

На правах рукописи

АЛЕРОЕВА ТАМИЛА АХМАДОВНА

**Структурные особенности, магнитные и ядерно-магнитные свойства  
фаз Лавеса  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$**

1.3.8 - физика конденсированного состояния  
1.3.12 - физика магнитных явлений

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Грозный - 2021

Работа выполнена на кафедре общей физики ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет имени А.А. Кадырова» и на кафедре физики твердого тела ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»

**Научный руководитель** доктор физико-математических наук, доцент  
**Умхаева Зарган Сайпудиновна**

**Научный консультант** доктор физико-математических наук  
**Терёшина Ирина Семёновна**

**Официальные  
оппоненты:** **Матиев Ахмет Хасанович,**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, ФГБОУ ВО «Ингушский  
государственный университет», профессор  
кафедры общей физики;

**Рудская Анжела Григорьевна,** доктор  
физико-математических наук, ФГАОУ ВО  
«Южный федеральный университет»,  
профессор кафедры «Нанотехнология».

**Ведущая организация** федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки «Дагестанский  
федеральный исследовательский центр РАН»

Защита состоится «10» декабря 2021 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.2.411.03 (Д 212.263.09) при ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» по адресу: 170002, г. Тверь, Садовый пер., 35. ауд. 226.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» по адресу: 170100, г. Тверь, ул. Трехсвятская, 16/31 и на сайте в сети Интернета: <http://dissertations.tversu.ru/>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Е.В. Барабанова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Одной из важнейших научно-технических задач современной физики конденсированного состояния является поиск новых магнитных материалов с высокими магнитострикционными параметрами для современной инновационной техники. В связи с этим большое распространение в науке и технике, благодаря своим выдающимся физическим свойствам, получили интерметаллические соединения редкоземельных металлов с 3d - переходными металлами (Mn, Fe, Co и Ni), в частности соединения типа  $RM_2$  (R - редкоземельный элемент, M - 3d - металл). Указанные соединения обладают структурой фаз Лавеса C15 или C14. Наиболее интересны их магнитные свойства, которые зависят, прежде всего, от их структурных особенностей.

Фазы Лавеса являются удобными модельными объектами для исследования ряда фундаментальных проблем современной физики конденсированного состояния, в том числе – установление взаимосвязи между электронными характеристиками атомов или ионов, составляющих твердое тело, и его физическими свойствами. Они сочетают в себе относительно простую структуру и уникальные магнитные свойства, такие как, например, гигантская магнитострикция и большой магнитокалорический эффект. Поэтому изучение структуры фаз Лавеса и физических свойств в их органической взаимосвязи является **актуальной задачей** и позволяет прогнозировать и получать материалы с заданным комплексом физических свойств. Кроме того, фазы Лавеса позволяют произвести всестороннее теоретическое и экспериментальное изучение закономерностей структурных фазовых переходов при магнитном упорядочении, а «гигантская» величина спонтанной магнитострикции обеспечивает возможность количественных измерений искажений атомно-кристаллической структуры.

Наиболее интересны с этой точки зрения многокомпонентные сплавы, в которых, в частности, сочетаются редкоземельные атомы (ионы) разного типа (легкие и тяжелые, высоко- и низкоанизотропные и др.). Это обстоятельство позволяет синтезировать и исследовать квазибинарные, квазитернарные и еще более сложные системы на основе редкоземельных соединений со структурами фаз Лавеса с тем, чтобы формировать новые магнитные материалы с заданным комплексом оптимальных физико-химических характеристик. Важность исследования магнетизма соединений типа фаз Лавеса в практическом отношении вытекает из того, что эти материалы являются перспективными для применения в качестве магнитострикционных элементов в ряде устройств ультразвуковой техники, автоматики, оптоэлектроники и радиотехники.

### Цели и задачи исследования

В связи со сказанным, **целью** настоящей работы являлось комплексное исследование фазового состава, атомно-кристаллической структуры, магнитных свойств, а также обменных и сверхтонких взаимодействий в многокомпонентных фазах Лавеса кубической симметрии  $Sm_{0.2}(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Fe_2$ .

Объектами данного исследования являлась серия поликристаллических образцов  $\text{Sm}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Fe}_2$ ,  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{0.8}\text{Y}_{0.2})_{0.8}\text{Fe}_2$ ,  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{0.6}\text{Y}_{0.4})_{0.8}\text{Fe}_2$ ,  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{0.4}\text{Y}_{0.6})_{0.8}\text{Fe}_2$ ,  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{0.2}\text{Y}_{0.8})_{0.8}\text{Fe}_2$  и  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$ .

Для достижения сформулированной выше цели были решены следующие задачи:

1. Отработка условий синтеза однофазных образцов с общей формулой  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  ( $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ ). Аттестация полученных образцов с помощью рентгеноструктурного фазового анализа при комнатной температуре.

2. Высокотемпературные и низкотемпературные исследования рентгеновских спектров сплавов  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$ . Построение фазовых диаграмм. Исследование особенностей морфологии поверхности полученных образцов с помощью, сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии.

3. Экспериментальное исследование и анализ полевых и температурных зависимостей намагниченности, полученных как в статических магнитных полях до 14 Тл, так и в импульсных до 60 Тл. Определение температур спин-переориентационных фазовых переходов и температур Кюри.

4. Экспериментальное исследование и анализ полевых и температурных зависимостей магнитострикции и теплового расширения в широкой области температур, включая комнатную.

5. Экспериментальное исследование эффекта Мессбауэра и анализ параметров сверхтонких взаимодействий в сплавах  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  при комнатной температуре.

6. Установление основных закономерностей изменения структурных и магнитных характеристик материалов в зависимости от значения параметра замещения  $x$ .

### **Научная новизна работы**

Особенностью выполненной работы, обеспечивающей ее научную новизну, является комплексный подход к исследованию структурных и магнитных свойств системы  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$ . В результате данного подхода установлены основные закономерности изменения структуры, магнитных и магнитоупругих свойств новых многокомпонентных сплавов в зависимости от состава.

В работе впервые:

1. Произведен синтез многокомпонентных сплавов редкоземельных элементов (Тб, Sm и Y) с 3d-переходным элементом Fe, обладающих структурой фазы Лавеса кубической симметрии C15. Изготовлена серия поликристаллических образцов  $\text{Sm}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Fe}_2$ ,  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{0.8}\text{Y}_{0.2})_{0.8}\text{Fe}_2$ ,  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{0.6}\text{Y}_{0.4})_{0.8}\text{Fe}_2$ ,  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{0.4}\text{Y}_{0.6})_{0.8}\text{Fe}_2$ ,  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{0.2}\text{Y}_{0.8})_{0.8}\text{Fe}_2$  и  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$ .

2. Построена фазовая диаграмма для системы  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  в координатах «состав-температура». Обнаружено наличие структурных и спин-переориентационных фазовых переходов в зависимости как от состава, так и от температуры.

3. Для сплавов указанной системы определены области магнитного упорядочения и основные магнитные характеристики: температура Кюри  $T_c$ , магнитный момент на формульную единицу  $\mu_{ф.ед.}$ , магнитный момент на атоме железа  $\mu_{Fe}$ , намагниченность насыщения  $M_{sat}$  и спонтанная намагниченность  $M_s$ .
4. Определены константы продольной и поперечной магнитострикции всех сплавов системы в зависимости от состава и температуры.
5. Проведено исследование эффекта Мессбауэра на ядрах  $^{57}Fe$  при комнатной температуре. Определены параметры сверхтонкого спектра: сверхтонкие поля, изомерный сдвиг мессбауэровской линии и квадрупольное расщепление компонент спектра.

#### **Научная и практическая значимость работы**

Разбавление редкоземельной подрешетки, содержащей атомы самария и тербия, атомами иттрия в системе  $Sm_{0.2}(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Fe_2$  позволяет получить состав с полной компенсацией намагниченности (компенсационный состав), а также сплавы с различным типом магнитного упорядочения (как с ферри-, так и ферромагнитным). На основе сплавов  $Sm_{0.2}(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Fe_2$  могут быть разработаны функциональные материалы, демонстрирующие широкое разнообразие свойств, таких как инварианное поведение в заданном интервале температур, смена знака магнитострикции в области спин-переориентационного перехода (СПП) и др., что важно для технических устройств различного назначения. СПП, который демонстрирует соединение  $SmFe_2$  и который может быть привлекателен для практического использования, сохраняется и в соединении с высоким содержанием иттрия  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$ . Наблюдается лишь небольшое уменьшение температур, соответствующих началу и концу перехода.

#### **Методология и методы исследования**

Синтез сплавов  $(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Sm_{0.2}Fe_2$  был произведен на основе высокочистых РЗМ и Fe в дуговой печи с нерасходуемым вольфрамовым электродом на медном водоохлаждаемом поду специальной конструкции в атмосфере очищенного инертного газа (аргона) при нормальном давлении. Образцы подвергались гомогенизирующему отжигу в течение 2 недель. Исследование кристаллической структуры образцов выполнялось методами рентгеноструктурного фазового анализа. Исследования кристаллической структуры в широком температурном диапазоне 80 – 700 К проводилось методом рентгеновской порошковой дифракции на дифрактометре SuperNova (Agilent). Для изучения особенностей микроструктуры и состояния поверхности образцов использовалась сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и атомно-силовая микроскопия (АСМ).

При измерениях полевых и температурных зависимостей намагниченности использовалось как стандартное оборудование (PPMS-14, маятниковый магнитометр типа Доминикали, автоматизированный комплекс для исследования магнитных свойств материалов «MasEq AMS» (производства ООО «ПМТиК»)), так и методика высокополевых измерений намагниченности в полях до 60 Тл. При измерении полевых и температурных зависимостей

магнитострикции применялся тензометрический метод. Исследование эффекта Мессбауэра проводилось на стандартном оборудовании (ЯГРС-4М).

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Экспериментально полученные полевые и температурные зависимости продольной и поперечной магнитострикции, с учетом рассчитанных значений объемной и анизотропной магнитострикции соединений  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$ , свидетельствуют об аддитивности вкладов в магнитострикцию от подрешеток железа, самария и тербия, а также о преобладании одноионного механизма возникновения магнитострикционных деформаций.

2. Инверсия знака констант магнитострикции сплавов системы  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  наблюдается в области магнитоструктурного фазового перехода в интервале концентраций иттрия, соответствующих значению параметра замещения  $x=0.6 - 1$ .

3. В системе  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  состав с  $x=0.6$ , а именно,  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{0.4}\text{Y}_{0.6})_{0.8}\text{Fe}_2$  близок к компенсационному (спонтанная намагниченность близка к 0 практически во всем интервале температур магнитного упорядочения). В рамках модели коллинеарных магнитных моментов полная компенсация намагниченности возможна в составе с параметром замещения  $x=0.58$ .

4. Применение импульсных магнитных полей до 60 Тл при намагничивании ферримагнитных составов  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{x-1}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  в области низких температур не позволяет нарушить коллинеарную магнитную структуру и наблюдать явление индуцированного внешним магнитным полем ферромагнитного состояния.

5. На основе анализа мессбауэровских спектров, полученных для системы  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{x-1}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  при комнатной температуре, концентрационных зависимостей изотропного и анизотропного сверхтонких полей на ядрах  $^{57}\text{Fe}$ , константы квадрупольного расщепления и изомерного сдвига мессбауэровской линии установлена их полная взаимная корреляция.

#### **Достоверность результатов**

Результаты, представленные в диссертационной работе, получены на основе экспериментов, проведенных на современном научном оборудовании и с использованием апробированных расчетных методов. Достоверность полученных результатов обеспечена использованием комплекса взаимодополняющих экспериментальных методик и подтверждена их воспроизводимостью.

#### **Личный вклад автора**

Автор участвовал в постановке цели и задач исследования, при планировании экспериментальных и расчетных работ, в получении и интерпретации основных экспериментальных данных, анализе и обсуждении полученных расчетных результатов, в написании статей совместно с научным руководителем и научным консультантом. Измерения магнитных свойств в высоких магнитных полях до 60 Тл проводились автором при поддержке сотрудников лаборатории сильных магнитных полей (г. Дрезден, Германия).

Исследование намагниченности в статических полях, исследование магнитострикции и теплового расширения, а также исследование эффекта Мессбауэра проведено при поддержке сотрудников кафедры ФТТ, а также кафедры общей физики и магнитоупорядоченных сред в рамках Договора о научно-техническом сотрудничестве между ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет» и ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова».

#### **Апробация работы**

Результаты работы докладывались на следующих конференциях и симпозиумах: The 21<sup>st</sup> International Conference on Solid Compounds of Transition Elements (Vienna, 2018), Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2018» (Москва, 2018), XXIII Международная конференция новое в магнетизме и магнитных материалах (Москва, 2018), Baikal International Conference Magnetic Materials (Иркутск, 2018), Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2019» (Москва, 2019), Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2020» (Москва, 2020).

#### **Связь работы с научными программами и грантами**

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-32-50025 (рук. И.С. Терёшина).

#### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Содержание диссертации соответствует пункту 3 «Изучение экспериментального состояния конденсированных веществ (сильное сжатие, ударные воздействия, изменение гравитационных полей, низкие температуры), фазовых переходов в них и их фазовые диаграммы состояния» паспорта специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния, а также пункту 3 «Экспериментальные исследования магнитных свойств и состояний веществ различными методами, установление взаимосвязи этих свойств и состояний с химическим составом и структурным состоянием, выявление закономерностей их изменения под влиянием различных внешних воздействий» паспорта специальности 1.3.12 - Физика магнитных явлений.

#### **Публикации**

Материалы диссертационной работы опубликованы в 8 статьях в российских и зарубежных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, и в 8 публикациях в сборниках материалов и тезисах докладов всероссийских и международных конференций.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных результатов и выводов, списка цитируемой литературы. Общий объем работы составляет 113 страниц, включая 42 рисунка и 6 таблиц. Список цитированной литературы состоит из 79 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи диссертационной работы. Показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, методология и методы исследования. Представлены положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы, публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора, а также о структуре и объеме работы.

**В первой главе** рассмотрены структура интерметаллических соединений с общей формулой  $RM_2$  ( $R=PЗМ$ ,  $M=Fe$ ), характер обменных взаимодействий в них, природа локальных полей на ядрах редкоземельных элементов, 3d - переходных элементов в магнитоупорядоченных веществах, а также приведен краткий обзор имеющих в литературе данных по исследованию магнитных свойств и сверхтонких взаимодействий в соединениях со структурой фаз Лавеса.

**Во второй главе** описаны способы приготовления образцов, их аттестация, установки для измерения намагниченности в статических и импульсных магнитных полях, теплового расширения, магнитострикции и эффекта Мессбауэра, приведены ошибки измерений. С помощью метода атомно-силовой микроскопии были проведены исследования состояния поверхности полученных образцов.

**Третья глава** посвящена результатам исследования тепловых, магнитных и магнитострикционных свойств фаз Лавеса  $Sm_{0.2}R_{0.8}Fe_2$  ( $R=Tb$  или  $Y$ ). Однофазные сплавы с высоким содержанием тербия  $Sm_{0.2}Tb_{0.8}Fe_2$  и иттрия  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$  удалось получить, не применяя технологию синтеза в условиях высоких давлений и высоких температур. В результате исследования морфологии поверхности однофазного сплава  $Sm_{0.2}Tb_{0.8}Fe_2$  с помощью растрово-электронной и атомно-силовой микроскопии, установлено наличие достаточно однородной структуры. Обнаружены наноразмерные эллипсоидные структурные элементы (размером порядка 30 x 80 нм), выстроенные в виде вытянутых полос. По результатам анализа дифрактограмм, полученных при высоких температурах (вплоть до  $T = 680$  К) для сплава  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$ , была построена температурная зависимость параметра псевдокубической элементарной ячейки  $a(T)$ . Обнаружено, что при температуре  $T = 541$  К происходит изменение наклона кривой  $a(T)$ , что свидетельствует о переходе образца из магнитоупорядоченного в неупорядоченное состояние (см. вставку к рис. 1). Полученное значение температуры Кюри для состава  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$  хорошо соотносится со значениями температур Кюри соединений  $SmFe_2$  ( $T_C=670-676$  К [1, 2]) и  $YFe_2$  ( $T_C=527-542$  К [3]) с учетом монотонного уменьшения температуры Кюри при замещении самария иттрием. На рис. 1 показана температурная зависимость относительного изменения объема  $(V-V_0)/V_0$  образца  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$  в интервале от 100 до 300 К, полученная с помощью двух методов, дифрактометрического и тензометрического. Видно, что в области температур 180 - 400 К объем образца  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$  изменяется линейно при уменьшении температуры.

Коэффициент теплового расширения равен  $3.7 \cdot 10^{-5}$  1/К. По сравнению с составом  $SmFe_2$  [1], коэффициент теплового расширения уменьшился в три раза. При температурах  $T \leq 179$  К образец  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$  демонстрирует отклонение от прямолинейного хода зависимости  $V-V_0/V_0(T)$ .

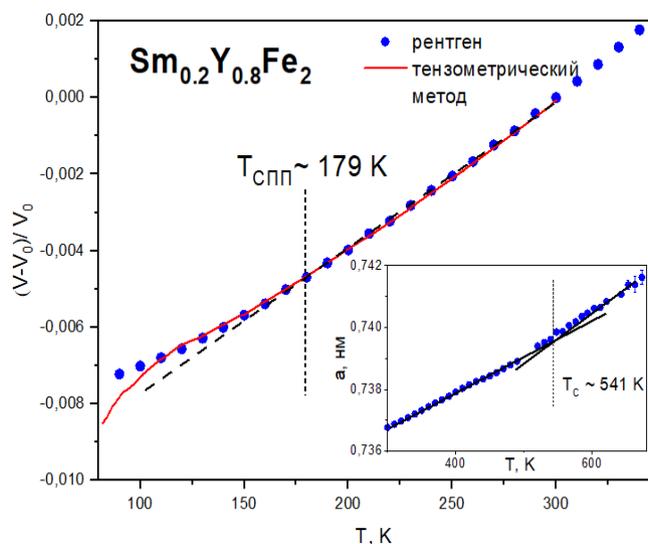


Рис. 1. Температурные зависимости относительного изменения объема соединения  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$ . Вставка: температурные зависимости параметра псевдокубической решетки  $a$  в диапазоне температур 300-680 К.

Это связано с тем, что в соединении  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$  при температуре  $T_{\text{СПП}}=179$  К имеет место спиновая переориентации, как и в соединении  $\text{SmFe}_2$  (при  $T = 190$  К [1]). Также проведено дифрактометрическое исследование образца  $\text{Sm}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Fe}_2$  в широком диапазоне температур от 90 до 760 К (см. рис. 2). Как видно из рис. 2, наблюдается монотонный рост параметра псевдокубической элементарной ячейки  $a(T)$  данного образца, а в области температуры перехода в магнитоупорядоченную фазу при температуре Кюри, равной  $T_C=673$  К, имеет место резкое изменение наклона кривой.

Как показали исследования, образец при нагреве постепенно аморфизируется и при температуре выше 600 К интенсивность рефлексов заметно падает, а в области температуры 690 К все пики практически исчезают и сливаются с фоном (см. рис. 2а).

Повторное исследование данного образца через несколько дней показали, что только часть кристаллической фазы восстанавливается, однако ее доля в образце заметно ниже, чем было изначально при первом измерении. Нами была также рассчитана температурная зависимость параметров ромбоэдрической ячейки ( $a(T)$  и  $c(T)$ ) в диапазоне 90 – 500 К (см. рис. 2б).

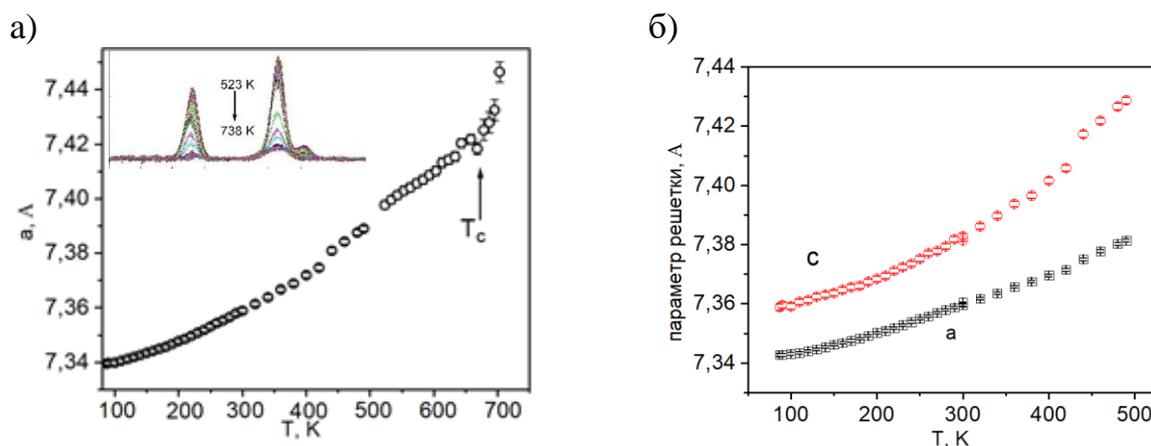


Рис. 2. Температурная зависимость параметра элементарной ячейки  $\text{Sm}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Fe}_2$  в рамках псевдокубической (а) и ромбоэдрической ячеек (б). Вставка: Температурное поведение наиболее интенсивных пиков спектра  $\text{Sm}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Fe}_2$  в диапазоне температур 523-738 К.

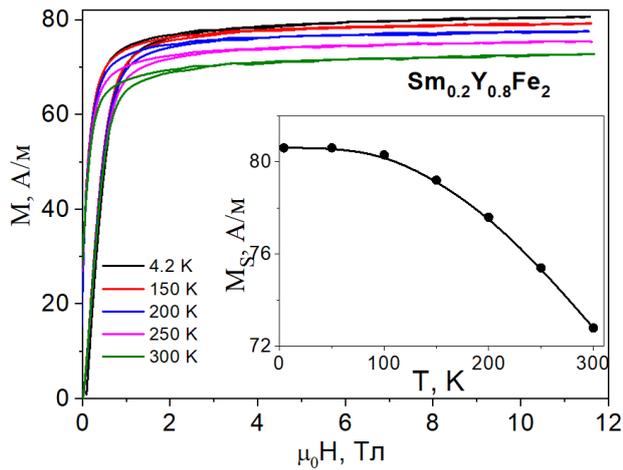


Рис. 3. Полевые зависимости намагниченности состава  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$ . Вставка: Температурная зависимость намагниченности насыщения  $M_{\text{SAT}}(T)$ .

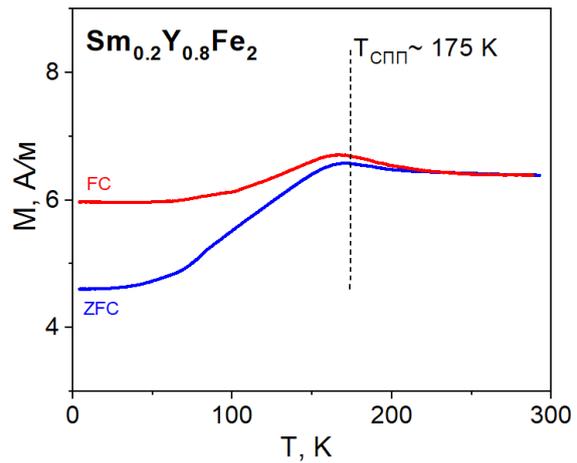


Рис. 4. Термомагнитный анализ соединения  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$  при  $H=2$  кЭ.

На рис. 3 показаны полевые зависимости намагниченности  $M(H)$  соединения  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$  при температурах 4.2, 150, 200, 250 и 300 К. Видно, что для всех кривых  $M(H)$  наблюдается небольшой гистерезис в магнитных полях  $H < 2$  Тл. Кроме того, величина остаточной намагниченности практически не зависит от температуры и составляет 38 А/м. Из рис. 3 видно, что кривые  $M(H)$  выходят на насыщение. Величина намагниченности насыщения  $M_{\text{SAT}}$  при  $T = 4.2$  К равна  $\sim 81$  А/м и практически не изменяется при увеличении температуры до 100 К (см. вставку к рис. 3). При дальнейшем росте температуры наблюдается монотонное уменьшение намагниченности насыщения и при комнатной температуре ее значение составляет 73 А/м.

В  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$  магнитный момент на ионах самария составляет  $\mu_{\text{Sm}} = 0.7 \mu_{\text{B}}/\text{Sm}$ , в то время как средний магнитный момент на ионах железа  $\mu_{\text{Fe}} = 1.45 \mu_{\text{B}}/\text{Fe}$  [4]. Величина полного магнитного момента  $\mu$  для  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$  может быть рассчитана в модели коллинеарного ферромагнетика по формуле:

$$\mu = 2\mu_{\text{Fe}} + 0.2 \mu_{\text{Sm}}. \quad (1)$$

Таким образом, величина полного магнитного момента соединения  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$   $\mu = 3.04 \mu_{\text{B}}/\text{ф.ед.}$  (80 А/м). Рассчитанное значение  $\mu$  хорошо согласуется с экспериментально полученной величиной ( $M = 81$  А/м).

На рис. 4 показаны температурные зависимости намагниченности соединения  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$ , измеренные в режимах охлаждения в нулевом поле и охлаждения в магнитном поле 2 кЭ (термомагнитный анализ ТМА). Ранее [4] подобные кривые  $M(T)$  были использованы для определения температур СПП ( $T_{\text{SR1}}$  и  $T_{\text{SR2}}$ ) для соединения  $\text{SmFe}_2$ . Видно, что в соединении  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$  также наблюдается ярко выраженный спин-переориентационный переход. Однако, температура СПП ( $T_{\text{SR1}}$ ) в замещенном составе уменьшилась от значения 190 К (для  $\text{SmFe}_2$  [1]) до значения  $\sim 175$  К (для  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$ ).

Значение температуры СПП ( $T_{\text{СПП}}$ ) для соединения  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$ , полученное методом термомагнитного анализа хорошо согласуется со значениями, полученными другими методами (см. рис. 1). Анализируя кривые  $M(T)$  (см. рис. 4)

видно, что температура второго перехода  $T_{СПП2}$  ниже 100 К. Несмотря на значительное замещение самария ионами Y, в соединении  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$  СПП сохранились. Можно заключить, что в соединении  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$ , как и соединении  $SmFe_2$ , данный переход осуществляется в результате вращения вектора магнитного момента от одной оси [111] к другой [110] через угловую фазу. Температуры переходов ( $T_{СПП1}$  и  $T_{СПП2}$ ) в  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$  уменьшились примерно на величину – 10-30 К. В то же самое время уменьшение температуры Кюри на порядок больше и составляет 130 К.

На рис. 5 показаны полевые зависимости продольной и поперечной магнитострикции  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$  при разных температурах в магнитных полях до 12 кЭ. Видно, что продольная магнитострикция (рис. 5 а) имеет отрицательные значения во всей области исследования от 85 до 320 К.

При  $T \geq 170$  К (около  $T_{SR1}$ ) все кривые  $\lambda_{||}(H)$  выходят на насыщение, причем, чем выше температура, насыщение  $\lambda_{||}(H)$  достигается в более низких магнитных полях. В области температур  $T < 170$  К кривые  $\lambda_{||}(H)$  не выходят на насыщение в полях до 12 кЭ, демонстрируя резкий рост. Величина магнитострикционных деформаций достигает достаточно большого значения  $-0.4 \cdot 10^{-3}$  при  $T = 85$  К в магнитном поле 12 кЭ.

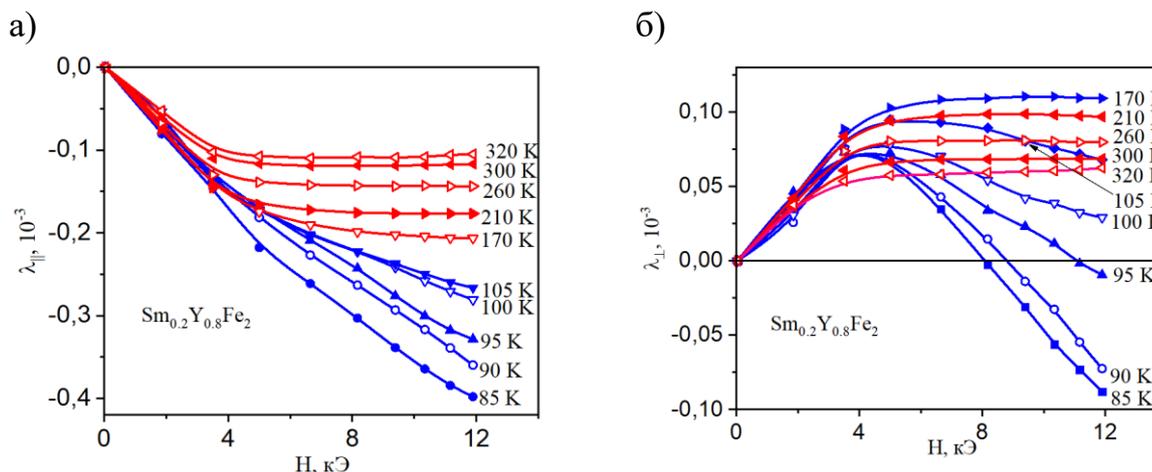


Рис. 5. Полевые зависимости продольной и поперечной магнитострикции состава  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$ .

Поведение полевых зависимостей поперечной магнитострикции  $\lambda_{\perp}(H)$  показано на рис. 5 б. В области температур 320-170 К (выше СПП) поперечная магнитострикция имеет положительные значения и кривые  $\lambda_{\perp}(H)$  демонстрируют насыщение. Более сложное поведение демонстрируют кривые  $\lambda_{\perp}(H)$  при температурах ниже 170 К, т.е. в области СПП. Кривые  $\lambda_{\perp}(H)$  не выходят на насыщение в магнитных полях до 12 кЭ. Более того, часть кривых  $\lambda_{\perp}(H)$  демонстрируют знакопеременный характер. Величина магнитострикционных деформаций при  $T = 85$  К достигает отрицательного значения  $-0.09 \cdot 10^{-3}$  в поле  $H = 12$  кЭ. Следует отметить, что внешнее магнитное поле, приложенное к образцу, смещает температуру магнитоструктурного перехода  $T_{СПП1}$  в сторону более низких температур. Это явление наблюдалось и ранее в соединениях со структурой фаз Лавеса (см., например, ссылку [5]).

Аналогичные исследования проведены нами и для состава  $\text{Sm}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Fe}_2$ . Исследования намагниченности сплава  $\text{Sm}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Fe}_2$  проведено в полях до 14 Тл в интервале температур от 2 до 200 К. Полученные кривые  $M(H)$  представлены на рис. 6(a). Видно, что при всех значениях поля в указанном температурном диапазоне намагниченность достаточно быстро выходит на насыщение в полях, превышающих значение 0.15 Тл. На основе значений, полученных из данных полевых зависимостей  $M(H)$  определены зависимости намагниченности от температуры  $M(T)$ , которые показаны на рис. 6 (б). Видно, что для состава  $\text{Sm}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Fe}_2$  наблюдается монотонное уменьшение намагниченности с ростом температуры в магнитных полях выше 8 Тл. В тоже время температурные зависимости при меньших значениях магнитного поля демонстрируют заметный максимум вблизи 50 К.

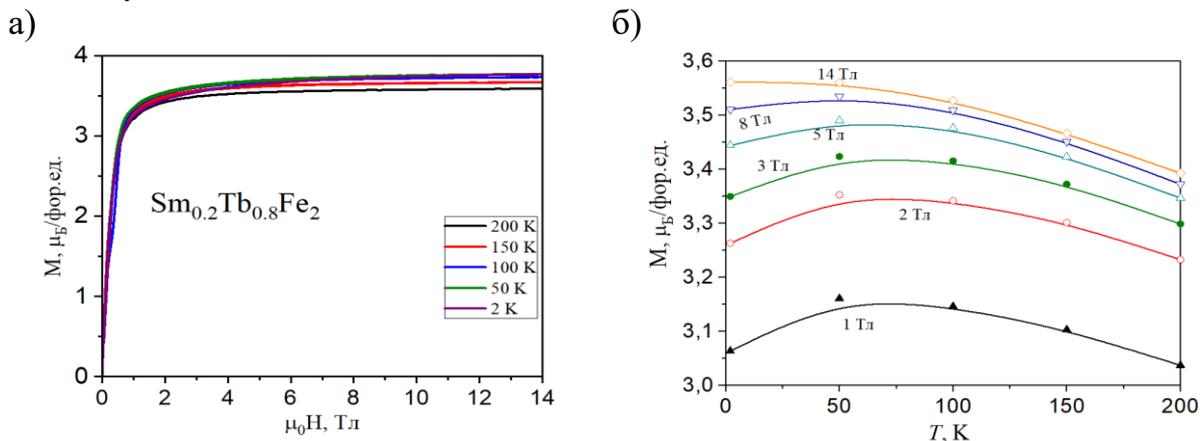


Рис. 6. а) Полевые зависимости намагниченности  $\text{Sm}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Fe}_2$ ; б) Температурные зависимости намагниченности соединения  $\text{Sm}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Fe}_2$  в магнитных полях 1, 2, 3, 5, 8 и 14 Тл.

Для определения температуры Кюри были выполнены исследования ас-восприимчивости при температурах выше 300 К. Температура Кюри определена нами по пику на кривых  $\chi(T)$  и равна  $T_C = 670$  К для состава  $\text{Sm}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Fe}_2$ .

На рис. 7 показано тепловое расширение образца  $\text{Sm}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Fe}_2$ . Видно, что в области низких температур (при  $T \approx 100$  К) наблюдается аномалия на кривых  $\Delta l/l(T)$ , связанная со спин-переориентационным переходом [6].

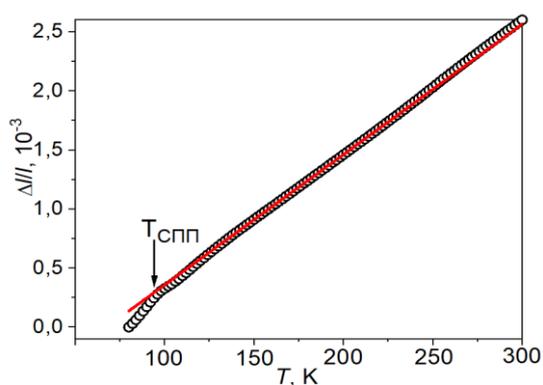


Рис. 7. Температурная зависимость относительного удлинения  $\Delta l/l$  соединения  $\text{Sm}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Fe}_2$ .

На рис. 8 представлены температурные зависимости продольной и поперечной магнитострикции, измеренные в различных магнитных полях до 12 кЭ. Магнитострикционные деформации крайне чувствительны как к структурным, так и магнитным изменениям в образце. В области температур 90 – 110 К наблюдаются аномалии как на кривых  $\lambda_{\parallel}(T)$  (рис. 8 а), так и  $\lambda_{\perp}(T)$  (рис. 8 б) магнитострикции при всех значениях приложенного магнитного поля.

В сильных полях уменьшение продольной магнитострикции при

изменении температуры от 80 до 300 К составляет 25 %, а изменение поперечной магнитострикции достигает 40 %. В слабых магнитных полях до 3.5 кЭ образец  $\text{Sm}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Fe}_2$  демонстрирует высокие значения магнитострикционных деформаций (продольной  $+ 0.53 \cdot 10^{-3}$  и поперечной  $- 0.25 \cdot 10^{-3}$ ), которые меняются незначительно в широком интервале температур от 100 до 300 К.

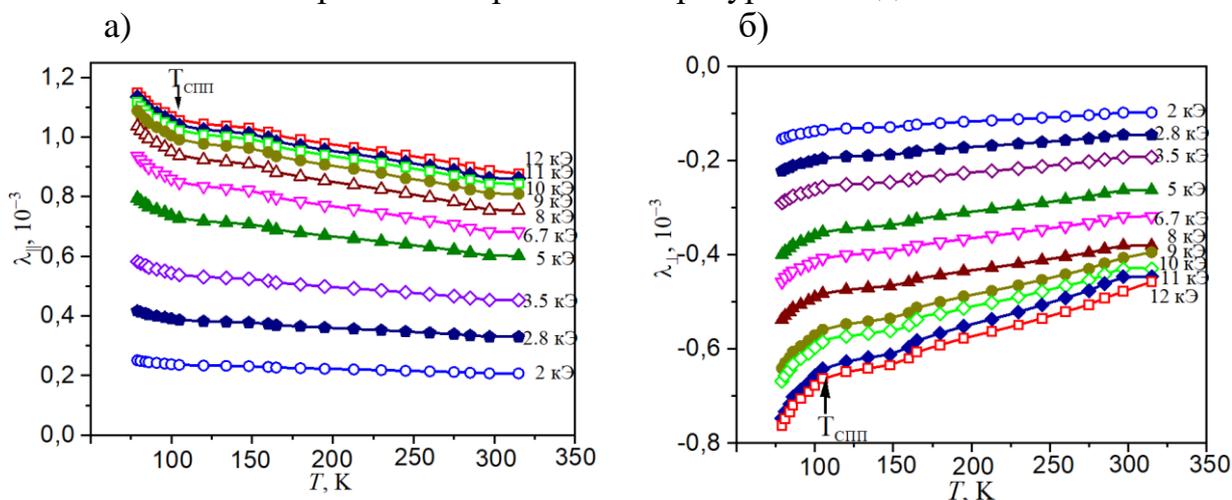


Рис. 8. Температурные зависимости продольной (а) и поперечной (б) магнитострикций  $\text{Tb}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  в различных магнитных полях.

В четвертой главе рассматривается структура, магнитные свойства и сверхтонкие взаимодействия в сплавах  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  [7]. На рис. 9 показаны дифракционные спектры исследуемых сплавов при комнатной температуре. Тут же приведен расчетный спектр основной фазы типа  $\text{MgCu}_2$  для  $x = 0.2$ .

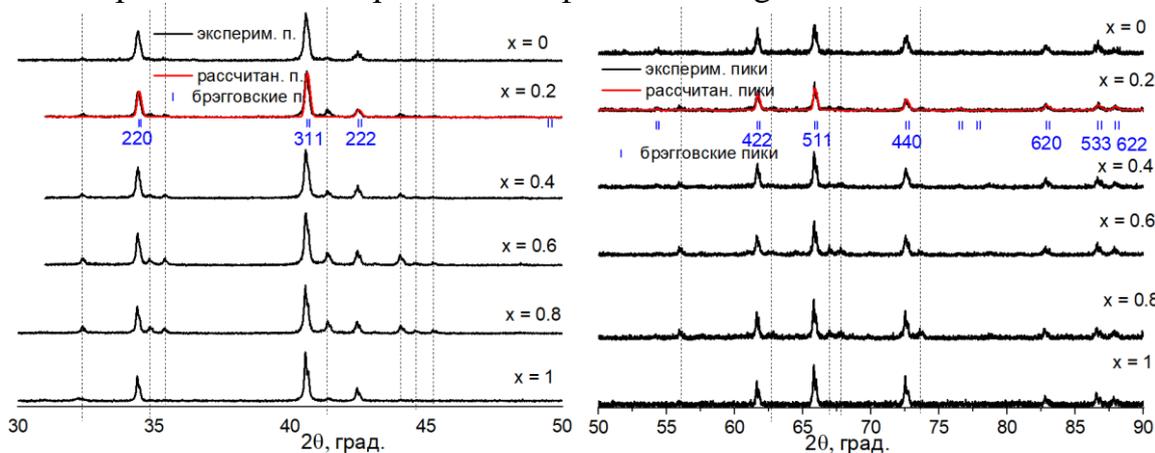


Рис. 9. Фрагменты дифрактограмм образцов системы  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$ , полученные при комнатной температуре. Пунктирными линиями показаны пики от примесей. Для образца  $x = 0.2$  красной линией обозначен рассчитанный профиль от основной фазы, а синими штрихами снизу - соответствующие брегговские пики.

Как видно, в спектрах исследованных сплавов присутствуют дополнительные пики от примесных фаз (в частности, от фазы  $\text{RFe}_3$ , структура типа  $\text{PuNi}_3$ ). Расчеты показали, что содержание основной фазы в составах  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  варьируется в пределах 90 – 95 %.

Расщепление пиков отражения 440 и 533 наблюдаются не только для исходного состава  $\text{Sm}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Fe}_2$ , но и для замещенных составов  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  с малым содержанием иттрия ( $x = 0.2$  и  $0.4$ ). Данный факт указывает на то, что кристаллическая структура составов  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  ( $x = 0, 0.2$  и  $0.4$ ) при комнатной температуре ромбоэдрическая (пространственная группа  $R\text{-}3m$ ), а ОЛН лежит вдоль оси  $[111]$ . При дальнейшем увеличении содержания иттрия двойное расщепление постепенно вырождается, происходит структурный переход, что хорошо видно благодаря изменению формы линии пиков. Из анализа расщепления пиков определены значения магнитострикционной константы  $\lambda_{111}$ , которые приведены в таблице 1.

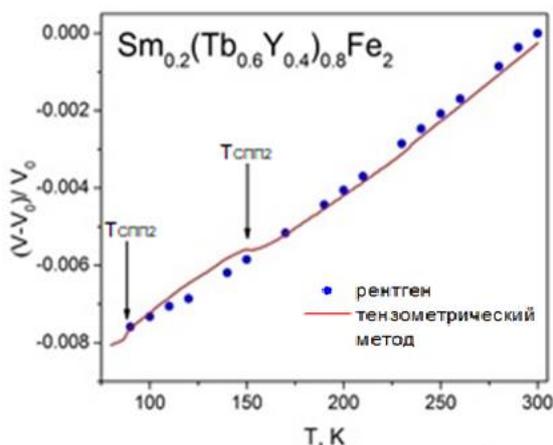
Таблица 1. Значения параметров элементарной ячейки сплавов псевдобинарной системы  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  при комнатной температуре

Состав	a, Å	c, Å	c/a	Тип симметрии	$\lambda_{111}$ , ppm	$T_c$ , К
x = 0	5.2050(2)	12.7850(3)	2.456	Ромбоэдрическая R-3m	1710(50)	670
x = 0.2	5.2028(2)	12.7729(3)	2.455		1200(50)	665
x = 0.4	5.2048(2)	12.7721(3)	2.454		620(50)	640
x = 0.6	7.3639(2)	-	-	Кубическая	-	610
x = 0.8	7.3666(2)	-	-		-	580
x = 1	7.3658(2)	-	-		-	540

Здесь же представлены значения параметров элементарной ячейки исследуемых составов при комнатной температуре. Зависимость данных параметров от концентрации иттрия носит немонотонный характер. При замещении атомов тербия на атомы иттрия от  $x = 0$  до  $x = 0.4$  происходит уменьшение соотношения  $c/a$ , а при  $x = 0.6$  ромбоэдрические искажения перестают наблюдаться ( $c/a = 1$ ).

На рис. 10 а показано температурное изменение относительного объема  $(V-V_0)/V_0$  образца с содержанием иттрия  $x = 0.4$  в интервале от 80 до 300 К. Исследования с помощью дифрактометрического метода показали монотонное увеличение объема элементарной ячейки с ростом температуры.

а)



б)

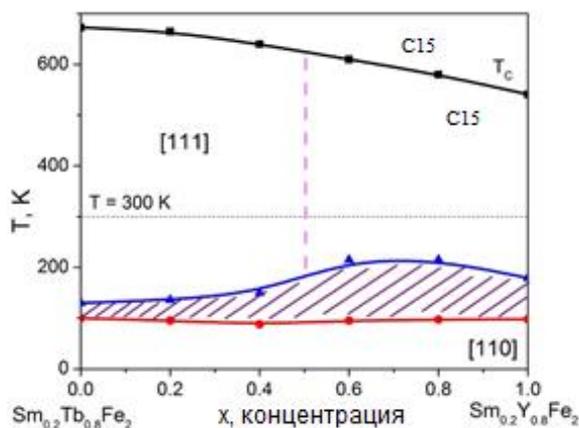


Рис. 10. Температурные зависимости относительного изменения объема соединения  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{0.6}\text{Y}_{0.4})_{0.8}\text{Fe}_2$ , полученные с помощью различных методов (а) и фазовая диаграмма системы  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  (б).

Измерения же тензометрическим методом, проведенные с шагом 1 К, позволили выявить особенности на температурной зависимости относительного изменения объема. Видно, что при температурах  $T_{СПП1} = 150$  К и при  $T_{СПП2} = 88$  К наблюдаются изломы на температурной зависимости относительного изменения объема соединения  $Sm_{0.2}(Tb_{0.6}Y_{0.4})_{0.8}Fe_2$ , свидетельствующие о магнито-структурном фазовом переходе. Аналогичные особенности наблюдаются для всех составов системы  $Sm_{0.2}(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Fe_2$ . Обобщая полученные данные по структуре и фазовым переходам, была построена фазовая диаграмма системы (рис. 10 б). Как отмечалось выше, при понижении температуры в базовом соединении  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$  происходит переход из кубической фазы в тетрагональную, через промежуточную фазу (показано на рис. 10 б заштрихованной областью). При уменьшении

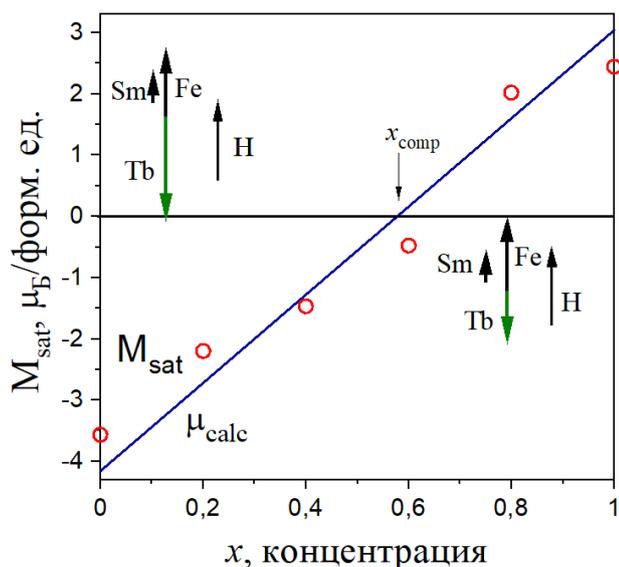


Рис 11. Расчетная ( $\mu_{calc}$ ) и экспериментальная ( $M_{sat}$ ) концентрационные зависимости полного магнитного момента для системы  $Sm_{0.2}(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Fe_2$ .

(кружки), полученные при  $T = 4.2$  К, и теоретическая прямая, рассчитанная по формуле  $\mu_{calc} = 0.72x - 4.16$ . Область отрицательных значений магнитного момента соответствует составам, в которых магнитный момент ионов  $Tb^{3+}$  превышает магнитный момент подрешёток Fe и Sm, как, например, в соединении  $Sm_{0.2}Tb_{0.8}Fe_2$ . По мере замещения тербия иттрием происходит уменьшение полного магнитного момента  $\mu_{calc}(x)$  для сплавов системы  $Sm_{0.2}(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Fe_2$ .

Область положительных значений полного магнитного момента наблюдается при  $x > 0.6$ . Эта область соответствует случаю, когда суммарный момент подрешеток железа и самария превышает противоположно направленный к ним момент тербия. При  $x = 1$  для соединения  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$  наблюдается ферромагнитное упорядочение моментов железа и самария. Наши экспериментальные значения находятся вблизи расчетной прямой. Линейная зависимость  $\mu_{calc}(x)$  пересекает ось абсцисс вблизи состава  $x = 0.6$  (точнее  $x = 0.58$ ), что подтверждает наш вывод, что именно этот состав близок компенсационному. На рис. 12 (а) показаны концентрационная зависимость

содержания иттрия и увеличении содержания тербия кристаллическая решетка при комнатной температуре испытывает всё большие ромбоэдрические искажения, вызванные большой анизотропией, присущей ионам тербия. Наличие двух спин-переориентационных фазовых переходов сохраняется у всех составов системы. При этом температура  $T_{СПП2}$  практически не изменяется, а  $T_{СПП1}$  имеет максимум в области концентрации  $x = 0.6 - 0.8$ . Как следует из ранних исследований [7, 8], в области  $x = 0.4 - 0.6$  наблюдается как компенсация намагничённости, так и компенсация магнитострикции. Кроме того, значения теплового расширения также минимальны при  $x = 0.6$ . На рис. 11 показаны экспериментальные значения намагничённости насыщения  $M_{sat}$

намагниченности при  $T = 2, 100, 200$  и  $300$  К. Видно, что в области значений параметра  $x = 0.6$  в системе  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  наблюдается компенсация намагниченности редкоземельной и железной подрешеток (другими словами, в соединении  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{0.4}\text{Y}_{0.6})_{0.8}\text{Fe}_2$  намагниченность близка к 0).

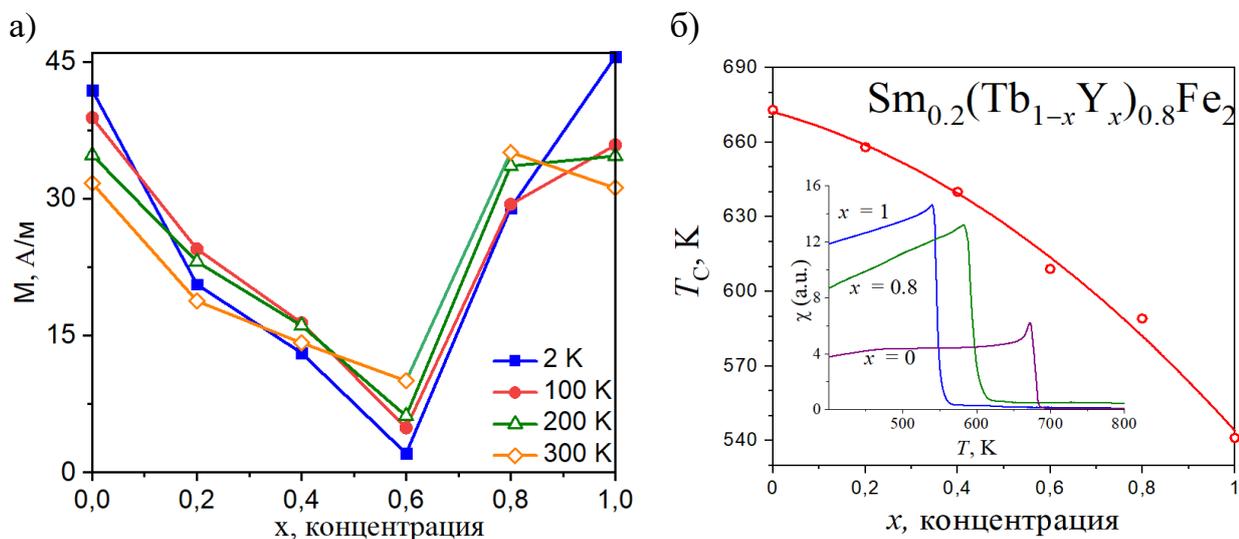


Рис. 12. (а) - Концентрационная зависимость намагниченности системы  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  в температурном интервале от 2 до 300 К при  $H = 2$  кЭ и (б) – Зависимость температуры Кюри сплавов от значения параметра замещения  $x$ . Вставка: температурные зависимости ас-восприимчивости для  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  ( $x = 0; 0.8; 1$ ).

Из результатов исследования намагниченности были также определены значения спонтанной намагниченности  $M_S$  при 4.2 К, а также температуры Кюри (для определения температуры Кюри были выполнены измерения ас восприимчивости (см. вставка к рис. 12 (б)). Результаты приведены в таблице 2. Для составов  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb},\text{Y})_{0.8}\text{Fe}_2$  значения спонтанной намагниченности и намагниченности насыщения при низких температурах отличаются незначительно, что вызвано малой величиной восприимчивости парапроцесса.

В работе проведены исследования продольной и поперечной магнитострикции сплавов системы  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)\text{Fe}_2$ . На рис. 13 представлены зависимости продольной и поперечной магнитострикции от температуры в магнитном поле  $H = 12$  кЭ для соединения  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_{0.8}\text{Tb}_{0.2})_{0.8}\text{Fe}_2$ . Поведение магнитострикции в этом соединении отличается от  $\lambda_{\parallel}(T)$  и  $\lambda_{\perp}(T)$  для сплава  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$ . При частичном замещении иттрия на тербий в соединение  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$  происходит изменение знака магнитострикции. Поперечная магнитострикция во всем исследованном интервале температур становится отрицательной. В то же время продольная магнитострикция для этого состава меняет знак с изменением температуры.

Фазовый переход в соединении  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_{0.8}\text{Tb}_{0.2})_{0.8}\text{Fe}_2$  наблюдается в виде скачка магнитострикции при температуре  $T_{SR} = 100$  К. В соединении  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_{0.8}\text{Tb}_{0.2})_{0.8}\text{Fe}_2$  концентрации ионов самария и тербия практически равны.

Таблица 2. Магнитные характеристики соединений  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$ : температура Кюри ( $T_C$ ), намагниченность насыщения ( $M_{\text{sat}}$ ) и спонтанная намагниченность ( $M_S$ ) при температуре 4.2 К

$x$	$T_C$ , К	$M_{\text{sat}}$ ( $\mu\text{B}$ )	$M_S$ ( $\mu\text{B}$ )
0	670	3.57	3.2
0,2	658	2.20	2.2
0,4	640	1.47	1.2
0,6	609	0.48	0.3
0,8	589	2.02	1.6
1	541	2.44	1.6

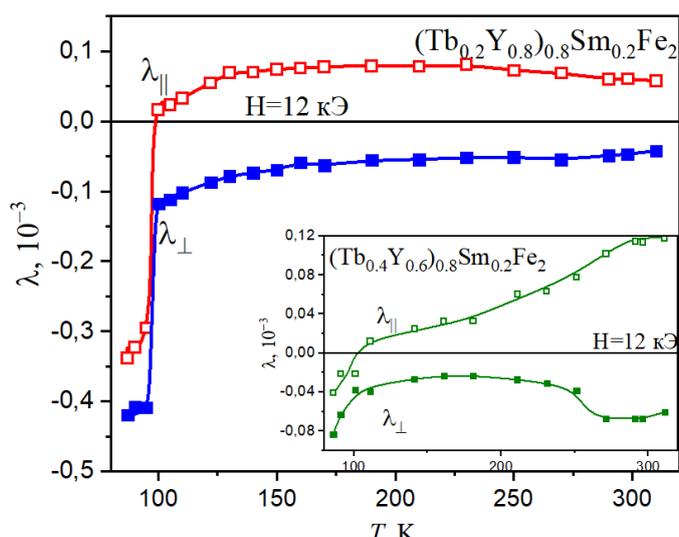


Рис. 13. Температурные зависимости продольной и поперечной магнитострикции  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_{0.8}\text{Tb}_{0.2})_{0.8}\text{Fe}_2$  в поле  $H = 12$  кЭ. Вставка: температурные зависимости продольной и поперечной магнитострикции  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_{0.6}\text{Tb}_{0.4})_{0.8}\text{Fe}_2$ .

Изменение знака магнитострикции при легировании тербием в соединении  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_{0.8}\text{Tb}_{0.2})_{0.8}\text{Fe}_2$  коррелирует с изменением знака ромбоэдрических искажений в системе  $(\text{Sm}, \text{Tb})\text{Fe}_2$  [9]. На вставке к рис. 13 представлены температурные зависимости продольной и поперечной магнитострикции в магнитном поле  $H = 12$  кЭ для сплава  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_{0.6}\text{Tb}_{0.4})_{0.8}\text{Fe}_2$ . Поперечная магнитострикция во всем интервале температур является отрицательной. Продольная магнитострикция для этого состава меняет знак при изменении температуры. В области температур ниже 104 К  $\lambda_{\parallel}$  отрицательна. Выше 104 К  $\lambda_{\parallel}$  положительна и монотонно

возрастает. Величины продольной магнитострикции сплавов системы  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  при концентрациях иттрия  $x = 0.8$  и  $0.6$  примерно равны, а величина поперечной магнитострикции в соединении с  $x = 0.6$  значительно меньше, чем в соединении с  $x = 0.8$ . Изменение знака  $\lambda_{\parallel}$  при  $T = 104$  К в  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_{0.6}\text{Tb}_{0.4})_{0.8}\text{Fe}_2$  связано с фазовым переходом [10].

Температурные зависимости продольной и поперечной магнитострикции соединения  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_{0.4}\text{Tb}_{0.6})_{0.8}\text{Fe}_2$  и  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_{0.2}\text{Tb}_{0.8})_{0.8}\text{Fe}_2$  представлены на рис. 14. Для состава  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_{0.4}\text{Tb}_{0.6})_{0.8}\text{Fe}_2$  в области температур 85 – 100 К наблюдается аномалия на кривых  $\lambda_{\parallel}(T)$  и  $\lambda_{\perp}(T)$  при всех значениях приложенного магнитного поля. Продольная магнитострикция  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_{0.4}\text{Tb}_{0.6})_{0.8}\text{Fe}_2$  и  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_{0.2}\text{Tb}_{0.8})_{0.8}\text{Fe}_2$  положительна. В то же время, поперечная магнитострикция для этих составов во всем интервале температур отрицательна.

На основе результатов исследования продольной и поперечной магнитострикции по формуле (2) определены объемная  $\omega$  и анизотропная  $\lambda_a$

магнитострикции, индуцированные внешним магнитным полем, в соответствие с соотношениями:

$$\omega = \lambda_{\parallel} + 2\lambda_{\perp}$$

$$\lambda_a = 2/3 (\lambda_{\parallel} - \lambda_{\perp}) \quad (2)$$

и

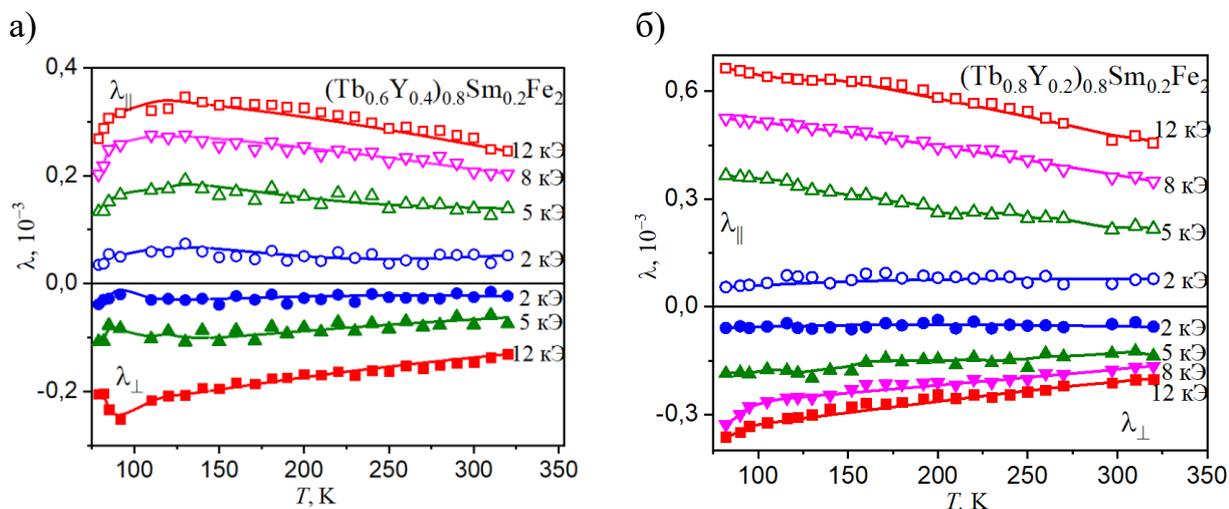


Рис. 14. Температурные зависимости продольной и поперечной магнитострикции сплавов  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_{0.4}\text{Tb}_{0.6})_{0.8}\text{Fe}_2$  (а),  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_{0.8}\text{Tb}_{0.2})_{0.8}\text{Fe}_2$  (б).

На рис. 15 (а) показаны температурные зависимости  $\omega(T)$  для сплавов системы  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_x\text{Tb}_{1-x})_{0.8}\text{Fe}_2$  (где  $x = 0, 0.4, 0.8, 1$ ) в магнитном поле  $H = 12$  кЭ. У всех составов в интервале температур 80 – 320 К объемная магнитострикция отрицательна при низких температурах, а в области комнатной температуры близка к нулю.

Важно, что сразу для трех составов  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_x\text{Tb}_{1-x})_{0.8}\text{Fe}_2$  (где  $x = 0.4, 0.8, 1$ ) наблюдается широкая область температур (150 – 300 К), в которой значения  $\omega$  близки к 0. В соединении  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_{0.8}\text{Tb}_{0.2})_{0.8}\text{Fe}_2$  при уменьшении температуры ниже 110 К наблюдается резкий рост величины объемной магнитострикции, вызванный магнитоструктурным фазовым переходом.

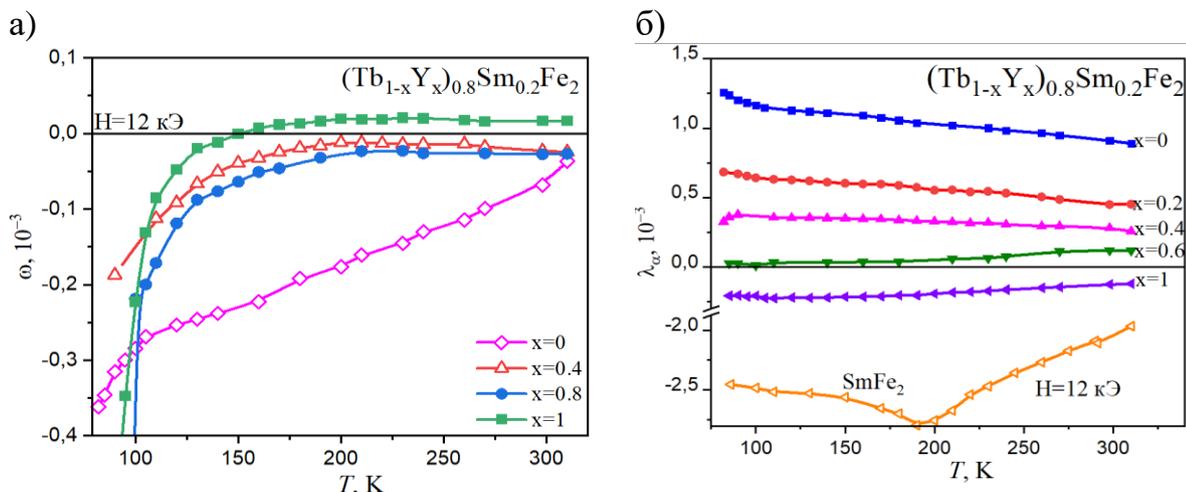


Рис. 15. Температурные зависимости (а) объемной и (б) анизотропной магнитострикции соединений  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  и  $\text{SmFe}_2$  в поле  $H = 12$  кЭ.

Рис. 15 (б) демонстрирует температурные зависимости анизотропной магнитострикции  $\lambda_a$  в магнитном поле  $H = 12$  кЭ для сплавов  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_x\text{Tb}_{1-x})_{0.8}\text{Fe}_2$  при различных концентрациях иттрия. Для сравнения на рис. 15 (б) показана температурная зависимость анизотропной магнитострикции соединения  $\text{SmFe}_2$  в таком же магнитном поле [1]. Магнитострикция  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$  в 10 раз меньше, чем в  $\text{SmFe}_2$ . Константа одноионной магнитострикции зависит от концентрации ионов  $\text{Sm}^{3+}$  и кристаллического поля (КП), создаваемого локальным окружением. При уменьшении концентрации Sm в 5 раз ( $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$ ) величина магнитострикции уменьшается на порядок. При замещении Sm иттрием происходит уменьшение величины КП.

Соединение  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_{0.6}\text{Tb}_{0.4})_{0.8}\text{Fe}_2$  демонстрирует наименьшую величину анизотропной магнитострикции (отрицательную). Во всех других соединениях с тербием наблюдается положительная анизотропная магнитострикция. В системе  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}_x\text{Tb}_{1-x})_{0.8}\text{Fe}_2$  происходит возрастание  $\lambda_a$  с увеличением концентрации ионов  $\text{Tb}^{3+}$ . Низкотемпературные аномалии анизотропной магнитострикции (при  $T < 100$  К) вызваны магнитоструктурными фазовыми переходами.

В работе также изучены сверхтонкие взаимодействия в сплавах системы  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$ , где параметр замещения принимает значения  $x = 0; 0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1$ . Эти исследования проведены с помощью эффекта Мессбауэра, который является крайне чувствительным к особенностям структуры и типа магнитного упорядочения. Мессбауэровские спектры сплавов данной системы представлены на рис. 16. Видно, что по мере замещения атомов Tb атомами Y вид спектров меняется незначительно. Спектры являются спектрами магнитоупорядоченного типа и представляют собой суперпозицию двух зеемановских секстетов с соотношением интенсивностей 1:3, соответствующих двум типам мест ядер  $^{57}\text{Fe}$ , неэквивалентным в магнитном отношении.

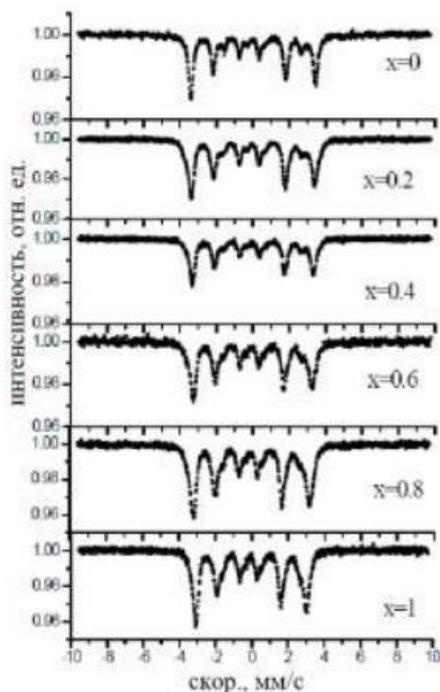


Рис. 16. Мессбауэровские спектры  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  при  $T = 300$  К.

В результате обработки мессбауэровских спектров образцов системы  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  были определены средние значения сверхтонких параметров – изомерного сдвига мессбауэровской линии  $\delta$  и квадрупольного смещения компонент спектра Q. Полученные результаты изображены на рис. 17.

Нами также определены значения изотропного и анизотропного сверхтонких полей. Сверхтонкие поля для крайних составов  $\text{Sm}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Fe}_2$  и  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$  хорошо согласуются с литературными данными для соединений  $\text{TbFe}_2$  и  $\text{YFe}_2$  [10, 11]. Из сравнения рис. 17 (б, в) можно проследить положительную корреляцию между сдвигом мессбауэровской линии  $\delta$  и квадрупольным смещением Q компонент спектра. Это означает, что качественно их поведение с ростом концентрации иттрия совпадает. Кроме того, среднее значение изомерного сдвига составляет  $\delta = -0.086 \pm 0.004$  мм/с и в указанных

пределах оно не меняется. Колебания величины изомерного сдвига относительно данного среднего значения могут быть обусловлены наличием небольшого количества примесной фазы в промежуточных составах. Анализ сверхтонких параметров дает дополнительную информацию о свойствах многокомпонентной системы сплавов  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$ . Следует отметить, что такие исследования проводятся впервые.

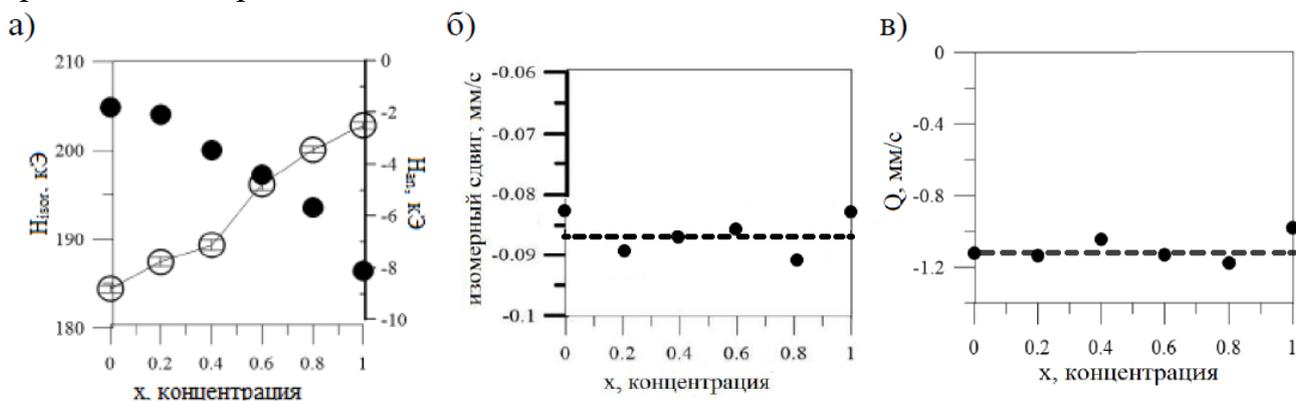


Рис. 17. Концентрационные зависимости (а) изотропного  $H_{\text{is}}$  (темные точки) и анизотропного  $H_{\text{an}}$  (светлые точки) сверхтонких полей на ядрах  $^{57}\text{Fe}$ , (б) изомерного сдвига мессбауэровской линии, (с) квадрупольного смещения компонент сверхтонкой структуры спектров  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$ .

**Пятая глава** посвящена исследованию магнитных свойств сплавов системы  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  в статических (до 14 Тл) и в импульсных (до 60 Тл) магнитных полях. Важно, что для всех соединений кривые полевой зависимости намагниченности  $M(H)$  достаточно быстро выходят на насыщение (см. рис. 18 а).

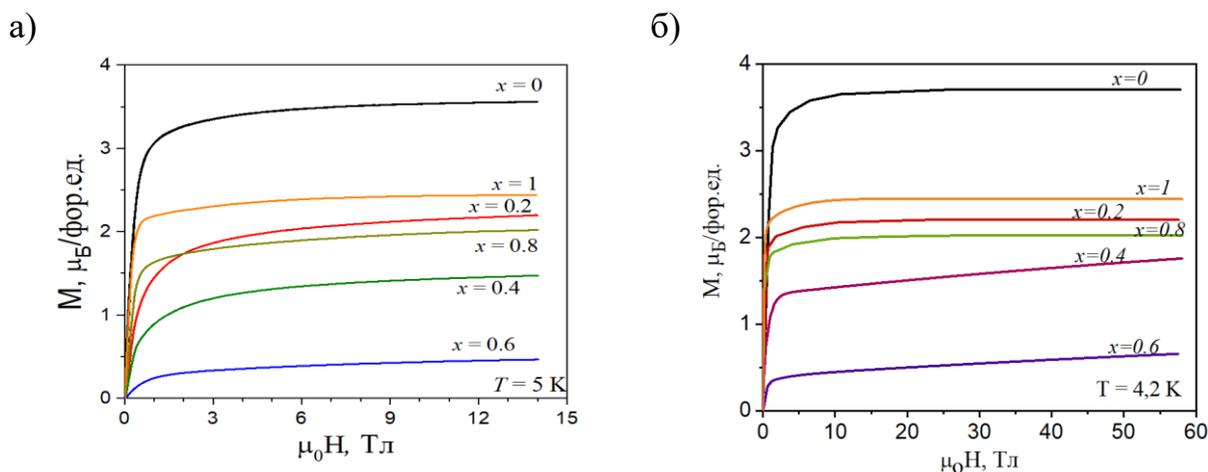


Рис. 18. Полевые зависимости намагниченности  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  в статических (а) и импульсных (б) магнитных полях при  $T = 4.2$  К.

На рис. 18 б представлены полевые зависимости намагниченности соединений  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  при 4.2 К в полях до 60 Тл. Небольшой рост намагниченности наблюдается только для составов с  $x = 0.4$  и  $x = 0.6$ . Соединения  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  следует рассматривать в модели трехподрешеточного ферримагнетика, с магнитными подрешетками Sm, Tb и Fe. Предполагая, что коллинеарная структура магнитных моментов подрешеток сохраняется, можно

рассчитать величину магнитного момента соединений  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  для ферри- и ферромагнитного состояний следующим образом:

$$\mu_{ferric}^{(calc)} = 2\mu_{Fe} + \mu_{Sm} - \mu_{Tb} \quad (3)$$

$$\mu_{ferro}^{(calc)} = 2\mu_{Fe} + \mu_{Sm} + \mu_{Tb}, \quad (4)$$

где  $\mu_{Sm} = 0.2 \cdot 0.7\mu_B = 0.14\mu_B$  – магнитный момент подрешетки  $\text{Sm}^{3+}$ ;  
 $\mu_{Tb} = 0.8 \cdot (1 - x) \cdot 9\mu_B$  – магнитный момент подрешетки Tb, зависящий от параметра замещения  $x$ . В таблице 3 представлены результаты вычисления.

Таблица 3. Расчётные значения магнитных моментов соединений  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  при  $T = 4.2 \text{ K}$

$x$	$\mu_{Sm} (\mu_B)$	$\mu_{Fe} (\mu_B)$	$\mu_{Tb} (\mu_B)$	$\mu_{ferric}^{(calc)}$	$\mu_{ferro}^{(calc)}$
0	0.14	1.45	7.20	4.16	10.24
0.2			5.76	2.72	8.80
0.4			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

Из рис. 18 б можно сделать вывод, что ферромагнитное состояние в полях до 60 Тл для соединений  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  не реализуется, т.к. значения полных магнитных моментов для ферромагнитного состояния (см. таблицу 3) значительно больше величины намагниченности, полученной из эксперимента.

Температурные зависимости намагниченности  $M(T)$  в различных полях представлены на рис. 19.

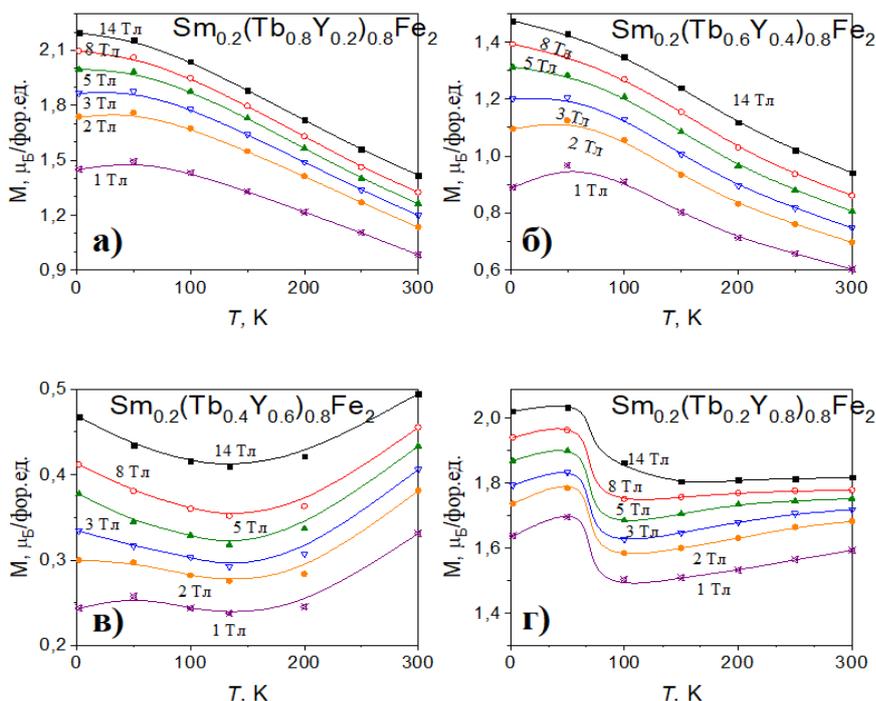


Рис. 19. Температурные зависимости намагниченности соединений  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  в магнитном поле 1, 2, 3, 5, 8 и 14 Тл.

Видно, что для составов с  $x = 0.2$  и  $0.4$  наблюдается монотонное уменьшение намагниченности с ростом температуры в магнитных полях выше 8 Тл. В тоже время температурные зависимости при меньших значениях магнитного поля демонстрируют максимум вблизи  $T = 50$  К. Из рис. 19 (в, г) видно, что на температурных зависимостях намагниченности для компенсационного состава ( $x = 0.6$ ) наблюдается минимум вблизи температуры 140 К. Для состава с  $x = 0.8$  на кривых  $M(T)$  наблюдается минимум вблизи температуры 100 К, что связано с явлением спиновой переориентации.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ:

1. Синтез образцов  $Sm_{0.2}(Tb_{x-1}Y_x)_{0.8}Fe_2$ , проведенный в отсутствие специальных экстремальных условий (высоких давлений и высоких скоростей изменения температуры), позволил получить однофазные образцы только при  $x = 0$  и  $1$  ( $Sm_{0.2}Tb_{0.8}Fe_2$  и  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$ ), в то время как промежуточные составы ( $0.2 \leq x \leq 0.8$ ) после длительных отжигов содержали до 10 % посторонних фаз. Установлено, что все составы системы  $Sm_{0.2}(Tb_{x-1}Y_x)_{0.8}Fe_2$  обладали кубической структурой фазы Лавеса C15.

2. В результате проведения высокотемпературных и низкотемпературных рентгеновских исследований для многокомпонентных сплавов  $Sm_{0.2}(Tb_{1-x}Y_x)_{0.8}Fe_2$  построена магнитная фазовая диаграмма. Определены температуры структурных переходов, непосредственно связанных с магнитными ориентационными переходами.

3. В рамках модели коллинеарных магнитных моментов доказано, что система  $Sm_{0.2}(Tb_{x-1}Y_x)_{0.8}Fe_2$  (где  $0 \leq x \leq 1$ ) имеет компенсационный состав, близкий к экспериментально полученному составу  $Sm_{0.2}(Tb_{0.4}Y_{0.6})_{0.8}Fe_2$ , при параметре замещения  $x = 0.58$ . При  $T = 140$  К состав  $Sm_{0.2}(Tb_{0.4}Y_{0.6})_{0.8}Fe_2$  также демонстрирует явление магнитной компенсации по температуре.

4. Исследования полевых зависимостей намагниченности ферромагнитных сплавов системы  $Sm_{0.2}(Tb_{x-1}Y_x)_{0.8}Fe_2$  в импульсных магнитных полях до 60 Тл показали, что данных полей недостаточно для того, чтобы нарушить коллинеарную магнитную структуру и наблюдать явление индуцированного внешним магнитным полем ферромагнитного состояния.

5. Установлено, что магнитоструктурный фазовый переход, который демонстрирует бинарные соединения  $SmFe_2$ , сохраняется и в замещенном составе  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$ . Наблюдается лишь сдвиг температур, соответствующих началу и концу перехода в область более низких температур. Как результат, в соединениях  $SmFe_2$  и  $Sm_{0.2}Y_{0.8}Fe_2$  сохраняется ромбоэдрическая структура при понижении температуры до 175 -190 К. При дальнейшем уменьшении температуры вектор спонтанного магнитного момента находится в плоскости (110), затем магнитный момент достигает оси  $\langle 110 \rangle$ .

6. В результате исследования полевых и температурных зависимостей продольной, поперечной, объемной и анизотропной магнитострикции соединений  $Sm_{0.2}(Tb_{x-1}Y_x)_{0.8}Fe_2$  обнаружена инверсия знака констант магнитострикции в области магнитоструктурного фазового перехода в интервале концентраций иттрия, соответствующих значению параметра замещения  $x = 0.6 - 1$ . Анализ

полученных магнитострикционных данных свидетельствует об аддитивности вкладов в магнитострикцию от подрешеток железа, самария и тербия, а также о преобладании одноионного механизма возникновения магнитострикционных деформаций.

7. Определены зависимости изотропного и анизотропного сверхтонких полей на ядрах  $^{57}\text{Fe}$ , константы квадрупольного расщепления и изомерного сдвига мессбауэровской линии в системе  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}_{x-1}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Fe}_2$  в зависимости от концентрации ионов иттрия, замещающих высокоанизотропные ионы тербия с высоким магнитным моментом. Установлена взаимная корреляция найденных сверхтонких параметров для всех исследуемых составов. Обнаружено, что при изменении соотношения атомов Tb и Y, окружающих атом Fe, плотность заряда s-электронов на ядре  $^{57}\text{Fe}$  остается постоянной.

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Алероева Т.А., Терешина И.С., Умхаева З.С., Илюшин А.С. и др. Структурные, магнитные и тепловые свойства соединения  $\text{Tb}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  со структурой фаз Лавеса // ФТТ. 2019. 61, № 12, С. 2471-2476.
2. Umkhaeva Z.S., Ilyushin A.S., **Aleroeva T.A.**, Tereshina I.S., Pankratov N.U. Yttrium influence on exchange interactions in Laves phases  $(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$  // Advan. in Engin. Research. 2018. 177, P. 198-202.
3. Z.S. Umkhaeva, A.S. Ilyushin, S.A. Nikitin, **T.A. Aleroeva**, N.Yu. Pankratov and I.S. Tereshina. Magnetic and magnetoelastic properties of rare earth intermetallides based on  $\text{TbFe}_2$ . IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. 905, p. 012071-012071.
4. **Т. А. Алероева**, А. С. Илюшин, З. С. Умхаева, Н.Ю. Панкратов, И. С. Терёшина. Особенности полевых и температурных зависимостей магнитострикции многокомпонентных сплавов  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Y}, \text{Tb})_{0.8}\text{Fe}_2$ . // Вестник Московского Университета. 2020. 3, стр. 59-67.
5. А. С. Илюшина, I. S. Tereshina, N. Yu. Pankratov, **Т. А. Алероева**, Z. S. Umkhaeva, A. Yu. Karpenkova, T. Yu. Kiseleva, S. A. Granovskaya, M. Doerre, H. Drulis, E. A. Tereshina-Chitrova. The phenomenon of magnetic compensation in the multi-component compounds  $(\text{Tb}, \text{Y}, \text{Sm})\text{Fe}_2$  and their hydrides. // Journal of Alloys and compounds. 2020. 847, p. 155976.
6. G.A. Politova, I.S. Tereshina, N.Yu. Pankratov, **T.A. Aleroeva**, A.V. Filimonov, P.Yu. Vanina, O.A. Alekseeva, J. Cw, Yu.S. Koshkid'ko, A.S. Ilyushin. Features Peculiar to the Magnetostrictive Properties of Intermetallic  $\text{Sm}_{0.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_2$  in the Spin Reorientation Region. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2021, v. 527, p. 167728.
7. Z. S. Umkhaeva, A. S. Ilyushina, I. S. Tereshina, **T. A. Aleroeva**, T. Yu. Kiseleva and N. Yu. Pankratov. Mossbauer effect in alloys of variable composition  $(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{Fe}_2$ . // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1753, 012079.
8. G.A. Politova, P.Yu. Vanina, O.A. Alekseeva, A.V. Filimonov, **T.A. Aleroeva**, N.Yu. Pankratov, G.S. Burkhanov, A.S. Ilyushin, X-ray studies of multicomponent  $\text{Sm}_{0.2}(\text{Tb}, \text{Y})_{0.8}\text{Fe}_2$  alloys, Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1758, 012030.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Политова Г.А., Карпенков А.Ю., Каминская Т.П. и др. Структура и фазовые превращения высокомагнитострикционного сплава системы самарий-железо со структурой фаз Лавеса. // НТБ СПбГПУ. 2019. 12, №1, с. 28-38.
- [2] Tereshina I.S., Nikitin S.A., Politova G.A. et. al. Magnetostriction and magnetization of the intermetallic compounds  $RFe_{2-x}Co_x$  ( $R = Tb, Dy, Er$ ) with compensated magnetic anisotropy. // Physics of the Solid State. 2009. 51 (1), p. 92-98.
- [3] Budzynski M., Sarzynski J., Wiertel M., Surowiec Z. Effect of Sc substitution for Y on structural properties and hyperfine interactions in  $Y_{1-x}Sc_xFe_2$  compounds // Nukleonika, 2003, 48, 2003, p. 79-83.
- [4] Radha S., Nigam A. K., Lim S. H. Magnetic Properties of Crystalline  $SmFe_2$ -B Alloys. // J. Phys.: Conf. Series, 2010, 200, p. 032070.
- [5] Deryain A.V., Kazakov A.A., Kudrevatykh N.V., Moskalev V.N., Mushnikov N.V. et. al. The magnetic moment, magnetostriction and effective field on Fe nuclei in  $CeFe_2$ ,  $LuFe_2$  and their hydrides. // Phys.Met.Metall, 1985, 60(2), p. 81-86.
- [6] Tsvyashchenko L.G. High pressure synthesis of  $R_6Cu_{23}$  compounds ( $R = Tb, Dy, Yb, Lu$ ). // J. Less - Common Metals., 1984, v.99, p. 9-11.
- [7] Wang N.J., Liu Y. et al. Fabrication, magnetostriction properties and applications of Tb-Dy-Fe alloys: a review, China Foundry. 2016, 13(2), p. 75-84.
- [8] Ren W.J., Zhang Z.D. Progress in bulk  $MgCu_2$ -type rare-earth iron magnetostrictive compounds. // Chin. Phys. B. 2013. 22(7), p. 077507.
- [9] Илюшин С.А., Солодов Е.В., Умхаева З.С. Структурные и магнитные превращения в сплавах псевдобинарной системы  $(Sm_{1-x}Tb_x)Fe_2$  // Перспективные материалы, 2013, 11, С. 42 - 47.
- [10] Buck S., Fahnle M. Magnetostriction in  $TbFe_2$ : weak influence of the internal structural distortion. // J. Magn. Magn. Mater. 1999. 204, P. L1-L4.
- [11] Tang Y. M., Chen L. Y., Zhang L., Huang H. F. et. al. Temperature dependence of the magnetostriction in polycrystalline  $PrFe_{1.9}$  and  $TbFe_2$  alloys: Experiment and theory. // Journal of Applied Physics 2014. 115, N 17, P. 173902.
- [12] Masuda R., Mitsui T., Itoh K., Kobayashi Y. et. al. Mössbauer study of the  $SmFe_2$  hydride through  $^{149}Sm$  and  $^{57}Fe$ . // J. Phys. Soc. Japan. 2012. 81 (3), p. 034714.

---

Подписано в печать 08.10.2021. Формат 60x90<sup>1/16</sup>.  
Бумага офисная. Печать-ризография  
у.п.л. 1,5. Тираж 100 экз.

---

Издательство ФГБОУ ВО «Чеченский государственный  
университет им. А.А. Кадырова»  
Адрес: 364037 ЧР, г. Грозный, ул. Киевская, 33