

Отзыв официального оппонента

о диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Макуренковой Анны Александровны на тему: «Структурные и магнитные свойства допированных редкоземельных интерметаллидов с высоким содержанием железа», по специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений».

Исследованию магнитных свойств интерметаллических соединений на основе f - и d - металлов уделяется значительное влияние со стороны многих исследовательских групп. Это связано с тем, что многие фундаментальные проблемы магнетизма, как например, физические механизмы, ответственные за обменные и магнитокристаллические взаимодействия при участии зонных электронов, могут быть наиболее эффективно изучены в магнитоупорядоченных веществах, где существуют две подсистемы электронов: локализованные $4f$ - электроны и зонные d - электроны. Практический интерес к подобным объектам связан, в том числе, с возможностью создания постоянных магнитов, обладающих высокими значениями магнитной энергии и коэрцитивной силы.

В настоящее время исследовательские группы ведущих стран работают над совершенствованием свойств магнитных материалов для высокоэффективных, ресурсосберегающих постоянных магнитов, в том числе над получением оптимальных составов с пониженным содержанием редкоземельных элементов, обладающих фазовой стабильностью и высокими значениями намагниченности насыщения в широком диапазоне температур. Решение данной задачи требует понимания фундаментальных механизмов ответственных за формирование: спонтанной намагниченности, магнитокристаллической анизотропии и обменных взаимодействий, на которые сильно влияют особенности расположения составляющих атомов в кристаллической структуре. Поэтому диссертационная работа Макуренковой А.А. представляется исследованием, выполненным в важном

направлении, поскольку в этой работе сделан важный шаг в повышении магнитных параметров с помощью новой технологии при производстве магнитотвердых материалов со структурой ThMn_{12} методом магнетронного напыления. В результате были получены монокристаллические пленки $\text{Sm}(\text{Fe},\text{Co})_{12-x}\text{Ti}_x$ с пониженным содержанием стабилизирующего элемента. Существенной особенностью и несомненным достоинством работы является изучение фундаментальных свойств магнитотвердых материалов и разработка материалов, обладающих рекордными характеристиками, превышающими свойства NdFeB , пригодных для практического использования.

В связи с вышеизложенным, диссертационная работа, посвященная исследованию взаимосвязи структурных и магнитных свойств редкоземельных интерметаллидов с высоким содержанием железа, является актуальной. Диссертационная работа А.А. Макуреновой, несомненно, является законченным научным исследованием, она содержит ряд важных в научном отношении результатов, многие из которых обладают новизной и являются существенным вкладом в физику магнитных явлений.

Главная цель рецензируемой диссертационной работы состояла в установлении физических механизмов, приводящих к формированию материалов с высокой магнитокристаллической анизотропией при изменении электронной структуры. С этой целью было выполнено комплексное исследование магнитных свойств ферро- и ферримагнитных f-d-интерметаллидов с кристаллической структурой типа ThMn_{12} и $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ в сильных магнитных полях до 9 Тл. В работе проведены обширные исследования магнитных свойств f-d-интерметаллидов, в которых проводились разнообразные замещения в 3d-подрешётке, что позволило изменять концентрацию 3d-зонных электронов и величину обменных полей, действующих на них со стороны f- и d-подрешёток. Такой подход к объектам исследования в сочетании с экспериментальными данными по намагниченности оказался очень эффективным, что позволило

А. А. Макуренковой получить новые и ценные в научном отношении результаты.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения:

Глава 1 содержит обстоятельный литературный обзор теоретических и экспериментальных работ, посвящённых изучению редкоземельных интерметаллидов обладающих высокой магнитокристаллической анизотропией. Анализ этих данных показывает необходимость систематического исследования эффектов замещения и допирования в системах, где особенности кристаллической структуры оказывает сильное влияние на магнитные свойства. С практической точки зрения, результаты подобных исследований позволяют сформировать подходы и механизмы для получения магнитных материалов с заданными свойствами под различные области применения.

Глава 2 содержит описание применяемых в работе экспериментальных методик. Стоит отметить, что автором была освоена и отработана сложная с технологической точки зрения методика получения монокристаллических магнитных плёнок методом магнетронного напыления, что позволило решить поставленные в диссертационной работе задачи.

Глава 3 посвящена систематическому исследованию влияния стабилизирующего элемента титана на структуру и магнитные свойства соединений $\text{Sm}(\text{Fe}_{0,8}\text{Co}_{0,2})_{11-x}\text{Ti}_x$. Установлены закономерности формирования кристаллической и магнитной структур в ферромагнитных плёнках $\text{Sm}(\text{Fe},\text{Co},\text{Ti})$ при детальном контроле технологических условий их получения. Использование современных методов контроля структуры (электронной микроскопии, рентгеноструктурного и рентгенофлуоресцентного анализа) обеспечивает достоверность и надёжность результатов и выводов. Исследованы процессы намагничивания и термомагнитные кривые в широком диапазоне температур и магнитных полей. Показана зависимость намагниченности насыщений и поля магнитной анизотропии от температуры и концентрации стабилизирующего элемента.

Новым результатом является обнаружение высокоанизотропных материалов с пониженным содержанием титана.

Глава 4 содержит обширные данные, полученные для гидридов редкоземельных соединений $Tb(Fe,Co)_{11}Ti$, допированных кобальтом. Здесь наиболее интересный результат состоит в том, что гидрирование индуцирует отрицательную магнитокристаллическую анизотропию 4f-подрешетки, вследствие чего в поле происходит подавление одноосной анизотропии исходных соединений.

В главе 5 автор не ограничивается исследованием монокристаллов с кристаллической структурой типа $ThMn_{12}$, а изучает гидриды соединений с кристаллической структурой типа Th_2Zn_{17} . Здесь наиболее интересным и новым результатом, полученным автором, является эффект сильного уменьшения температуры перехода типа точка магнитной компенсации в результате внедрения трех атомов водорода на формульную единицу в кристаллическую соединения $Dy_2Fe_{10}Al_7$. В то же время показано, что гидрирование данного соединения не изменяет температуру Кюри.

Из результатов работы стоит отметить наиболее значимые: Впервые исследовано влияние стабилизирующего элемента на магнитные и кристаллические свойства пленок $Sm(Fe_{0,8}Co_{0,2})_{11-x}Ti_x$ при низких концентрациях стабилизирующего элемента Ti ($x=0; 0.4; 0.6$). Анализ зависимостей намагниченности насыщения и поля анизотропии от концентрации стабилизирующего элемента Ti показывает, что соединения $Sm(Fe_{0,8}Co_{0,2})_{11-x}Ti_x$ могут конкурировать с $Nd_2Fe_{14}B$ по свойствам в составах с содержанием $x < 0,5$.

Основные выводы диссертации сделаны автором на основе обширного и добротного экспериментального материала. Достоверность полученных результатов и обоснованность сформулированных положений и выводов диссертации обеспечиваются применением комплекса апробированных методов.

Результаты исследований прошли надежную апробацию в виде докладов на российских и международных конференциях, опубликованы в российских и зарубежных журналах.

Диссертация написана грамотно, доступным языком, с точным употреблением необходимых терминов, тем не менее в некоторых местах встречаются стилистические ошибки и опечатки.

Несмотря на общее хорошее впечатление от работы, по ней можно сделать следующие замечания:

1. В работе указывается, что пленки $\text{Sm}(\text{Fe}_{0,8}\text{Co}_{0,2})_{12-x}\text{Ti}_x$, полученные магнетронным напылением на монокристаллические подложки из MgO, являются монокристаллическими, однако, на основании спектров рентгеновской дифракции такой вывод сделать сложно, т.к. похожая картина может быть получена и от текстурированной пленки. Данные электронномикроскопических исследований не в полной мере подтверждают образование монокристаллической пленки, в силу высокой локальности метода. В особенности это хорошо заметно для $\text{Sm}(\text{Fe}_{0,8}\text{Co}_{0,2})_{11}\text{Ti}$, где наблюдается значительная неоднородность распределения элементов по сечению пленки.
2. В работе с пленками, состав указывается как номинальный $\text{Sm}(\text{Fe,Co})_{12-x}\text{Ti}_x$, а химический состав пленок контролировался при помощи метода рентгенофлуоресцентного анализа (XRF). При указанной толщине пленок 450-480 нм, данный метод имеет систематическую ошибку, связанную с тем, что величина области выхода характеристического рентгеновского излучения больше толщины пленки и, по этой причине, расчётные значения состава могут отличаться от реального состава.
3. Предположение о причинах несоответствия значений осевого соотношения a/c для пленки с концентрацией титана равной 1 и для поликристаллического сплава такого же состава, выглядит не очень

убедительным, а сама причина несоответствия требует проведения дополнительных исследований в этом направлении.

4. С точки зрения практической значимости синтезированных пленок, необходимо было привести расчеты максимального энергетического произведения для соединений $\text{Sm}(\text{Fe}_{0,8}\text{Co}_{0,2})_{11-x}\text{Ti}_x$.
5. Можно сделать замечание по оформлению автореферата, поскольку в главе 5 в диссертации и в описании главы 5 в автореферате используются разные обозначения величины намагниченности. В таблице 1, допущена ошибка в названии соединения $\text{Sm}(\text{Fe}_{0,8}\text{Co}_{0,2})_{11}$.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости исследования. Диссертационная работа А.А. Макуреновой «Структурные и магнитные свойства допированных редкоземельных интерметаллидов с высоким содержанием железа» отвечает требованиям, установленным в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание работы соответствует паспорту специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений» и критериям, определенным в пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям №5,6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Официальный оппонент:

кандидат технических наук

доцент кафедры физического материаловедения

ФГАОУ ВО Национальный исследовательский

технологический университет МИСИС

Горшенков М.В.

14.06.2023

Контактные данные:

тел.: 7(926)2810334, e-mail: mvg@misis.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

05.16.09 – Материаловедение (металлургия)

Адрес места работы:

119049, г. Москва, Ленинский пр-кт., д. 4, стр. 1,
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ МИСИС, кафедра физического материаловедения
Тел.: +7 (495) 955-00-32; e-mail: kancela@misis.ru

Подпись сотрудника
НИТУ МИСИС М.В. Горшенкова удостоверяю: