

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
ИВАНОВА Льва Александровича
на тему: «Особенности процессов намагничивания редкоземельных соединений на основе железа и их гидридов в сильных импульсных магнитных полях»,
по специальности 1.3.12. - Физика магнитных явлений

Диссертационная работа Л.А. Иванова посвящена исследованию процессов намагничивания и определению фундаментальных параметров, определяющих магнитные свойства редкоземельных интерметаллидов $R_2Fe_{14}B$ и их гидридов. **Актуальность** тематики определяется уникальными магнитными свойствами этих соединений – высокими значениями намагниченности насыщения, анизотропии и температуры Кюри. Интерметаллид $Nd_2Fe_{14}B$ на сегодня является базовым для производства постоянных магнитов с максимальной удельной магнитной энергией. Замещение неодима тяжелыми редкоземельными элементами в системах $(Nd_{1-x}R_x)_2Fe_{14}B$ ($R = Tb, Dy, Ho$) позволяет увеличить коэрцитивную силу и расширить температурный интервал работы постоянного магнита, а также получить магниты с нулевым температурным коэффициентом остаточной индукции. Кроме того, исследования представляют фундаментальный интерес для физики магнитных явлений, поскольку они углубляют представления о возможных способах управления обменными взаимодействиями и магнитной анизотропией в магнитном материале.

Диссертационная работа объемом 127 страниц состоит из введения, пяти глав, заключения, списка авторских публикаций по теме диссертации из 18 наименований и списка цитируемой литературы из 102 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель диссертации и задачи, положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведено краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе представлен литературный обзор по теме работы, в котором дано описание кристаллической структуры $R_2Fe_{14}B$ и их гидридов, приведены основные магнитные характеристики соединений, представлены современные методы получения сильных магнитных полей.

Вторая глава посвящена описанию методов, использованных для получения объектов исследования, экспериментального оборудования и методик исследования структуры и магнитных свойств. Подробно описаны установка для измерения намагниченности в сильных импульсных магнитных полях до 60 Тл (г. Дрезден, Германия) и уникальный генератор сверхсильных магнитных полей до 135 Тл (г. Гренобль, Франция), на которых диссертантом выполнялись эксперименты.

В главе 3 приведены результаты исследования структуры и магнитных свойств соединений $Ho_2Fe_{14}B$, $(Nd_{0.5}Ho_{0.5})_2Fe_{14}B$ и их гидридов. В магнитных полях до 135 Тл измерены кривые намагничивания, и из этих кривых экспериментально определены величины поля H_{c1} перехода ферримагнетика в неколлинеарную магнитную структуру и поля H_{c2} ферромагнитного насыщения, а также значения параметров междоузельного обменного взаимодействия. Проведено сравнение полученных значений параметров для $R_2Fe_{14}B-H$ с соответствующими значениями для системы $R_2Fe_{17}-H$.

В четвертой главе изучены магнитные свойства и структура быстрозакаленных сплавов $(Nd, Ho)-(Fe, Co)-B$ с близким к нулю температурным коэффициентом остаточной индукции, а также их гидридов. Показано, что гидрирование ослабляет междоузельное обменное взаимодействие. Установлено уменьшение удельной магнитной энергии после семилетнего хранения образца и после дополнительного отжига вследствие структурной релаксации.

В пятой главе исследованы структура и магнитные свойства соединений $(Nd_{1-x}Pr_x)_2Fe_{14}B$. Для составов с $x = 0.25$ и 0.5 удалось получить монокристаллические образцы и определить константы магнитной анизотропии при разных температурах. В быстрозакаленных сплавах обнаружено увеличение остаточной намагниченности по сравнению с теоретическим значением для ансамбля невзаимодействующих одноосных частиц.

Наиболее интересные результаты работы, на мой взгляд, связаны с высокополевыми измерениями кривых намагничивания ферримагнетиков. Они позволили впервые достоверно определить параметр междоузельного обменного взаимодействия в соединении $\text{Ho}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и оценить его изменение при замещениях в редкоземельной и железной подрешетках, а также при гидрировании. Эти результаты дополняют фундаментальные знания о магнитных параметрах, определяющих кривую намагничивания важного класса интерметаллидов с высоким содержанием железа. Кроме того, сведения о параметрах обменного взаимодействия и константах магнитной анизотропии могут быть использованы при разработке новых составов для постоянных магнитов с особыми физическими свойствами, что подтверждает **практическую значимость** диссертации.

Достоверность и научная новизна результатов обусловлены использованием хорошо аттестованных образцов, в том числе, монокристаллов, применением современных экспериментальных методик для исследования структуры и магнитных свойств, применением общеизвестных теоретических подходов и методов обработки результатов измерений, а также сравнением наблюдаемых закономерностей с данными, полученными из литературных источников. Диссертанту удалось провести измерения магнитных свойств образцов в крупных зарубежных научных центрах на хорошо аттестованном оборудовании в сильных и сверхсильных магнитных полях, что обеспечило высокое качество результатов работы. Полученные результаты исследований опубликованы в рецензируемых научных изданиях, в том числе, в индексируемых в Web of Science журналах первого квартиля. Результаты апробированы на российских и международных научных конференциях.

Диссертация написана грамотным научным языком, легко читается. Содержание автореферата полностью отражает основные положения диссертации.

При чтении диссертации возник ряд **замечаний и вопросов**, требующих разъяснения.

1. На рисунке 3.2.2 полевые зависимости намагниченности $\text{Ho}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и $\text{Ho}_2\text{Fe}_{14}\text{BH}_{5.5}$ в импульсных полях до 135 Тл нормированы на данные,

полученные в статических полях до 14 Тл, показанные кружками. Почему кривые намагничивания в малых полях не испытывают ферромагнитного насыщения, как это изображено, например, на рисунке 3.2.1 для тех же составов?

2. В главе 3 символом M_{Fe} обозначена намагниченность (магнитный момент) подрешетки Fe (14 атомов на формульную единицу), а M_{Ho} – магнитный момент одного атома Ho. Чтобы не путать читателей, было бы лучше в обоих случаях оперировать с одинаковыми параметрами: либо с магнитными моментами подрешеток, либо с атомными моментами.

3. В формуле 3.2.1 размерности первого и второго слагаемых различны. У первого слагаемого размерность в Теслах, а у второго – в магнетонах Бора. Вероятно, в члене, отвечающем за анизотропию, не должно быть параметра λ в знаменателе.

4. В разделах 4.2 и 4.3 исследованы структура и магнитные свойства быстрозакаленного сплава (Nd,Ho)-(Fe,Co)-B, подвергнутого интенсивной пластической деформации. Ни в тексте этой главы, ни в главе 2, описывающей методы приготовления образцов, ничего не говорится о методе деформирования.

5. На рисунке 5.3.5 приведены константы магнитокристаллической анизотропии K_1 и K_2 , определенные из кривых намагничивания с помощью метода Саксмита-Томсона для монокристаллов $(Nd_{0.5}Pr_{0.5})_2Fe_{14}B$ и $(Nd_{0.75}Pr_{0.25})_2Fe_{14}B$. При низкой температуре константа K_1 отрицательна, а K_2 положительна. Но как следует из работы [49] из списка литературы, наблюдаемый автором индуцированный магнитным полем фазовый переход первого рода (FOMP) из угловой магнитной фазы в насыщение может быть описан в терминах констант анизотропии только при учете отрицательной константы K_3 . Поэтому для константы анизотропии 4-го порядка лучше было бы использовать обозначение $K_2^{эфф}$, которая включает K_2 и K_3 .

Вместе с тем, указанные замечания никак не влияют на положительную оценку диссертационного исследования. Считаю, что диссертационная работа Иванова Льва Александровича соответствует паспорту специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений (по физико-математическим наукам) по пунктам: 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 внешних воздействий; 4. Исследование изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и магнитных свойств; отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с п.п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 №842), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Я, Мушников Николай Варфоломеевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, академик РАН, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук

Мушников Николай Варфоломеевич

20 ноября 2025 г.

Адрес места работы: 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

Тел.: +7 (343) 374-02-30; e-mail: mushnikov@imp.uran.ru

Подпись д.ф.-м.н. Н.В. Мушникова удостоверяю:

ученый секретарь ИФМ УрО РАН

И.Ю. Арапова

20.11.2025