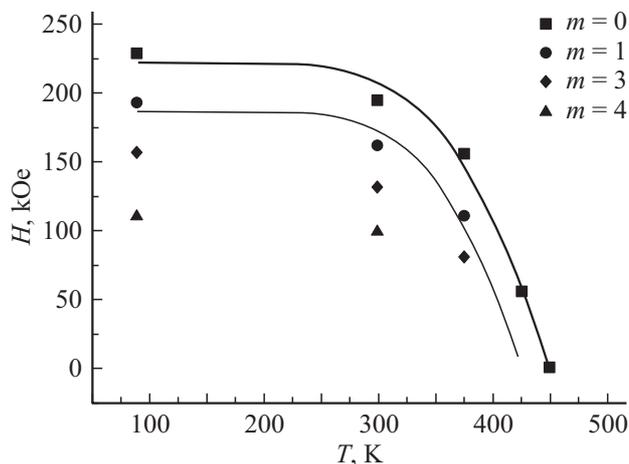


Рис. 3. Температурная зависимость напряженности сверхтонких магнитных полей на атомах железа в сплаве Tb(Fe<sub>0.8</sub>Al<sub>0.2</sub>)<sub>2</sub> для различных конфигураций ближайшего окружения.

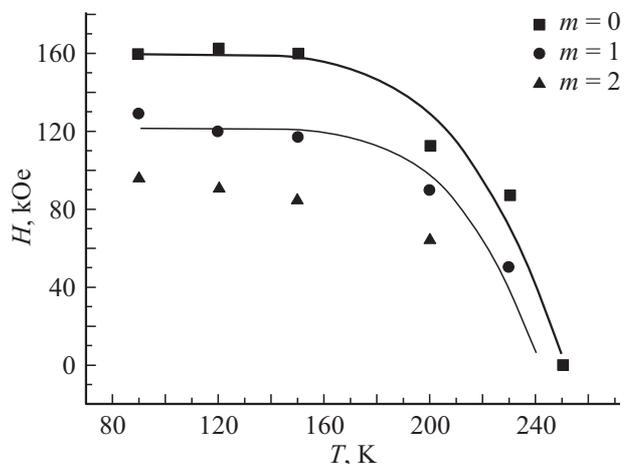


Рис. 4. Температурная зависимость напряженности сверхтонких магнитных полей на атомах железа в сплаве Tb(Fe<sub>0.6</sub>Al<sub>0.4</sub>)<sub>2</sub> для различных конфигураций ближайшего окружения.

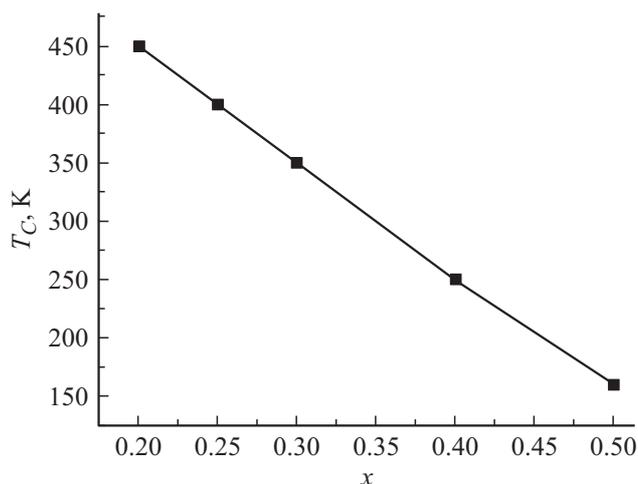


Рис. 5. Зависимость температуры Кюри системы сплавов Tb(Fe<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>)<sub>2</sub> от концентрации алюминия.

родному распределению атомов примеси в ближайшем окружении атома железа, определяемом по формуле биномиального распределения  $P_6^m(x)$ . И наконец, отношение интенсивностей двух первых секстетов 3:1 свидетельствует об ориентации оси легкого намагничивания вдоль кристаллографического направления  $\langle 111 \rangle$ .

Проведенная нами обработка мёссбауэровских спектров для сплавов составов с  $x = 0.2$  и  $0.4$  позволила определить температурные зависимости величин сверхтонких полей на ядрах железа, находящихся в различных локальных конфигурациях ближайшего окружения. Эти зависимости представлены на рис. 3 и 4. Видно, что по мере возрастания температуры значения сверхтонкого магнитного поля нелинейно уменьшаются подобно кривым Бриллюэна.

На рис. 5 представлена концентрационная зависимость температуры Кюри для наиболее богатой железом концентрационной неоднородности сплавов системы Tb(Fe<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>)<sub>2</sub>, которая согласуется с данными магнитных температурных измерений. Видно, что температура Кюри линейно уменьшается от 450 до 160 К при замещении атомов железа атомами алюминия от 20 до 50 at.%.

#### 4. Заключение

В работе впервые синтезированы сплавы квазибинарной системы Tb(Fe<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>)<sub>2</sub> и проведено их рентгеноструктурное и мёссбауэровское исследование. Определены фазовый состав, параметры кристаллической структуры и магнитные характеристики сверхтонких полей. С помощью метода мёссбауэровской спектроскопии обнаружено, что во всех сплавах сформированы локальные концентрационные неоднородности, характеризующиеся различными конфигурациями ближайшего окружения атомов железа.

Методом температурной мёссбауэровской спектроскопии установлено, что в сплаве состава с  $x = 0.2$

реализуются четыре концентрационные конфигурации, а в сплаве состава с  $x = 0.4$  — три концентрационные конфигурации.

Определены температурные характеристики каждой локальной неоднородности. Показано, что температура Кюри массивного образца определяется температурой перехода локальных неоднородностей с наибольшим содержанием железа.

## Список литературы

- [1] Ф. Лавес. В сб.: Интерметаллические соединения / Под ред. Дж. Вестбрука. Металлургия, М. (1970). С. 139.
- [2] К.П. Белов. Магнитострикционные явления и их приложения. Наука, М. (1987). 250 с.
- [3] А.С. Илюшин, С.А. Никитин, В.Н. Нгуен, А.А. Опаленко, И.С. Терешина, А.И. Фиров. Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия 4, 35 (2007).
- [4] А.А. Опаленко, А.С. Илюшин, А.И. Фиров, Е.В. Солодов, З.С. Умхаева. ФТТ 53, 10, 1963 (2011).
- [5] А.С. Илюшин. Основы структурной физики редкоземельных интерметаллических соединений. Изд-во МГУ, М. (2005). 176 с.