

05,01

## Изменение интеграла обменного взаимодействия при внедрении атомов водорода в кристаллическую решетку терфенола

© А.А. Алероев<sup>1,2</sup>, И.С. Терёшина<sup>1</sup>, Т.А. Алероева<sup>3</sup>, Н.Ю. Панкратов<sup>1,¶</sup>, С.А. Никитин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup> Грозненский государственный нефтяной технический университет, Грозный, Россия

<sup>3</sup> Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия

¶E-mail: pankratov@phys.msu.ru

Поступила в Редакцию 18 июня 2024 г.

В окончательной редакции 18 июня 2024 г.

Принята к публикации 20 июня 2024 г.

Исследовано влияние гидрирования на структурные и магнитные характеристики соединения  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  (Терфенол-Д). Получен гидрированный состав  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$  с температурой Кюри вблизи комнатной и точкой магнитной компенсации при  $T = 140$  К. Установлены основные механизмы, ответственные как за изменение температуры Кюри при гидрировании, так и за возникновение заметной по величине объемной магнитострикции в области температуры Кюри. Определено изменение результирующего обменного интеграла при внедрении фиксированного количества атомов водорода ( $3 \text{ at.H/form.unit}$  в кристаллическую решетку соединения  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ ).

**Ключевые слова:** редкоземельные соединения, фазы Лавеса, гидриды, температура Кюри, магнитострикция.

DOI: 10.61011/FTT.2024.08.58603.156

### 1. Введение

В настоящее время соединения типа  $RFe_2$  со структурой фаз Лавеса привлекают внимание не только с практической, но и с фундаментальной точки зрения [1–3]. Благодаря простой кристаллической и магнитной структуре, эти соединения рассматриваются теоретиками как модельные объекты, способные демонстрировать высокую температуру Кюри, большую намагниченность насыщения, гигантскую магнитострикцию, большой магнитокалорический эффект [4–5]. К примеру, магнитострикционные деформации соединений  $TbFe_2$  и  $DyFe_2$  в области температур близких к комнатной, достигают значений  $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ . Оба состава обладают значительной по величине магнитокристаллической анизотропией (МКА), и, следовательно, максимальные значения магнитострикции могут быть получены только в достаточно сильных магнитных полях. Подобрать вполне определенное соотношение тербия и диспрозия, оказалось возможным значительным образом уменьшить МКА. Данный подход привел к открытию состава  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  (в литературе это соединение со структурой фаз Лавеса, а также уточненный состав  $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95}$ , называют терфенол-Д) [6]. Благодаря гигантской магнитострикции ( $\lambda \sim 10^{-2}$ ) при комнатной температуре, наблюдаемой в относительно слабых магнитных полях (из-за малой величины магнитокристаллической анизотропии), терфенол-Д широко используют в гидроакустике, магни-

тострикционных силовых приводах, микроэлектронике и других областях [7–9].

Следует особо отметить тот факт, что соединения  $RFe_2$  легко поглощают водород [9], максимальное количество которого может достигать  $4 \text{ at.H/form.unit}$ . Атомы водорода, проникая в кристаллическую решетку данных соединений и располагаясь в междоузлиях, как правило, не вызывают изменение типа кристаллической структуры. Однако, в зависимости от количества поглощенного водорода изменение объема элементарной ячейки, межатомных расстояний между магнитоактивными атомами, а также изменение магнитных свойств может быть значительным [9–12]. Гидрированные образцы приобретают новые свойства, отличные от своих исходных составов, что может значительно расширить область применения данных материалов, например, в качестве датчиков и сенсоров в водородной энергетике.

В связи с вышеизложенным, целью данной работы стало получение гидрированных образцов терфенола, исследование их структурных, магнитных и магнитострикционных свойств, установление основных физических механизмов, ответственных за изменение температуры Кюри и возникновение объемной магнитострикции вблизи температуры Кюри при внедрении фиксированного количества водорода ( $3 \text{ at.H/f.u.}$ ) в кристаллическую решетку  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ , а также оценка относительно изменения результирующего обменного интеграла при гидрировании.

## 2. Получение образцов и методика эксперимента

Синтез исходного образца  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  проводился в индукционной печи в атмосфере аргона путем плавления исходных компонентов Tb (99.5%), Dy (99.3%), Fe (99.9%). Все основные детали такого синтеза можно найти в работе [13]. Гидрид исходного соединения был получен как результат прямой реакции исходного образца с газообразным водородом высокой чистоты, полученным при разложении дигирида титана  $TiH_2$ . Подробности процедуры гидрирования и определения количества водорода, поглощенного исходным образцом, также изложены ранее в работе [14].

Нами был получен гидрид с достаточно высоким содержанием водорода, а именно 3 at.H/form.unit. Фазовый состав исходного образца и его гидроксида контролировался методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-3М. Температура Кюри образцов определялась с помощью термомагнитного анализа, который был выполнен с использованием маятникового магнетометра в широком интервале температур 80–720 К во внешнем магнитном поле 1 кОе.

Измерение магнитострикции производилось с помощью тензометрического метода на установке с использованием электромагнита ФЛ-1 в интервале температур 80–300 К в магнитных полях до 12 кОе [15]. Сравнительные исследования магнитострикции для исходного состава и его гидроксида были сопряжены с определенными сложностями. Поскольку литые образцы в процессе гидрирования разрушаются, образуя мелкодисперсный порошок, для измерения магнитострикции использовались порошковые образцы как гидроксида, так и исходного состава. Порошки прессовались под давлением 3 ГПа в таблетки диаметром 10 мм толщиной 3 мм. На прессованных образцах измерялась продольная  $\lambda_{||}$  и поперечная  $\lambda_{\perp}$  магнитострикция. Объемная магнитострикция вычислялась по формуле

$$\omega = \lambda_{||} + 2\lambda_{\perp}. \quad (1)$$

## 3. Результаты и обсуждение

Рентгеноструктурный анализ показал, что все полученные составы, а именно исходное соединение  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  и его гидрид  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$  являются практически однофазными и имеют кубическую структуру типа  $MgCu_2$ . Параметр решетки ( $a$ ) для  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  и его гидроксида помещены в таблицу. Полученные данные хорошо согласуются с литературными данными [13,14]. Кроме этого, в таблице приводится объем элементарной ячейки  $V$  и относительное изменение объема элементарной ячейки  $\Delta V/V$  при гидрировании. Установлено, что увеличение объема элементарной ячейки  $\Delta V/V$  при гидрировании достигает 20.2% для гидроксида  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$  (в пересчете на один атом водорода

Структурные и магнитные параметры соединений  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_x$  (где  $x = 0$  и 3) и  $YFe_2H_x$  ( $x = 0$  и 4) (параметр решетки  $a$ , объем элементарной ячейки  $V$ , относительное изменение объема  $\Delta V/V$ , температура Кюри  $T_C$ , изменение температуры Кюри  $\Delta T_C$ , температура магнитной компенсации  $T_k$ )

Состав	$a, \text{Å}$	$V, \text{Å}^3$	$\Delta V/V, \%$	$T_C, \text{K}$	$\Delta T_C, \text{K}$	$T_k, \text{K}$
$Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$	7.324	392.8	—	665	—	—
$Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$	7.789	472.5	20.2	294	371	140
$YFe_2$	7.357	398.2	—	545	—	—
$YFe_2H_4$	7.973*	506.8	27.2	133	412	—

Примечание. \* Параметр решетки, рассчитанный для кубической структуры типа  $MgCu_2$ .

$\Delta V/V = 6.7\%$ ). В таблице для сравнения представлены структурные параметры бинарного соединения  $YFe_2$  (итрий — слабомагнитный аналог редкоземельных элементов) и его гидроксида с максимальным содержанием водорода  $YFe_2H_4$  [16–18]. Видно, что для последнего  $\Delta V/V = 27.2\%$ , а, следовательно,  $\Delta V/V$  в пересчете на один атом водорода, составляет 6.8%, что достаточно хорошо коррелирует с данными для гидроксида  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$  [16,19]. Более того, важно отметить, что тип редкоземельного атома не оказывает заметного влияния на величину изменения объема элементарной ячейки  $\Delta V/V$  при гидрировании.

На рис. 1 представлены результаты термомагнитного анализа для  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  и его гидроксида  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$ . Видно, что величина намагниченности  $\sigma$  исследуемых составов при нагреве и приближении к температуре Кюри резко уменьшается (в случае исходного состава намагниченность падает практически до 0). Температуру Кюри мы определили из анализа температурной зависимости производной намагниченности по температуре

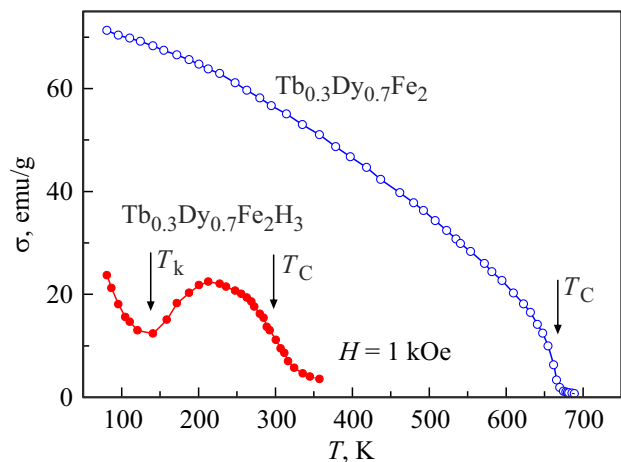
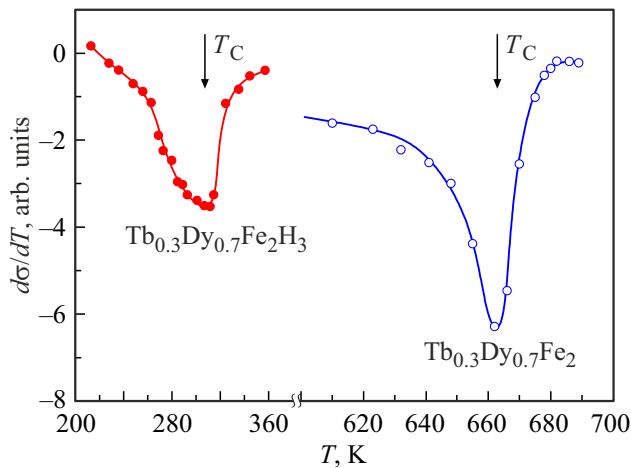


Рис. 1. Термомагнитный анализ  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  и его гидроксида  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$ .



**Рис. 2.** Температурная зависимость  $d\sigma/dT$  для  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$  и  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ .

$d\sigma/dT$  (см. рис. 2). Значения  $T_C$ , соответствующие минимуму производной  $d\sigma/dT$ , также представлены в таблице. Видно, что для  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_x$ , где  $x = 0$  и 3, значения температуры Кюри составляют 665 и 294 К соответственно. Данные значения хорошо согласуются с известными литературными данными для таких составов, как  $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_2$  и  $Tb_{0.41}Dy_{0.59}Fe_2$  [13,14]. В таблице показано также изменение температуры Кюри  $\Delta T_C$ , равное 371 К при внедрении 3 атомов водорода в кристаллическую решетку исходного соединения. Таким образом, гидрид  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$  имеет температуру магнитного упорядочения вблизи комнатной температуры, что может быть важно с практической точки зрения.

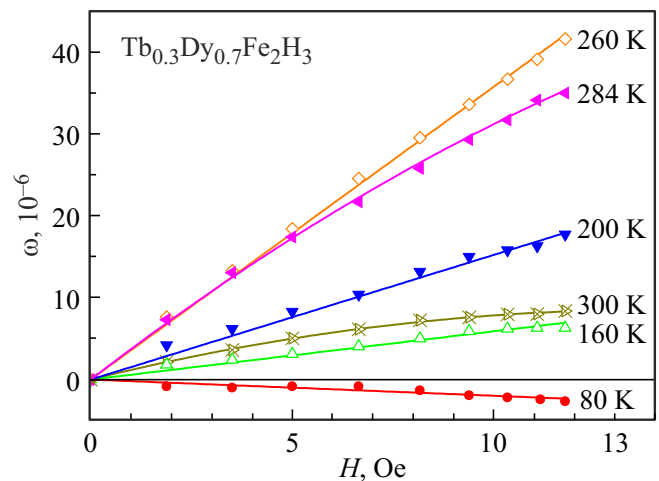
Более того, для гидрида  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$  наблюдается еще один ярко выраженный минимум на кривой  $M(T)$  в области низких температур (см. рис. 1), вблизи  $T_k \sim 140$  К. Уменьшение намагниченности можно объяснить явлением компенсации магнитных моментов редкоземельной и железной подрешеток в гидрированном образце. Данное явление не наблюдается в исходном составе  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ . Следовательно, в результате гидрирования могут быть получены образцы с новым набором магнитных характеристик: варьируя содержание водорода в образцах, можно менять температуру Кюри и температуру магнитной компенсации.

На рис. 3 и 4 показаны полевые и температурные зависимости объемной магнитоэлектрической для гидрида  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$  соответственно. Из рис. 3 видно, что в области температур ниже и выше точки магнитной компенсации ( $T_k = 140$  К), значения объемной магнитоэлектрической малы (не превышают значения  $6 \cdot 10^{-6}$ ). Кривые  $\omega(H)$  демонстрируют линейный рост, тенденция к насыщению отсутствует в магнитных полях до 12 кОе. В то же самое время, в области температур  $T < T_C$  ( $T_C = 294$  К), объемная магнитоэлектрическая достигает значений на порядок выше ( $42 \cdot 10^{-6}$ ), возрастая линейно с увеличением напряженности магнитного поля. Из рис. 4

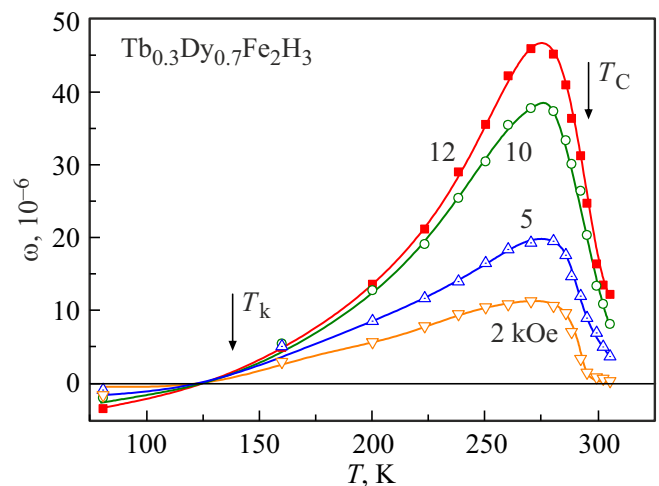
можно видеть, что в области температуры магнитной компенсации  $T_k \sim 140$  К объемная магнитоэлектрическая меняет знак с положительной (при  $T > T_k$ ) на отрицательную (при  $T < T_k$ ).

Из рис. 4 также следует, что температурная зависимость объемной магнитоэлектрической  $\omega(T)$  сохраняет максимальные значения в достаточно широком температурном интервале 260–285 К во внешнем магнитном поле 2 кОе. При увеличении напряженности магнитного поля до 12 кОе максимальные значения достигаются в более узком температурном интервале 265–280 К.

Напомним, что увеличение объема элементарной ячейки при гидрировании в первом приближении можно рассматривать как процесс обратный уменьшению объема  $V$  под действием гидростатического давления, т. е. как „отрицательное“ давление. Известно, что сжимаемость



**Рис. 3.** Полевые зависимости объемной магнитоэлектрической гидрида  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$  при разных температурах 80, 160, 200, 260, 284 и 300 К.



**Рис. 4.** Температурные зависимости объемной магнитоэлектрической гидрида  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$  в разных полях 2, 5, 10 и 12 кОе.

определяется по формуле

$$\mathcal{N} = \frac{\Delta V/V}{p}. \quad (2)$$

Тогда, можно определить величину смещения температуры Кюри ( $T_C$ ) под действием гидростатического давления с помощью следующего соотношения, связанного со смещением  $T_C$  при изменении объема элементарной ячейки  $\Delta V$ :

$$\frac{d \ln T_C}{dp} = -\frac{\mathcal{N}}{T_C} \frac{dT_C}{d \ln V} = -\mathcal{N} \frac{d \ln T_C}{d \ln V}. \quad (3)$$

Объемы элементарной ячейки исходного соединения  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  и его гидрида  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$  отличаются на величину

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V_{Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3} - V_{Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2}}{V_{Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2}} = 0.202. \quad (4)$$

Изменение температуры Кюри при изменении объема элементарной ячейки определяется по формуле

$$\Delta T_C = -\frac{T_C}{\mathcal{N}} \frac{\Delta V}{V} \frac{d \ln T_C}{dp}. \quad (5)$$

Тогда величину  $d \ln T_C/dp$  можно выразить как:

$$\frac{d \ln T_C}{dp} = \Delta T_C \frac{1}{\Delta V/V} \frac{\mathcal{N}}{T_C}. \quad (6)$$

Найдем величину  $d \ln T_C/dp$  исходя из того, что нам известна температура Кюри гидрида  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$  (см. таблицу), а также сжимаемость  $\mathcal{N} = 1.06 \cdot 10^{-3} \text{ kbar}^{-1}$  ( $1.06 \cdot 10^{-9} \text{ cm/din}$ ) [20]:

$$\frac{d \ln T_C}{dp} = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ kbar}^{-1}. \quad (7)$$

Эту же величину  $d \ln T_C/dp$  можно вычислить на основе известных термодинамических соотношений, связывающих такие величины, как объемная магнитострикция  $\omega$  и намагниченность  $M$ , и полагая, что в области парапроцесса (выше температуры Кюри) намагниченность  $M = \rho \sigma$  (где  $\rho$  — плотность) является функцией приведенной температуры ( $T/T_C$ ) и внешнего магнитного поля  $H$

$$\left(\frac{\partial \omega}{\partial H}\right)_p = -\left(\frac{\partial M}{\partial p}\right)_H = T \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_H \frac{\partial \ln T_C}{\partial p}. \quad (8)$$

Отсюда получаем

$$\frac{\partial \ln T_C}{\partial p} = \frac{1}{T \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_H} \left(\frac{\partial \omega}{\partial H}\right)_p. \quad (9)$$

Из экспериментальных данных полевых зависимостей объемной магнитострикции  $\omega(H)$  (см. рис. 3) было получено значение магнитострикционной восприимчивости

$$\left(\frac{\partial \omega}{\partial H}\right)_p = 3.4 \text{ kOe}^{-1}. \quad (10)$$

Используя экспериментальные данные по намагниченности, была вычислена производная

$$\left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_H = 2.2 \text{ G/K}$$

(плотность терфенола  $\rho = 9.25 \text{ g/cm}^3$ )

$$\frac{d \ln T_C}{dp} = 3.8 \cdot 10^{-3} \text{ kbar}^{-1}. \quad (11)$$

Сравнивая значения  $d \ln T_C/dp$ , полученные с помощью методов, использующих разные экспериментальные данные, подтверждено, что они имеют одинаковый порядок и близкие по величине значения.

Поэтому, далее представляло особый интерес определить относительное изменение результирующего интеграла обменного взаимодействия  $A$  для терфенола при изменении объема его элементарной ячейки. Величину такого изменения  $\alpha$  можно оценить по формуле

$$\alpha = \frac{d \ln A}{d \ln V} = \frac{d \ln T_C}{d \ln V} = -\frac{1}{\mathcal{N}} \frac{d \ln T_C}{dp}. \quad (12)$$

Мы нашли, что  $\alpha$  составляет 2.7. Такие же вычисления были выполнены и для соединения  $YFe_2$ , которые дали величину  $\alpha = 2.8$ . Полученные значения для терфенола  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  и  $YFe_2$  совпали в пределах точности наших расчетов. Таким образом, обнаружено, что в соединениях  $RFe_2$  тип редкоземельного атома не оказывает заметного влияния на относительное изменение результирующего интеграла обменного взаимодействия  $A$  при изменении объема элементарной ячейки. Отметим, что для чистых редкоземельных металлов, таких как тербий или гадолиний, величина  $\alpha$  меньше. Для Tb  $\alpha = 1.8$ , для Gd  $\alpha = 2$  [21]. В то же самое время, для соединения с высоким содержанием железа  $Y_2Fe_{17}$  величина  $\alpha$  намного ( $\alpha = 12$ ) превышает те значения, которые получены нами для терфенола  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  и  $YFe_2$ .

Магнитные свойства (в том числе и температура Кюри) перечисленных выше магнитных материалов определяются несколькими типами обменных взаимодействий. Так, для двухподрешечных магнетиков типа R-Fe (каким и является терфенол) свойства определяются тремя типами обменных взаимодействий: R-R, R-Fe и Fe-Fe [22]. Однако в чистых РЗМ имеет место только один тип обменного взаимодействия R-R, что соответствует наименьшей величине параметра  $\alpha$  [21]. В соединениях  $Y_2Fe_{17}$  и  $YFe_2$  также имеет место только один тип обменного взаимодействия Fe-Fe, поскольку трехвалентные ионы Y не несут заметного по величине магнитного момента. Тем не менее, величина  $\alpha$  для этих соединений сильно отличается (в  $\sim 4$  раза). Такое различие в редкоземельных интерметаллидах  $Y_2Fe_{17}$  и  $YFe_2$  может быть связано с соотношением Fe/R. Действительно, в случае соединений  $YFe_2$  и  $Y_2Fe_{17}$  это соотношение будет 2 и 8.5 соответственно, т.е. различие составит 4.25 и коррелирует с величиной  $\alpha$ . Соединение  $Y_2Fe_{17}$  известно, как соединение, в структуре

которого имеются „гантели“, образованные атомами Fe в кристаллографических позициях  $4f$ . Расстояния между атомами Fe в „гантелях“ меньше критического (согласно кривой Бэтте–Слетера), а параметр обменного взаимодействия между атомами Fe имеет отрицательный знак. В целом же, соединению  $Y_2T_{17}$  присущ смешанный тип обменных взаимодействий (как отрицательный, так и положительный) в парах Fe–Fe в зависимости от их кристаллографических позиций [23–24]. Смешанный тип оказывает колоссальное влияние на магнитные свойства (напомним, что температура Кюри соединения  $Y_2Fe_{17}$  с высоким содержанием Fe ненамного превосходит комнатную температуру,  $T_C = 341$  К).

В области температуры Кюри заметная по величине объемная магнитострикция возникает, как правило, из-за резкой зависимости интеграла обменного взаимодействия  $A$  от расстояний между магнитоактивными ионами (Fe–Fe и R–Fe) и является, по сути, обменной магнитострикцией. Как показано в работах [23,25], соединение  $Y_2Fe_{17}$  способно продемонстрировать очень высокие значения обменной магнитострикции, поскольку для него  $\alpha = 12$ .

Наши исследования показывали, что в гидриде  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$  величина объемной магнитострикции также демонстрирует большие значения вблизи температуры магнитного фазового перехода из ферромагнитного в парамагнитное состояние (температуры Кюри), благодаря высокому значению  $\alpha \sim 3$ . В этой области температур близких к комнатной, вклад обменной магнитострикции парапроцесса будет являться преобладающим в гидриде, в то время как другие вклады (от процессов вращения вектора намагниченности и смещения доменных границ) будут малы. Подобные составы, в которых можно варьировать содержание водорода с целью получения новых материалов с заданным комплексом свойств, весьма привлекательны для их практического использования, в частности, в водородной энергетике.

#### 4. Заключение

В работе проведена оценка относительного изменения интеграла обменного взаимодействия  $A$  при изменении объема элементарной ячейки терфенола  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  и  $YFe_2$ . Полученная величина  $\alpha \sim 3$  превосходит те значения, которые демонстрируют чистые редкоземельные металлы  $\alpha \sim 2$ , такие как тербий и гадолиний, но уступает значению, которое имеет соединение  $Y_2Fe_{17}$   $\alpha \sim 12$ . В  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  увеличение объема элементарной ячейки  $\Delta V/V$  наблюдается при внедрении атомов водорода в междоузлия структуры типа фаз Лавеса и достигает значений 20.2% для гидрида  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$ . В работе показано, что увеличение объема элементарной ячейки также возможно под действием внешнего приложенного магнитного поля. Именно поэтому в области температуры Кюри наблюдается заметная по величине объемная

магнитострикция, которая является фактически обменной магнитострикцией парапроцесса.

Найдено, что при гидрировании терфенола смещение температуры Кюри  $T_C$  составляет  $d \ln T_C / dp = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ kbar}^{-1}$ . В гидриде  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$  эта же величина, полученная из анализа данных по объемной магнитострикции в области температуры Кюри составляет  $3.8 \cdot 10^{-3} \text{ kbar}^{-1}$ . Близкие значения свидетельствуют о том, что заметная по величине магнитострикция в гидриде  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2H_3$  и смещение температуры Кюри в исходном соединении  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  при внедрении атомов водорода обусловлены одним и тем же механизмом, в основе которого лежит зависимость результирующего обменного интеграла  $A$  от объема элементарной ячейки, а следовательно от межатомных расстояний между магнитоактивными ионами.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] A.E. Clark. Magnetostrictive rare earth-Fe<sub>2</sub> compounds. Chapter 7. In: Handbook of Ferromagnetic Materials. Elsevier, Amsterdam 1, 531–589 (1980).
- [2] К.П. Белов. Магнитострикционные явления и их технические приложения. Наука, М. (1987). 160 с.
- [3] А.С. Илюшин. Основы структурной физики редкоземельных интерметаллических соединений. МГУ, М. (2005). 174 с.
- [4] F. Stein, A. Leineweber. J. Mater. Sci. **56**, 5321 (2021).
- [5] I.S. Tereshina, J. Ćwik, E.A. Tereshina, G. Politova, G. Burkhanov, V. Chzhan, A. Ilyushin, M. Miller, A. Zaleski, K. Nenkov, L. Schultz. IEEE Trans. Mag. **50**, 2504604(4) (2014).
- [6] R. Abbundi, A. Clark. IEEE Trans. Mag. **13**, 1519 (1977).
- [7] R. Grossinger, R. Sato Turtelli, N. Mehmood. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. **60**, 012002 (2014).
- [8] N.J. Wang, Y. Liu, H.W. Zhang, X. Chen, Y.-X. Li. China Foundry **13**, 2, 75 (2016).
- [9] G. Wiesinger, G. Hilscher. Magnetism of hydrides. In: Handbook of Magnetic Materials / Ed. K.H.J. Buschow. Elsevier, Amsterdam **17**, 293 (2008).
- [10] Н.К. Зайков, Н.В. Мушников, А.Е. Ермаков. ФММ **79**, 4, 50 (1995).
- [11] Н.В. Мушников, В.С. Гавико, Т. Гото. ФММ **100**, 24 (2005).
- [12] A.S. Ilyushin, I.S. Tereshina, N.Yu. Pankratov, T.A. Aleroeva, Z.S. Umhaeva, A.Yu. Karpenkov, T.Yu. Kiseleva, S.A. Granovsky, M. Doerr, H. Drulis, E.A. Tereshina-Chitrova. J. Alloys Comp. **847**, 155976 (2020).
- [13] Г.А. Политова, И.С. Терешина, С.А. Никитин, Т.Г. Соченкова, В.Н. Вербецкий, А.А. Саламова, М.В. Макарова. ФТТ **47**, 1834 (2005).
- [14] S.A. Nikitin, I.S. Tereshina, A.P. Touliakov, E.A. Tereshina. Low Temp. Phys. **27**, 4, 297 (2001).
- [15] V.Yu. Bodriakov, T.I. Ivanova, S.A. Nikitin, I.S. Tereshina. J. Alloys Comp. **259**, 265 (1997).
- [16] V. Paul-Boncour, O. Isnard, V. Shtender, Y. Skourski, M. Guillot. J. Magn. Magn. Mater. **512**, 167018 (2020).

- [17] V. Paul-Boncour, M. Guillot, G. Wiesinger, G. André. Phys. Rev. B **72**, 174430 (2005).
- [18] V. Paul-Boncour, M. Guillot, O. Isnard, B. Ouladdiaf, A. Hoser, T. Hansen, N. Stuesser. J. Solid State Chem. **245**, 98 (2017).
- [19] Z. Arnold, O. Isnard, V. Paul-Boncour. J. Appl. Phys. **133**, 173901 (2023).
- [20] M. Brouha, K.H.J. Buschow. J. Appl. Phys. **44**, 1813 (1973).
- [21] С.А. Никитин. Магнитные свойства РЗМ и их сплавов. Изд-во МГУ, М. (1989). 248 с.
- [22] С.А. Никитин. Вест. МГУ Сер. 3. Физика, астрономия **6**, 27 (2011).
- [23] S.A. Nikitin, N.Y. Pankratov, M.V. Makarova, I.S. Tereshina. J. Magn. Magn. Mater. **241**, 60 (2002).
- [24] S.A. Nikitin, I.S. Tereshina, N.Y. Pankratov, E.A. Tereshina, Y.V. Skourski, K.P. Skokov, Y.G. Pastushenkov. ФТТ **43**, 1720 (2001).
- [25] S.A. Nikitin, N.Y. Pankratov, A.I. Smarzhevskaya, G.A. Politova, Y.G. Pastushenkov, K.P. Skokov, A. del Moral. J. Appl. Phys. **117**, 193908 (2015).

*Редактор Т.Н. Василевская*