

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Алексеева Игоря Викторовича «Влияние межзеренного обменного взаимодействия на формирование гистерезисных свойств нанокристаллических сплавов типа Nd-Fe-B», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – Физика магнитных явлений

Актуальность и перспектива использования результатов работы

Диссертационная работа Алексеева Игоря Викторовича направлена на изучение явления магнитного гистерезиса в нанокристаллических сплавах, содержащих значительное количество фазы типа $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. В таких сплавах обменное взаимодействие ферромагнитного типа между кристаллитами, обладающими высоким уровнем энергии магнитной кристаллической анизотропии, может влиять на явление магнитного гистерезиса. В работе также изучены нанокристаллические сплавы подобного типа, полученные по технологии жидкофазного спекания с легкоплавкой компонентой, значительное количество которой локализуется в виде прослоек между кристаллитами. В таких композитных сплавах энергию обменного взаимодействия между кристаллитами базового сплава Nd-Fe-B можно существенно уменьшить.

Явление межкристаллитного (межзеренного) обменного взаимодействия может использоваться для создания обменносвязанных нанокompозитов из магнитотвердой и магнитомягкой фаз. Из таких композиционных материалов можно получать постоянные магниты с увеличенным значением максимального энергетического произведения $(BH)_{\max}$ по сравнению с однофазным материалом. В то же время целенаправленное подавление межзеренного обменного взаимодействия позволяет увеличить коэрцитивную силу постоянных магнитов без добавления тяжелых редкоземельных металлов, которое приводит как к

уменьшению величины $(BH)_{\max}$ так и к повышению стоимости неодимовых постоянных магнитов. Помимо этого, межзеренное обменное взаимодействие может использоваться для стабилизации магнитной среды в магнитной записи, усиления магниторезистивного эффекта в островковых пленках, изменения степени поглощения электромагнитных волн в ферритовых порошках.

Широкий спектр применения явления межзеренного обменного взаимодействия делает диссертационную работу Алексеева И.В. актуальной с практической точки зрения. В настоящее время в литературе встречаются противоречивые данные о механизмах перемагничивания нанокристаллических сплавов типа Nd-Fe-B. Отчасти это связано с взаимодействием между зернами, которое усложняет процессы перемагничивания и их анализ. С этой точки зрения диссертация Алексеева И.В. имеет и фундаментальную ценность, так как дополняет существующий взгляд на процессы перемагничивания нанокристаллических сплавов с высокой энергией магнитной кристаллической анизотропии.

Структура и основное содержание диссертации

Диссертационная работа Алексеева И.В. состоит из введения и 5 глав, включающих обзор литературы, методы научного исследования и 3 оригинальные главы, в которых представлены результаты диссертационного исследования, заключение, список использованных обозначений и сокращений, список литературы. Общий объем работы составляет 138 страниц, включая 63 рисунка и 6 таблиц.

Во введении отражена актуальность исследуемой тематики, обозначены цели и задачи, поставленные автором, описана теоретическая и практическая значимость работы, кратко описаны основные методы исследований и сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации является литературным обзором по теме исследования. В ней представлены справочные сведения о хорошо

изученном интерметаллическом соединении $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, кратко описаны способы оценки межзеренного обменного взаимодействия и способы увеличения коэрцитивной силы.

Во второй главе описаны исследуемые магнитные нанокристаллические материалы, способы их получения и последующей обработки. В работе исследуются три специально приготовленных сплава: $\text{Nd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{14}\text{B}$ ($x = 0; 0,2; 0,5$), а также широко используемый коммерческий сплав MQP-B. В этой главе также содержится информация об используемых методиках исследования.

Основные оригинальные результаты представлены в главах 3, 4 и 5.

Третья глава содержит результаты исследования процессов перемангничивания сплавов, включая влияние начального магнитного состояния на процессы намагничивания и влияние концентрации кобальта на обменное взаимодействие между зернами. Эта глава содержит информацию об оптимальной термообработке сплавов, их структурной аттестация и об экспериментально определенных основных магнитных свойствах каждого сплава. Здесь изложены принципы получения размагниченого состояния образцов разными способами. Особое внимание уделено разумно выбранному протоколу проведения эксперимента, который позволяет получить кривые намагничивания и функции Келли $\delta M(H)$ для исследуемых образцов. Отмечу, что автор использовал достаточно хорошо аттестованные образцы в структурном отношении и провел весьма детальные исследования начальных кривых намагничивания и функций Келли $\delta M(H)$ для каждого из них. Эти исследования являются весьма трудоемкими, что, в частности, наглядно отражает рис.3.3 (стр.38), на котором приведены функции Келли и начальные кривые намагничивания в зависимости от количества циклов перемангничивания. Число таких циклов колеблется от 9 до 89.

Четвертая глава посвящена изучению межзеренного обменного взаимодействия в так называемых инфильтрованных сплавах типа Nd-Fe-B с ослабленным межзеренным обменным взаимодействием. В этой главе исследуются образцы смеси сплавов MQP-B с практически парамагнитной легкоплавкой добавкой сплава $\text{Nd}_{75}(\text{Cu}_{0,25}(\text{Fe}_{0,93}\text{Co}_{0,07})_{0,75})_{25}$. Полученные

результаты демонстрируют изменение микроструктуры, фазового и элементного состава, а также магнитных свойств сплавов на различных этапах инфильтрации. С помощью различных магнитометрических методик проанализировано изменение процессов перемангничивания и величины межзеренного обменного взаимодействия инфильтрованных сплавов.

Пятая глава посвящена оригинальному методу определения константы межзеренного обменного взаимодействия в нанокристаллических сплавах. Представленный метод основан на анализе необратимой магнитной восприимчивости при намагничивании и размагничивании. С помощью компьютерного моделирования произведен учет влияния величины межзеренного обменного взаимодействия, магнитостатического взаимодействия, ширины распределения размера зерен и размагничивающего фактора на соотношение максимального значения необратимой магнитной восприимчивости при намагничивании и размагничивании. Разработанный метод использован для определения константы межзеренного обменного взаимодействия в сплавах $\text{Nd}(\text{Fe}, \text{Co})\text{B}$, исследованных в 3 главе диссертационной работы.

Вопросы и замечания

1. Автор полагает, что используемые образцы для магнитных измерений представляют собой идеальный изотропный ансамбль кристаллитов. В работе нет экспериментального подтверждения изотропного состояния исследуемых образцов. На мой взгляд, кратко описанная технология приготовления образцов для магнитных измерений позволяет предполагать возможность формирования кристаллической текстуры. Вопрос: может ли предполагаемая особенность образца вносить заметный вклад в магнитные свойства и прежде всего, в остаточную намагниченность?
2. В главе 4 исследуются образцы, полученные, на мой взгляд, по технологии жидкофазного спекания в порошковой металлургии.

Почему автор не использует термин «жидкофазное спекание», а заменяет его термином «инфильтрация»?

3. В диссертации на стр.115 приведен результат: *«Из измерений магнитной вязкости сплава $Nd_2(Fe_{0,8}Co_{0,2})_{14}B$ [138] был определён активационный объем и соответствующий средний активационный размер, равный 12 нм.»*, требующий пояснений автора. В ссылке [138] (Alekseev, I. V., Volegov, A. S., & Andreev, S. V. (2019). Magnetic viscosity dependence of δM plots for a NdFeB-based alloy. In *AIP Conference Proceedings* (pp. 020080-020080) есть данные по магнитной вязкости, однако нет вычислений активационного объёма. Вопрос: как вычислялся активационный объем?
4. На мой взгляд, утверждение на стр.14: *«Впервые кристаллическая структура и вид элементарной ячейки $Nd_2Fe_{14}B$ (рисунок 1.2) были представлены в 1984 г. в работе [61]»* необходимо дополнить. Есть еще одна работа: «Givord, D., Li, H. S., & Moreau, J. M. (1984). Magnetic properties and crystal structure of $Nd_2Fe_{14}B$. *Solid State Communications*, 50(6), 497-499», которая опубликована также в 1984 г. В этой работе также приведены подробные данные о кристаллической структуре $Nd_2Fe_{14}B$. Полученные результаты в этих двух работах находятся в полном согласии. Если обратить внимание на точные даты поступления этих работ в редакцию, а также на даты их публикации, то следует признать, что приоритет в описании структуры $Nd_2Fe_{14}B$ принадлежит автором этих двух работ.
5. В диссертации присутствуют стилистические ошибки. Например, стр.34: *«Для измерения магнитных характеристик в постоянных магнитных полях быстрозакалённые сплавы в виде лент или сколы инфильтрованных сплавов приклеивались на шток, либо помещались в центр медных ампул и фиксировались тицеином. Магнитным моментом медной капсулы можно пренебречь ввиду его малого значения [87].»* Вопрос: какой держатель образца использовался в

работе? **медная ампула** или же **медная капсула**? Стр.38: «В данном случае **образец** также **имеет нулевую проекцию на ось**, вдоль которой измеряется магнитный момент.» Стр.101: «...где $m_r(H)$ и $m_d(H)$ – нормированные на **остаточную намагниченность насыщения** остаточные намагниченности.»

6. Замечание, касающиеся небрежного оформления рисунка 3.11 (стр.51) и использования представленных на нем результатов. Во-первых, на этом рисунке помещены **5** графиков и четыре из них обозначены как: **а, б, в** и **г**, а пятый не имеет обозначения. Во-вторых, подпись рисунка: «*Кривые намагничивания (а) и размагничивания (б), зависимости $\delta M(H)$ (с), графики измерения намагниченности (г) образца сплава $Nd_2(Fe_{0,8}Co_{0,2})_{14}B$ при разном времени задержки перед измерениями*» является незавершенной. В-третьих, четвёртому (г) и пятому (безымянному) графикам автор не уделяет никакого внимания. Вопрос: зачем эти графики, выполняющие роль декоративных картинок, помещены в рассматриваемую работу.

Общая оценка работы

Указанные выше замечания не оказывают влияния на общую положительную оценку диссертационной работы. Работа характеризуется высоким уровнем проведенных исследований, результаты диссертационного исследования охватывают фундаментальные, практические и теоретические аспекты изучения быстрозакаленных сплавов типа Nd-Fe-B. Результаты диссертационной работы прошли апробацию путем их представления на 8 научных конференциях всероссийского и международного уровня, а также путем опубликования трёх статей в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и индексируемых в международных базах данных WoS и Scopus. Диссертация имеет классическую структуру, написана научным языком и представляет собой законченную научно-исследовательскую работу,

которая соответствует принятым критериям **научной значимости, новизны и достоверности**. Автореферат адекватно отражает содержание, структуру и результаты диссертации.

Диссертация Алексеева И.В. соответствует паспорту специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений, сама работа по своему научному содержанию, значению и достоверности результатов полностью соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а её автор Алексеев Игорь Викторович, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент
Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
ведущий научный сотрудник
лаборатории перспективных магнитных
материалов, Федеральное
государственное бюджетное
учреждение науки Институт физики
металлов имени М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской
академии наук
«12» января 2026 г.



Королев Александр Васильевич

Контактная информация

620108, Российская Федерация, г. Екатеринбург,

Софьи Ковалевской, д. 18,

Тел.: +7 (343) 378-36-43,

E-mail: korolyov@imp.uran.ru



Королев А.В.
Закончил ИФМ УРО РАН
И.Ю. Арарова
«12» января 2026 г.