

**ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВОВ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

© Умхаева Зарган Сайпудиновна (а), Терешина Ирина Семеновна (б),  
Панкратов Николай Юрьевич (с), Алиев Ислам Магомедович (д)

- (а) Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Российская Федерация, г. Грозный; отдел материаловедения, заведующий отделом, доцент, доктор физико-математических наук, zargan.umhaeva@yandex.ru
- (б) Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Российская Федерация, г. Москва; кафедра физики твердого тела, внс, доктор физико-математических наук, irina\_tereshina@mail.ru
- (с) Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Российская Федерация, г. Москва; кафедра общей физики и магнитоупорядоченного состояния, доцент, кандидат физико-математических наук, pankratov@phys.msu.ru
- (д) Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Российская Федерация, г. Грозный; отдел материаловедения, снс, кандидат физико-математических наук, ialiew@mail.ru

**Аннотация.** В работе приводятся результаты исследования намагниченности сплавов многокомпонентной системы  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ , где параметр замещения принимает значения  $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ , в сильных магнитных полях, стационарных и импульсных.

Известно, что, варьируя концентрацию компонент, температуру и внешние поля, можно успешно влиять на величину обменных взаимодействий, приводящих к тому или иному типу магнитного упорядочения в редкоземельных интерметаллидах. Поэтому, основной целью в данной работе был поиск возможности наблюдения магнитного фазового перехода «ферримагнетизм - ферромагнетизм» в сплавах системы  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  по кривым полевых зависимостей намагниченности в сильных магнитных полях. Исследования проведены в стационарных полях до 14 Тл и в импульсных полях до 60 Тл. Приведенные в работе результаты получены при температуре кипения жидкого гелия. Определены основные магнитные характеристики сплавов данной системы, как намагниченность насыщения  $\sigma_s$ , магнитный момент на формульную единицу  $\mu$  и магнитный момент на атомах железа  $\mu_{Fe}$ . Установлены их зависимости от концентрации иттрия. Теоретически вычислены возможные значения магнитного момента на формульную единицу в случае ферромагнитного упорядочения данных сплавов. Сделан вывод о том, что данных полей недостаточно для наблюдения фазового перехода «ферримагнетизм - ферромагнетизм».

**Ключевые слова:** интерметаллические соединения, фазы Лавеса, импульсные магнитные поля, намагниченность, магнитный момент, температура Кюри.

**FEATURES OF THE BEHAVIOR OF A MULTICOMPONENT SYSTEM  
(Tb<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>)<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> ALLOYS IN STRONG MAGNETIC FIELDS**

© Umkhaeva Zargan Saipudinovna (a), Tereshina Irina Semenovna (b),  
Pankratov Nicolay Urievich (c), Aliev Islam Movldievich (d)

(a) Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Grozny; department of materials science, department head, docent, doctor of physical and mathematical sciences, zargan.umhaeva@yandex.ru

(b) Moscow State University by M.V. Lomonosov, Russian Federation, Moscow; department of solid state physics, leading researcher, doctor of physical and mathematical sciences, irina\_tereshina@mail.ru

(c) Moscow State University by M.V. Lomonosov, Russian Federation, Moscow; department of physics of magnetic phenomena, docent, candidate of physical and mathematical sciences, pankratov@phys.msu.ru

(d) Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Grozny; laboratory of metals, alloys and composite materials, leading researcher, candidate of physical and mathematical sciences, ialiew@mail.ru

**Abstract.** The paper presents the results of a study of the magnetization of alloys of a multicomponent system (Tb<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>)<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>, where the substitution parameter takes the values  $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ , in strong magnetic fields, stationary and pulsed.

It is known that by varying the concentration of components, temperature and external fields, it is possible to successfully influence the magnitude of exchange interactions leading to one or another type of magnetic ordering in rare-earth intermetallics. Therefore, the main goal in this work was to search for the possibility of observing the magnetic phase transition "ferrimagnetism - ferromagnetism" in alloys of the (Tb<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>)<sub>0.8</sub>Sm<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub> system by the curves of the field dependences of magnetization in strong magnetic fields. The studies were carried out in stationary fields up to 14 Тл and in pulsed fields up to 60 Тл. The results presented in this paper were obtained at the boiling point of liquid helium. The main magnetic characteristics of the alloys of this system are determined, such as saturation magnetization  $\sigma_s$ , magnetic moment per formula unit  $\mu$  and magnetic moment on iron atoms  $\mu_{Fe}$ . magnetic characteristics of alloys of this system, such as saturation magnetization  $\sigma_s$ , magnetic moment per formula unit  $\mu$  and magnetic moment on iron atoms  $\mu_{Fe}$ . Their dependences on the concentration of yttrium have been established. The possible values of the magnetic moment per formula unit in the case of ferromagnetic ordering of these alloys are theoretically calculated. It is concluded that these fields are not sufficient to observe the "ferrimagnetism - ferromagnetism" phase transition.

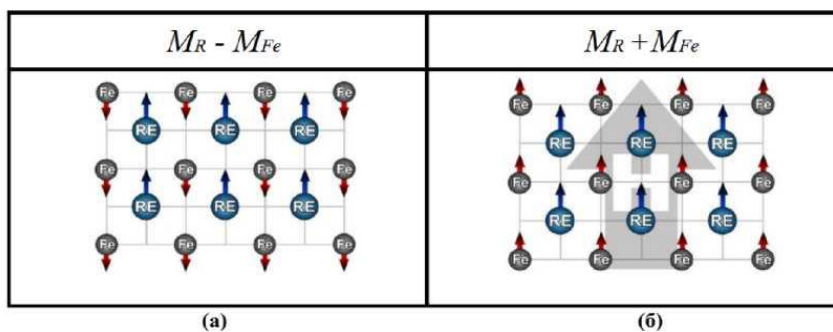
**Key words:** intermetallic compounds, Laves phases, pulsed magnetic fields, magnetization, magnetic moment, Cure temperature.

## 1. Введение

Интерметаллические соединения на основе редкоземельных металлов широко известны в науке и технике благодаря своим уникальным магнитным свойствам. Среди многочисленных редкоземельных интерметаллидов, особое место занимают соединения  $RFe_2$ , где  $R$  – редкоземельный элемент. Соединения данной стехиометрии относятся к фазам Лавеса и представлены в двух структурных типах: кубическая структура  $MgCu_2$  (структурный тип C15) и гексагональная структура типа  $MgZn_2$  (структурный тип C14) [4]. Они сочетают в себе относительно простую кристаллическую структуру и важные магнитные свойства, такие как высокие температуры Кюри, гигантская магнитострикция и большой магнитокалорический эффект [6,7].

Большинство редкоземельных интерметаллических соединений находятся в магнитоупорядоченном состоянии в определенной температурной области [3]. Одной из основных причин возникновения магнитного упорядочения в РЗМ интерметаллидах являются обменные взаимодействия. Обменные взаимодействия, как известно, могут иметь разные знаки, они могут быть как положительными, так и отрицательными. В зависимости от знака интеграла обменного взаимодействия в магнетиках реализуется ферро- или ферримагнитный порядок расположения магнитных моментов атомов, из которых состоит тот или иной магнетик. Чаще всего, их представляют в виде двухподрешеточных магнетиков, у которых одна подрешетка состоит из редкоземельных  $R$ -ионов, а другая – из  $3d$ -переходных ионов. Большинство соединений  $RFe_2$  обладают коллинеарными магнитными структурами, у которых магнитные моменты  $R$  и  $3d$ - подрешеток параллельны друг к другу, причем для легких редкоземельных элементов суммарные магнитные моменты  $M_R$  и  $M_{3d}$  редкоземельной и  $3d$ -переходной подрешеток направлены в одну и ту же сторону, поэтому полный магнитный момент равен  $M_{RFe_2} = M_R + 2M_{3d}$  и мы имеем дело с ферромагнетизмом.

Для тяжелых редкоземельных элементов суммарные магнитные моменты редкоземельной и  $3d$ -подрешеток  $M_R$  и  $M_{3d}$  антипараллельны, поэтому полный магнитный момент равен соотношению  $M_{RFe_2} = M_R - 2M_{3d}$  и, следовательно, это ферримагнетики. Для некоторых соединений возможно наблюдение магнитного фазового перехода из ферримагнитного состояния в ферромагнитное в соответствующих полях. Этот эффект создается приложением сильного магнитного поля, когда все магнитные моменты стремятся выстроиться параллельно приложенному полю, как это показано на рис. 1.



**Рис. 1.** Магнитная структура ферримагнетика без приложения внешнего поля (а) и в сильном магнитном поле, индуцирующем ферромагнитное состояние (б).

Изучение природы магнетизма, механизмов намагничивания и определение основных магнитных характеристик является достаточно актуальной задачей физики магнитных

явлений.

Поэтому, целью данной работы являлось, использование сильных магнитных полей, статистических и импульсных, для наблюдения процессов вращения магнитных моментов отдельных подрешеток, а также наблюдение явления, индуцированного внешним магнитным полем ферромагнитного состояния.

В настоящий момент, максимальное значение напряженности магнитного поля, доступного ученым для проведения исследований, составляет около 100-120 Т [9]. Такие эксперименты являются разовыми и дорогостоящими ввиду их технической сложности. Относительно доступными являются эксперименты в полях до 60 Т, которые реализуются в нескольких лабораториях мира [11]. Однако работы, описывающие такие эксперименты, не часто встречаются в литературе. Важность исследований такого рода вытекает из того, что РЗМ интерметаллиды находят достаточно широкое применение в различных отраслях электротехники, оптоэлектроники, вычислительной техники, микро - и наноэлектроники, а также в качестве датчиков малых перемещений. Самое главное - остро стоит проблема получения магнитных материалов нового типа с управляемым комплексом физико-химических параметров.

## 2. Материалы и методы

Объектами исследования в данной работе являются интерметаллические сплавы редкоземельных металлов с железом типа  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ , синтезированных на основе  $TbFe_2$ . Исследованная нами система является многокомпонентной. В ней, как сказано выше, происходит замещение магнитоактивных атомов тербия атомами немагнитного самария в стационарной концентрации 20 % и затем замещение атомов тербия в редкоземельной подрешетке атомами немагнитного иттрия. Параметр замещения в данной системе  $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ .

Синтез сплавов был произведен на основе высокочистых редкоземельных металлов и железа (99,95%) в дуговой печи с нерасходуемым вольфрамовым электродом на медном водоохлаждаемом поду специальной конструкции в атмосфере очищенного инертного газа (аргона) при нормальном давлении. Затем образцы подвергались гомогенизирующему отжигу в течении двух недель.

Рентгеновские спектры снимались при комнатной температуре на дифрактометре Panalytical Emgugen с использованием медного анода (рабочие режимы  $I = 40$  мА,  $U = 40$  кВ), в геометрии Брегга-Брентано с шагом  $0.026^\circ$ , в диапазоне углов от  $5^\circ$  до  $140^\circ$ , с использованием двухкоординатного детектора Pixel3D, системы варьируемых щелей, никелевого фильтра на дифрагированном пучке. Дифрактограммы содержат Си- Ka1 и Cu—Ka2 линии излучения. Параметры элементарной ячейки определялись по отражениям в области углов  $2\theta = 15 - 105^\circ$ . Согласно нашим данным, с ростом концентрации иттрия в соединениях  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ , параметр кубической решетки незначительно линейно возрастает.

Фазовый состав образцов исследовался с помощью Ритвельд-анализа в программе Powred Cell 2.4. Проведенный нами анализ показал, что только крайние в данной системе сплавы  $Tb_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ ,  $Y_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ , для которых параметр замещения  $x = 0$  и  $1.0$ , соответственно, являются однофазными и обладают кубической структурой фазы Лавеса C15. Эта структура относится к пространственной группе Fd3m-Oh7.

В более сложных составах  $(\text{Tb}_{0.8}\text{Y}_{0.2})_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ ,  $(\text{Tb}_{0.6}\text{Y}_{0.4})_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ ,  $(\text{Tb}_{0.4}\text{Y}_{0.6})_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ ,  $(\text{Tb}_{0.2}\text{Y}_{0.8})_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  (значение параметра замещения для которых  $x = 0.2, 0.4, 0.6$  и  $0.8$ , соответственно) наблюдалось небольшое содержание второй фазы с кристаллической структурой типа  $\text{PuNi}_3$ , принадлежащая пространственной группе  $R\text{-}3m$ , содержание которой варьировалось от 8 до 10%.

Исследования намагниченности соединений проводились с помощью двух методик. В первом методе измерения намагниченности соединений проводились в статических магнитных полях на стандартном магнетометре PPMS-14 (Quantum Design, США) в полях до 14 Тл. Во втором методе измерения намагниченности проводились в высоких импульсных полях до 60 Тл с использованием специального оборудования в лаборатории высоких магнитных полей (EMFL, Дрезден, Германия). Импульс магнитного поля генерировался в соленоиде разрядом электричества, накопленного в банке конденсаторов, общей емкостью 1,44 МДж. Время нарастания магнитного поля в зоне образца составляет 7 мс, общее время импульса – около 25 мс. Намагниченность измерялась путем интегрирования напряжения, создаваемого в точно скомпенсированной системе катушек, окружающей образец.

Все измерения намагниченности в данной работе проведены при температуре кипения жидкого гелия  $T = 4, 2 \text{ К}$ .

### 3. Экспериментальные результаты

В основе сплавов данной системы лежит соединение  $\text{TbFe}_2$ . Оно интересно тем, что обладает кубической кристаллической структурой с ромбоэдрическими искажениями. Оно также обладает наибольшей температурой Кюри среди известных редкоземельных интерметаллидов стехиометрии  $\text{RFe}_2$ . Температуры Кюри – это температура магнитного фазового перехода из упорядоченного ферромагнитного состояния в неупорядоченное, парамагнитное. Как следует из работы [3], температура Кюри соединения  $\text{TbFe}_2$   $T_c = 711 \text{ К}$ , а магнитный момент на формульную единицу  $\mu = 1.74 \mu_B$ .

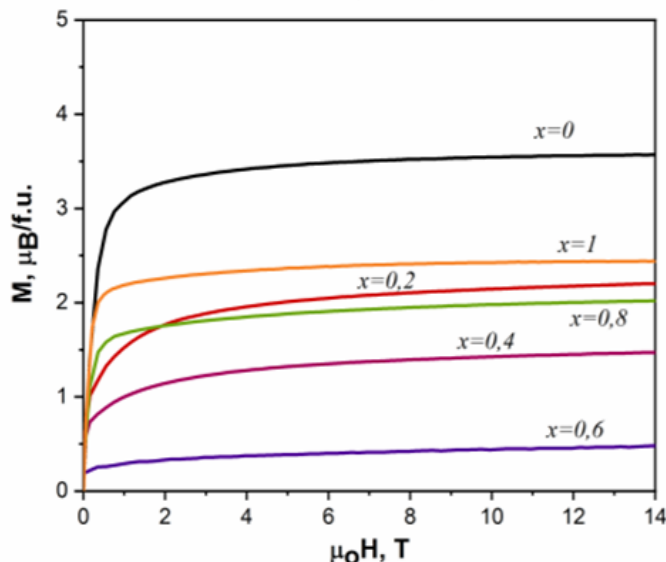
В системе  $(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  в редкоземельную подрешетку тербия вводятся элементы иттрия и самария, которые влияют на свойства и основные магнитные характеристики соединения  $\text{TbFe}_2$  в зависимости от параметра замещения  $x$ . Ранее в стационарных магнитных полях до 14 кЭ нами обнаружен целый ряд явлений, как явление спиновой переориентации, явление магнитной компенсации и инверсия знака констант магнитострикции [1,8,10] в зависимости от параметра  $x$ . Основные магнитные характеристики сплавов в указанных полях приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные магнитные характеристики сплавов  $(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ 

x	Сплавы/Свойства	$B_s, \text{emu/q}$	$M, \mu_B$	$T_c, \text{K}$
0	$\text{Tb}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$	74	3.56	672
0.2	$\text{Tb}_{0.64}\text{Y}_{0.16}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$	48	2.20	613
0.4	$\text{Tb}_{0.48}\text{Y}_{0.32}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$	33	1.47	601
0.6	$\text{Tb}_{0.32}\text{Y}_{0.48}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$	11	0.47	576
0.8	$\text{Tb}_{0.16}\text{Y}_{0.64}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$	50	2.02	568
1	$\text{Y}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$	64	2.45	539

Исследование намагниченности сплавов  $(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  в статических полях до 14 Тл нами также произведено при температуре 4.2 К. На рис. 2 представлены полевые зависимости намагниченности  $M(H)$ . Данные зависимости для всех сплавов системы показывают, что кривые  $M(H)$  достаточно быстро выходят на насыщение. Значения намагниченности насыщения были вычислены для этих составов, с помощью экстраполяции зависимости  $M(1/H)$  в область высоких полей [2].



**Рис. 2.** Полевые зависимости намагниченности соединений  $(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  температуры  $T = 4,2$  К в стационарных полях до 14 Тл.

Магнитная структура соединений  $(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  может быть рассмотрена в модели трех подрешеток тербия, самария и железа, магнитные моменты которых ориентированы коллинеарно. Магнитный момент на атомах тяжелого редкоземельного металла Tb составляет  $9\mu_B$  и упорядочивается антипараллельно магнитному моменту железа, в то время как магнитный момент на атомах легкого РЗМ самария составляет  $0,7\mu_B$  [2] и упорядочивается сонаправленно магнитному моменту железа. Разбавляя редкоземельную подрешетку немагнитным РЗМ иттрием можно наблюдать явление магнитной компенсации и найти компенсационный состав.

Для определения величины концентрации иттрия в компенсационном составе были проведены теоретические расчеты. Так как магнитные моменты подрешеток (Tb, Sm, Fe) можно считать коллинеарными, то величина полного магнитного момента определяется по формуле:

$$\mu_{(\text{calc})} = 2\mu_{\text{Fe}} + \mu_{\text{Sm}} - \mu_{\text{Tb}} \quad (1)$$

где  $\mu_{\text{Sm}} = 0.2 \cdot 0.7\mu_B = 0,14\mu_B$  – магнитный момент подрешетки Sm;

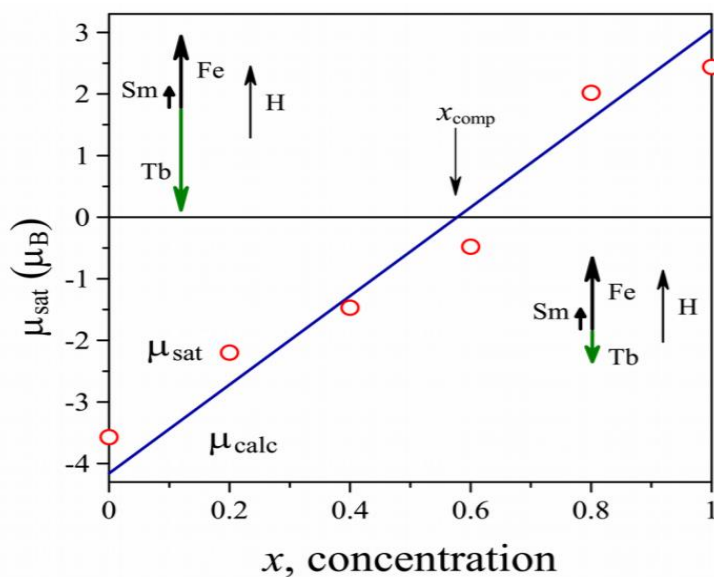
$\mu_{\text{Tb}} = 0.8 \cdot (1-x) \cdot 9\mu_B$  – магнитный момент подрешетки Tb, зависящий от параметра замещения  $x$ ;

$\mu_{\text{Fe}} = 1.45\mu_B$  – магнитный момент подрешетки Fe, определенный из намагниченности соединения  $\text{YFe}_2$  [5].

Подставив в формулу (1) значения магнитных моментов подрешеток, получим линейную зависимость полного магнитного момента от концентрации иттрия:

$$\mu_{(\text{calc})} = |7.2x - 4.16|. \quad (2)$$

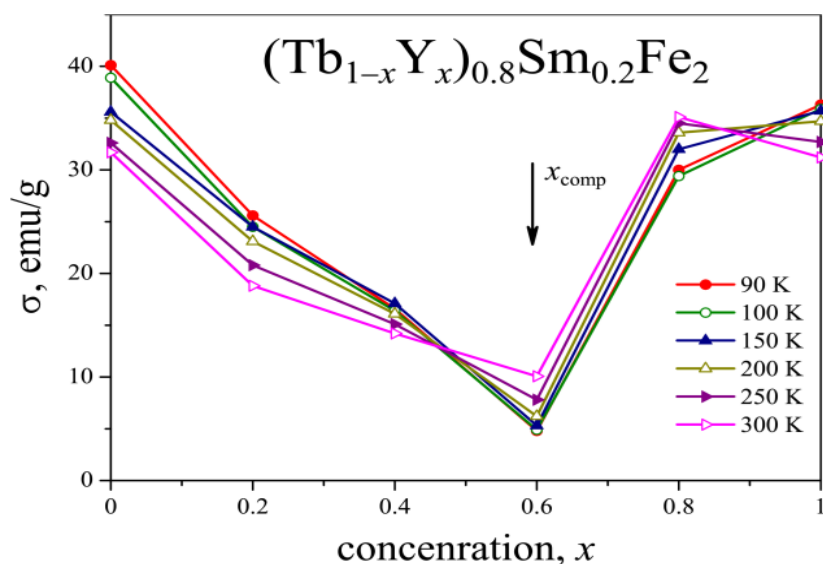
На рис. 3 представлена концентрационные зависимости экспериментальных значений намагниченности насыщения для составов с  $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  и  $1$  и зависимость полного магнитного момента, рассчитанного по формуле (2). Из выражения (2) было получено теоретическое значение концентрации иттрия в компенсационном составе  $x_{\text{comp}} \approx 0,58$  при  $\mu_{(\text{calc})} = 0$ .



**Рис. 3.** Расчетная зависимость полного магнитного момента (сплошная синяя линия) от концентрации иттрия  $x$  и экспериментальные значения намагниченности насыщения (красные точки) при температуре 4.2 К для соединений  $(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ .

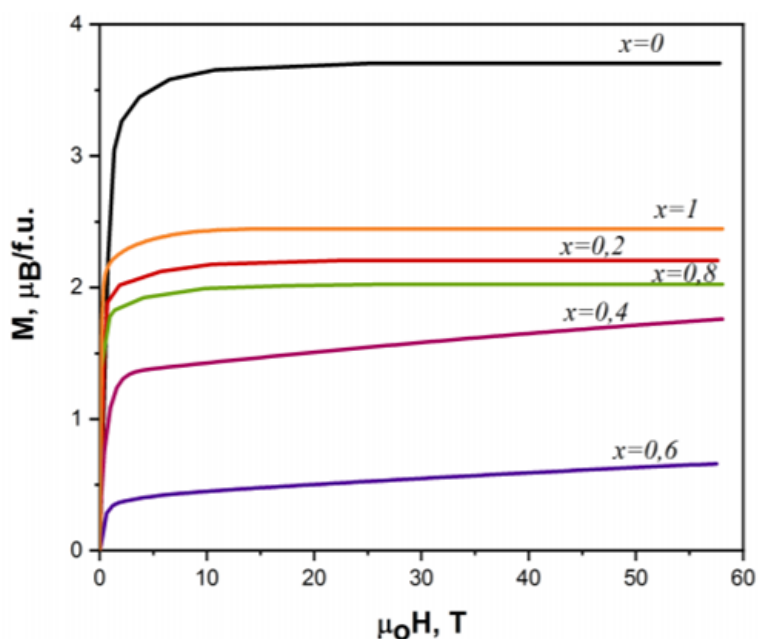
В области  $x < x_{\text{comp}}$  вклад в общую намагниченность от подрешетки тербия доминирует, а в области  $x > x_{\text{comp}}$  основной вклад в намагниченность происходит от подрешетки железа (и в меньшей степени от подрешетки самария). Поэтому концентрационная зависимость показывает минимум при  $x = x_{\text{comp}}$ . Из рис. 3 видно, что экспериментальные значения намагниченности насыщения хорошо согласуются с теоретическими расчетами. Так же из данного рисунка видно, что наиболее близким к компенсационному составу, является состав с концентрацией иттрия  $x = 0.6$ . Аналогичный результат был нами обнаружен ранее экспериментально в стационарных полях 2 кЭ в области температур от 90 до 300 К (рис. 4) [8].

Дальнейшие исследования намагниченности сплавов системы  $(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  проведено нами в импульсных магнитных полях до 60 Тл. На рис. 5 представлены полевые зависимости намагниченности системы  $(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  при температуре 4,2 К.



**Рис. 4.** Зависимость намагниченности сплавов  $(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  от параметра замещения  $x$  в температурном интервале от 90 до 300 К в поле 2 кЭ.

Видно, что кривые намагниченности, так же как в статических полях, быстро выходят на насыщение. Наблюдается небольшой рост намагниченности для соединений с параметром замещения  $x = 0.4$  и  $x = 0.6$ . Это составы вблизи компенсационного состава  $x = 0.58$ .



**Рис. 5.** Полевые зависимости намагниченности  $(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  при температуре  $T = 4.2$  К в импульсных полях до 60 Тл.

Как было упомянуто ранее, соединения типа  $\text{RFe}_2$  с тяжелыми редкоземельными металлами имеют ферримагнитное упорядочение. При наложении сильного магнитного поля,



предположительно можно достичь ферромагнитного состояния, так как магнитные моменты каждой подрешетки будут стремиться выстроиться параллельно приложенному полю. Предполагая, что коллинерная структура магнитных моментов подрешеток сохраняется, можно рассчитать величину магнитного момента соединений системы  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  для ферри- и ферромагнитного состояний. Только для ферромагнитного состояния знак магнитного момента тербия  $\mu_{Tb}$  в соотношении (1) будет положительным.

В таблице 2 представлены результаты вычисления полных магнитных моментов для ферри- и ферромагнитного состояний соединений  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ .

Таблица 2

Расчетные значения магнитных моментов  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ 

x	$\mu_{Sm}$ ( $\mu_B$ )	$\mu_{Fe}$ ( $\mu_B$ )	$\mu_{Tb}$ ( $\mu_B$ )	$\mu_{ferri}^{calc}$ ( $\mu_B$ )	$\mu_{ferro}^{calc}$ ( $\mu_B$ )
0			7.20	4.16	10.24
0.2			5.76	2.72	8.80
0.4	0.14	1.45	4.32	1.28	7.36
0.6			2.88	0.16	5.92
0.8			1.44	1.60	4.48
1			0	3.04	3.04

Выше мы показали, что наименьшая спонтанная намагниченность наблюдается при  $x_{comp} = 0.6$  (рис. 4). В больших полях до 60 Тл намагниченность при этой же концентрации также демонстрирует минимальное значение (рис. 5). Необходимо отметить для крайних концентраций величина намагниченности в интервале от 16 до 60 Тл практически не меняется, что говорит о высокой величине обменного поля в составах  $Tb_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  и  $Y_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ . Вблизи компенсационного состава величина намагниченности даже в высоких импульсных полях до 60 Тл остается достаточно малой и составляет  $0.7 \mu_B/f.u.$  в поле 60 Тл в составе с  $x = 0.6$ . Тем не менее это значение намагниченности превышает в 4 раза рассчитанный нами магнитный момент для ферримагнитного состояния (см. таблицу 2). Похожее поведение наблюдается для состава с  $x = 0.4$ . Этот факт свидетельствует о том, что в этих двух составах (вблизи компенсационного) магнитное поле величиной 60 Тл позволяет разрушить коллинеарную магнитную структуру.

Сравнение теоретических расчетов полных магнитных моментов соединений и соответствующих кривых намагниченности, полученных из эксперимента показало, что ферромагнитное состояние в полях до 60 Тл в соединениях  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  не реализуется (см. рис. 5). Значения полных магнитных моментов для ферромагнитного состояния (см. таблицу 2) значительно больше величины намагниченности насыщения, полученной из эксперимента. Таким образом, в составах с  $x = 0, 0.2$  и  $0.8$  в воздействие внешнего магнитного поля в 60 Тл меньше, чем обменное поле, необходимое для разрушения антиколлинеарной ферримагнитной структуры. В составах с  $x = 0.4$  и  $0.6$  в интервале поле от 10 до 60 Тл наблюдается линейный рост намагниченности (рис. 5), который можно объяснить образованием неколлинеарной магнитной структуры в сильном магнитном поле.

#### 4. Заключение

Исследованные нами сплавы могут быть представлены в модели трех магнитных подрешеток – тербия, самария и железа. Магнитный момент на атомах тяжелого редкоземельного металла Tb упорядочивается антипараллельно магнитному моменту железа, а магнитный момент на атомах легкого редкоземельного металла Sm упорядочивается сонаправленно магнитному моменту железа. Следовательно, обменное взаимодействие между Fe- и Sm- подрешетками имеет положительный знак, в то время как обменное взаимодействие между Fe- и Tb- подрешетками имеет отрицательный знак. Таким образом, в данных сплавах обменные взаимодействия Tb-Fe и Sm-Fe являются конкурирующими.

При разбавлении редкоземельной подрешетки тербия немагнитным элементом иттрием в системе  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  наблюдаются только эффекты разбавления магнитной редкоземельной подрешетки и увеличения расстояния между ионами тербия и самария. Это приводит к изменению по величине конкурирующих друг с другом обменных взаимодействий Tb-Fe и Sm-Fe. Следовательно, можно было бы предположить, что таким образом можно получить состояние, при котором энергии магнитного поля в 60 Тл будет достаточной, чтобы преодолеть величину отрицательного обменного взаимодействия Tb-Fe и осуществить магнитный фазовый переход из ферримагнитного состояния в ферромагнитное. Однако, во всех соединениях, за исключением крайнего сплава  $Y_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$ , который изначально был ферромагнетиком, сохраняется ферримагнитное состояние в сильных магнитных полях вплоть до 60 Тл.

#### 5. Благодарности

Данная экспериментальная работа выполнена в рамках Договора о научно-техническом сотрудничестве между лабораторией металлов, сплавов и композиционных материалов КНИИ РАН и кафедрой физики твердого тела МГУ им. М.В. Ломоносова. Авторы выражают глубокую благодарность Д.И. Горбунову, Е.А. Терешиной-Хитровой и Алероевой Т.А. за помощь в получении экспериментальных результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алероева Т А, Терешина И С, Умхаева З С, Каминская Т П, Филимонов А В, Илюшин А С. Структурные, магнитные и тепловые свойства соединения  $Tb_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  со структурой фаз Лавеса // ФТТ, 2019. Т.61. Вып. 12. С. 2471-2476.
2. Алероева Т. А., Илюшин А.С., Умхаева З.С., Панкратов Н.Ю., Терёшина И.С. Особенности полевых и температурных зависимостей магнитострикции многокомпонентных сплавов  $Sm_{0.2}(Y, Tb)_{0.8}Fe_2$  // Вестник Московского Университета, 2020. Т.3. С. 59-67.
3. Илюшин А.С. Введение в структурную физику интерметаллических соединений. М.: МГУ, 1984. 99 с.
4. Тейлор К. Интерметаллические соединения редкоземельных металлов. М.: Мир, 1974. 221 с.
5. Armitage J.G.M., Dumelow T., Mitchell R. H., Riedi P.C., Abell J.S., Mohn P., Schwarz K. Pressure dependence of the magnetisation of  $YFe_2$  and  $ZrFe_2$ : computation and experiment // Journal of Physics F: Metal Physics, 1986. V. 16(7). L141-L144. doi: 10.1088/0305-4608/16/7/005.

6. Engdahl G. Handbook of giant magnetostrictive materials. London: Academic Press, 2000. 386 p.
7. Gschneidner Jr.K.A. Recent Developments in Magnetocaloric Materials // Rep. Progr. Phys, 2005. V. 68. Pp. 1479-1539.
8. Ilyushin A. S., Tereshina I. S., Pankratov N. Yu., Aleroeva T. A., Umkhaeva Z. S., Karpenkov A.Yu., Kiseleva T.Yu., Granovsky S. A., Doerr M., Drulis H., Tereshina-Chitrova E.A. The phenomenon of magnetic compensation in the multi-component compounds (Tb,Y,Sm)Fe<sub>2</sub> and their hydrides // Journal of Alloys and Compounds, 2020. V. 847. 155976 p.
9. Kato H., Lim D. W., Yamada M., Nakagawa Y., Aruga Katori H., Goto T Field-induced phase transitions in ferrimagnetic R<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B in ultra-high magnetic fields // Physica, 1995. B 211. Pp. 105-107.
10. Umkhaeva Z. S., Ilyushin A. S., Aleroeva T. A., Tereshina I. S., Pankratov N.U. Yttrium influence on exchange interactions in Laves phases (Tb<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>)<sub>0,8</sub>Sm<sub>0,2</sub>Fe<sub>2</sub> // Advances in Engineering Research, 2018. 177. Pp. 198-202.
11. Zherlitsyn S., Wustmann B., Herrmannsdorfer T. and Wosnitza J. Status of the pulsed-magnet-development program at the Dresden high magnetic field laboratory *IEEE* //Trans. Appl. Supercond, 2012. V.22. 4300603 p.

#### REFERENCES

1. Aleroeva T. A., Tereshina I.S., Umkhaeva Z. S., Kaminskaya T. P., V. A. Filimonov, Ilyushin A. S. Structural, magnetic and thermal properties of the compound Tb<sub>0,8</sub>Sm<sub>0,2</sub>Fe<sub>2</sub> with the structure of the Laves phases // FTT, 2019. Vol.61. Issue. 12. Pp. 2471-2476.
2. Aleroeva T. A., Ilyushin.S., Umkhaeva Z.S., Pankratov N.Yu., Tereshina I.S. Features of field and temperature dependences of magnetostriction of multicomponent alloys Sm<sub>0,2</sub>(G, Tb)<sub>0,8</sub>Fe<sub>2</sub> // Bulletin of the Moscow University, 2020. Vol.3. Pp. 59-67.
3. Ilyushin A.S. Introduction to the structural physics of intermetallic compounds. Moscow: MSU, 1984. 99 p.
4. Taylor K. Intermetallic compounds of rare earth metals. Moscow: Mir, 1974. 221 p.
5. Armitage J. G.M., Dumelow T., Mitchell R. H., Ready P.S., Abell J.S., Mon P., Schwartz K. Dependence of magnetization of YFe<sub>2</sub> and ZrFe<sub>2</sub> on pressure: calculations and experiment // Journal of Physics F: Physics of Metals, 1986. V. 16(7). L141-L144. doi: 10.1088/0305-4608/16/7/005.
6. Engdahl G. Handbook of Giant magnetostrictive materials. London: Academic Press, 2000. 386 p.
7. Gschneidner Jr. K.A. Recent developments in the field of magnetocaloric materials // Rep. Progr. Physics, 2005. Vol. 68. Pp. 1479-1539.
8. Ilyushin A. S., Tereshina I. S., Pankratov N.Yu., Aleroeva T. A., Umkhaeva Z. S., Karpenkov A.Yu., Kiseleva T.Yu., Granovsky S. A., Doerr M., Drulis H., Tereshina-Chitrova E.A. The phenomenon of magnetic compensation in multicomponent compounds (Tb,Y,Sm)Fe<sub>2</sub> and their hydrides // Journal of Alloys and Compounds, 2020. Vol. 847. 155976 p.

9. Kato O., Lim D. U., Yamada O., Nakagawa Yu., Aruga Katori H., Goto T. Phase transitions induced by a field in ferrimagnetic R<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B in ultrahigh magnetic fields // *Physics*, 1995. № 211. Pp. 105-107.
10. Umkhaeva Z. S., Plyushin A. S., Aleroeva T. A., Tereshina I. S., Pankratov N.U. The influence of yttrium on exchange interactions in the phases of Laves (Tb<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>)<sub>0,8</sub>Sm<sub>0,2</sub>Fe<sub>2</sub> // *Successes of engineering research*, 2018. 177. Pp. 198-202.
11. Zherlitsyn S., Wustmann B., Herrmansdorfer T. and Charioteer J. Status of the program for the development of pulsed magnets at the IEEE Dresden Laboratory of High Magnetic Fields // *Trans. from English. Application. Supercond*, 2012. Vol.22. 4300603 p.