

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Савченко Александра Григорьевича «Закономерности формирования высококоэрцитивного состояния в микро- и нанокристаллических магнитотвёрдых материалах на основе сплавов системы Nd-Fe-B», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния»

Принято считать, что возникшая перед человечеством проблема энергообеспечения с минимальным ущербом для экологии может решаться за счет широкого использования возобновляемых источников энергии, а также увеличении внимания к повышению энергоэффективности процессов в реальном секторе экономики и в социальной сфере. Это вынуждает ведущие страны мира проводить обширные исследования в области разработки новых и дальнейшему повышению эффективности существующих энергосберегающих технологий. Магнитным материалам в решении этих проблем, например, при разработке высокоэффективных машин и устройств для генерации (ветрогенераторы, надводные, подводные и приливные электростанции) и преобразования электроэнергии (например, силовые установки всех видов электротранспорта), отводится одна из важнейших ролей. Доминирующим трендом здесь выступают поиск и разработка новых материалов для высокоэффективных постоянных магнитов, где ключевую позицию на текущий момент занимают магнитотвердые материалы на основе сплавов системы Nd-Fe-B (на базе уникальных по своим характеристикам высокоанизотропных интерметаллидов со структурой типа $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$).

В диссертационной работе Савченко А.Г. решаются важные фундаментальные и практически значимые задачи, возникающие при разработке новых композиций и технологий производства указанного класса магнитотвёрдых материалов, что подчеркивает **высокую актуальность** темы исследования.

Автор лично сам и руководимый им научный коллектив за примерно 30-летний период выполнили колоссальную работу по синтезу новых композиций соединений на основе фазы со структурой типа $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и сплавов на ее основе, исследованию их структуры, фазового состава, магнитных и некоторых других физико-химических свойств и апробации таковых в качестве магнитотвердых материалов с максимально достижимыми свойствами при соответствующих технических возможностях используемых технологий. По ее результатам опубликовано более 50 научных статей и тезисов докладов.. Кроме того, в своей работе А.Г. Савченко провёл обобщение, осмысление и упорядочение *«моря»*

информации по теме исследования, трансформировав его, в большинстве случаев, в непротиворечивое повествование – диссертацию, и представил её на суд научного сообщества.

Представленные в диссертационном исследовании проблемы и их решения позволяют заключить **об их важном вкладе** в фундаментальное понимание физической природы магнитных свойств рассмотренных в работе материалов, а также в решении материаловедческих и технологических задач производства магнитов на основе сплавов Nd-Fe-B. При этом, по моему мнению, автор оказался **абсолютным пионером** в его экспериментах по низкотемпературным отжигам спечённых магнитов и нахождению крайне неожиданных зависимостей коэрцитивной силы по намагниченности от температуры отжига $H_{ci}(T_{отж})$. Несмотря на их кажущуюся противоречивость, ему удалось адекватно разобраться в этом «хаосе» данных и, как кульминацию этой «разборки», построить и предложить научному сообществу метастабильную диаграмму состояний материала межзеренной фазы. С её помощью А.Г. Савченко удалось не только объяснить бимодальный характер экспериментально полученных упомянутых выше зависимостей $H_{ci}(T_{отж})$, но в процессах формирования высококоэрцитивного состояния в спечённых магнитах Nd-Fe-B выделить эффекты «магнитного» и «фазово-структурного» твердения, а также непротиворечиво объяснить «явление порчи-восстановления». Это яркое доказательство эвристичности его мыслительных способностей.

Кроме того, представленные в Главе 4 результаты являются итогом конкурентной битвы научной группы автора с таковыми в мире по получению и исследованию свойств *наноструктурированных* сплавов типа РЗМ-3d-металл-B в зависимости от состава, условий получения и обработки. В этой области, как и в случае микрокристаллических спечённых магнитов, в мире было выполнено множество работ, и весьма непросто сказать, кто и в чем был первым. Тем не менее, следует признать, что представленные в диссертационной работе А.Г. Савченко результаты по разнообразию составов, условиям и режимам их синтеза и обработок, уровню достигнутых магнитных гистерезисных свойств, их физической интерпретации – **соответствуют** мировому уровню. А в ряде случаев – **не имеют аналогов**.

С **практической** точки зрения, учитывая характер проблем, стоящих перед экономикой РФ, а именно, обеспечение импортозамещения и технологической безопасности, реальное возрождение редкоземельной промышленности и масштабирование производства РЗМ-содержащих магнитов для многих отраслей техники, требующее адекватного кадрового сопровождения, появление такой работы видится крайне **своевременным** и **актуальным** событием.

Автореферат диссертационной работы А.Г. Савченко написан хорошим научным языком и в полной мере отражает содержание выполненной автором диссертационной работы. Положения, изложенные в автореферате и диссертации, соответствуют паспорту специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

В то же время, по тексту автореферата имеются некоторые вопросы и замечания, что, однако, вполне ожидаемо для рукописей такого объёма.

1. Описание содержания Главы 1 изобилует конкретными данными по свойствам спечённых магнитов в зависимостях от режимов и условий их получения, что весьма ценно для практики. Вместе с тем, очень непросто уловить, как зависят свойства спечённых магнитов из какого-либо конкретного по составу сплава, «прогнозируемого» через все этапы обработки (измельчение, текстурирование, режимы спекания, низкотемпературные отжиги). Всякий раз при представлении данных по тому или иному этапу обработки «всплывают» новые по составу сплавы, что в какой-то мере затушевывает общую картину формирования финальных параметров спечённых магнитов. В этой связи было бы полезно все эти исследования продемонстрировать на примере одного сплава, например, «классического» состава ($\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$), результаты исследования влияния скорости охлаждения расплавов которого приведены в пп. 1.1.

2. Вероятно, из экономии места в тексте автореферата, схематично изложены принципы моделирования гистерезисных свойств магнитотвёрдых материалов, хотя этот аспект достаточно подробно описан в публикациях автора.

3. Выводов очень много, и они по своей глобальности не всегда равнозначны. В частности, на мой взгляд, вывод пп. 14 представляется излишне категоричным, – как показывают недавние исследования А.Н. Уржумцева, механизмы высококоэрцитивного состояния в таких объектах могут быть разные. В выводе пп. 18 приведены численные значения (например, отношение $\sigma_r/\sigma_{1.8}$ равно 0.74), которые представляются в определённой мере завышенными, поскольку методически получены в экспериментах с относительно низкими по напряжённости магнитных полях (≈ 18 кЭ), в сравнении с полем анизотропии магнитотвёрдой фазы ~ 70 кЭ), т.е. использованное значение удельной намагниченности насыщения $\sigma_{1.8}$ явно занижено.

4. В тексте автореферата присутствуют опечатки, орфографические и стилистические погрешности, однако их число статистически не превышает значений, характерных для рукописей такого объёма, и не оказывает влияния на восприятие сути излагаемого материала, не искажает смысла основных положений и выводов по работе.

Таким образом, приведенные выше замечания имеют преимущественно рекомендательный характер и не отражаются на общей положительной оценке

диссертационной работы. Цель и задачи работы, способы их решения, полученные результаты и выводы свидетельствуют о том, что диссертация А.Г. Савченко представляет собой законченную научно-квалификационную работу, а по своей сути вносит значительный вклад в решение важных научных и практических проблем очень актуального сегодня для нашей страны направления исследований в области физики конденсированного состояния и физики редкоземельных магнитотвердых материалов, в частности.

Диссертационная работа А.Г. Савченко «Закономерности формирования высококоэрцитивного состояния в микро- и нанокристаллических магнитотвёрдых материалах на основе сплавов системы Nd-Fe-B» соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемых к докторским диссертациям, а также всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС», и у меня нет ни каких сомнений в том, что её автор, Савченко Александр Григорьевич, **безусловно заслуживает** присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Заведующий отделом магнетизма твердых тел НИИ физики и прикладной математики Института естественных наук и математики Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), профессор кафедры магнетизма и магнитных наноматериалов УрФУ, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Кудреватых Николай Владимирович

11 июня 2024 г.

Согласен на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Савченко А.Г.

Адрес: Россия, 620000, Екатеринбург, пр. Ленина 51, НИИ ФПМ УрФУ
Телефон (рабочий): +7 (343) 389-97-06, +7 (343) 389-95-67
Адрес электронной почты: nikolai.kudrevatykh@urfu.ru

Подпись **Н.В. Кудреватых** удостоверяю.

ведущий документовед

(подразделение)

(подпись, печать)

11.06.2024/С.В. Жукова