

## ОТЗЫВ

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

Магнитотвёрдые материалы и постоянные магниты на основе сплавов системы Nd-Fe-B, как в микро-, так и в нанокристаллическом состоянии, обладающие до настоящего времени недостижимым для других магнитотвёрдых материалов уникальным сочетанием высоких магнитных свойств, эксплуатационных параметров и экономических характеристик, в настоящее время играют всё возрастающую роль в развитии высокотехнологичных секторов экономики, включая электротранспорт (наземный, водный и воздушный), авиационно-космическую технику, радиоэлектронную и оборонную промышленность, зелёную энергетику (приливные, надводные и т.п. электростанции, ветрогенераторы) и др.

В этой связи диссертационная работа А.Г.Савченко, посвящённая развитию научных основ физики металлов и физического материаловедения магнитотвёрдых материалов на основе сплавов систем РЗМ-Fe-B, включая установление влияния способов и режимов получения и легирования сплавов, теоретическое обоснование и экспериментальную апробацию принципов моделирования фазового состава и микроструктуры магнитотвёрдых материалов на основе сплавов системы Nd-Fe-B с улучшенными гистерезисными свойствами, а также установлению закономерностей формирования высококоэрцитивного состояния в микро- и нанокристаллических магнитотвёрдых материалах на основе указанных сплавов в зависимости от режимов получения и термообработки является безусловно **весьма актуальной**.

Не смотря на большое количество работ, посвящённых исследованию структуры и гистерезисных свойств микро- и нанокристаллических магнитотвёрдых материалов на основе сплавов системы Nd-Fe-B, о чём косвенно свидетельствует библиографический список диссертационной работы, включающий более 1000 наименований, детальное систематическое исследование, выполненное А.Г.Савченко с использованием различных экспериментальных методов, базирующихся на различных физических принципах, компьютерное моделирование процессов перемагничивания, а также микромагнитный анализ экспериментально полученных результатов, позволили А.Г.Савченко получить **новые знания** о фазово-структурных состояниях и магнитных гистерезисных свойствах микро- и нанокристаллических магнитотвёрдых материалов на основе сплавов системы Nd-Fe-B, а также закономерностях формирования в них высококоэрцитивного состояния.

В диссертационной работе получен целый ряд **новых результатов**, а именно:

(1) предложена гипотетическая метастабильная диаграмма системы Nd-Fe, которая соответствует обогащённой Nd зернограницной фазе в сплавах на основе системы Nd-Fe-B, позволившая 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» и бимодальный характер экспериментально полученных зависимостей  $H_{ci}$  спечённых Nd-Fe-B магнитов после низкотемпературных отжигов при разных температурах;

(2) показано, что применение регрессионных методов для анализа в рамках расширенного микромагнитного подхода экспериментально полученных зависимостей  $H_{ci}(T)$  спечённых магнитов из сплавов Nd-(Fe,Co)-B, легированных Al и Ti, позволяет выявить закономерности изменения микромагнитных параметров  $c_0$  и  $N_{eff}$  феноменологического уравнения  $H_{ci}(T) = c_0 H_n(T) - N_{eff} M_s(T)$  для магнитов разного состава, при этом впервые обнаружено, что параметры  $c_0$  и  $N_{eff}$  также зависят от температуры. Выявлено коррелированное изменение указанных параметров в зависимости от параметров технологического процесса получения магнитов;

(3) установлено, что высококоэрцитивное состояние в микрокристаллических магнитотвёрдых материалах с улучшенными гистерезисными свойствами (высокоэнергетических и высококоэрцитивных) контролируется процессом зарождения доменов обратной намагниченности;

(4) в результате *in situ* исследований магнитных гистерезисных свойств порошков быстрозакалённого сплава  $Nd_{9.0}Pr_{1.0}Zr_{0.6}Fe_{79.1}Co_{4.0}Al_{0.3}B_{6.0}$  установлено, что в интервале температур от комнатной до 250°C обменное взаимодействие между соседними зёрнами магнитотвёрдой, и магнитотвёрдой и магнитомягкой фаз определяет их высококоэрцитивное состояние. При этом одновременно реализуются оба механизма – и трудное зарождение, и закрепление доменных стенок на дефектах структуры, при этом механизм закрепления является доминирующим примерно до 150°C, а выше, примерно до 250°C, – основным становится механизм зарождения;

(5) установлены закономерности формирования высококоэрцитивного состояния, а также фазового состава и морфологии микроструктуры нанокристаллических магнитотвёрдых материалов на основе быстрозакалённых сплавов системы Nd-Fe-B застехиометрического, стехиометрического ( $Nd_2Fe_{14}B$ ), достехиометрического (обеднённых РЗМ по сравнению с  $Nd_2Fe_{14}B$  – наноккомпозиты типа  $Nd_2Fe_{14}B/\alpha-Fe$ ), а также с повышенным содержанием бора и пониженным содержанием неодима (наноккомпозиты типа  $Fe_3B/Nd_2Fe_{14}B$ ).

В качестве замечаний по автореферату можно отметить следующее:

- для более надёжного обоснования положительного влияния механоактивации на магнитные гистерезисные свойства быстрозакалённых порошков не достаёт проведения соответствующих исследований с использованием разных по составу быстрозакалённых



сплавов;

- из текста автореферата не совсем понятно, чем обусловлен выбор составов некоторых из исследованных сплавов в микро- и нанокристаллическом состояниях.

Сделанные замечания, однако, никак не влияют на общую высокую положительную оценку работы. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы, а сама диссертационная работа А.Г. Савченко представляется законченным научным исследованием, выполнена на высоком уровне, полученные результаты имеют несомненную научную новизну.

Считаю, что по актуальности, научной новизне, научной и практической значимости, уровню и достоверности полученных результатов, обоснованности их анализа, диссертационная работа А.Г. Савченко соответствует паспорту специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния», удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а также «Положения о порядке присуждения учёной степени в НИТУ МИСИС», а её автор, Савченко Александр Григорьевич, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Кандидат технических наук, главный технолог  
ООО «Полимагнит», Москва (группа компаний АМТ&С)  
СЕИН Виктор Александрович



17 июня 2024 г.

Я, Сеин Виктор Александрович, согласен на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Савченко А.Г.

Подпись В.А Сеина удостоверяю:

Коммерческий директор ООО «Полимагнит»

Т.Ю.Овсянкина

Адрес: 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Промышленная д. 4, стр. 3, этаж 2  
Телефон (рабочий): 8 (991) 282-96-29  
Адрес электронной почты: [ovsyankina@amtc.org](mailto:ovsyankina@amtc.org)