

## «УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Институт  
проблем технологии микроэлектроники и  
особочистых материалов РАН (ИПТМ РАН)

Член-корреспондент РАН

Д.В. Рошупкин

« 03 » июня 2024 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук на диссертационную работу 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

### Актуальность темы диссертационной работы

В экономически развитых странах мира исследования и разработки высокоэффективных магнитотвердых материалов, организация производства постоянных магнитов и магнитных систем на их основе рассматриваются в качестве стратегически важных и затрагивающих интересы экономической безопасности направлений, от которых зависят возможности выпуска широкого спектра высокотехнологичной и наукоемкой продукции. В последние годы отмечаются активные усилия ведущих зарубежных стран, направленные на обеспечение своей независимости от поставок из КНР редкоземельных металлов и редкоземельных постоянных магнитов. Эта деятельность мотивирована принятыми руководством Китая мерами по существенному сокращению и квотированию экспорта РЗМ и

редкоземельных постоянных магнитов, а также полному запрету с 2024 года экспорта технологий и оборудования для их производства. В современных условиях потребности отечественных предприятий в редкоземельных магнитах постоянно растёт, однако российские производители не могут удовлетворить её ни по объёмам, ни по номенклатуре. В частности, более 90 % магнитов из сплавов Nd-Fe-B ввозятся из Китая. В этой связи, создание условий для возрождения в Российской Федерации производства редкоземельных магнитов на современной научной, технологической и приборно-инструментальной базе, которая позволила бы обеспечить существующие критические потребности отечественных потребителей в магнитах этого типа, по меньшей мере, четырёх групп: (1) с повышенными энергетическими характеристиками (максимальное энергетическое произведение  $(BH)_{\max} = 360 - 440$  кДж/м<sup>3</sup>; (2) с повышенной коэрцитивной силой (коэрцитивная сила по намагниченности  $H_{ci}$  больше 2 МА/м, в том числе, работающих при температурах выше 200 °С; (3) экономно легированных, с пониженным содержанием или вообще не содержащих Nd и тяжёлые РЗМ (Dy, Tb); (4) работающих при криогенных температурах, представляется **очень актуальной задачей**. Как следствие, **актуальность темы** диссертационной работы Александра Григорьевича Савченко, направленной на создания научной базы, теоретических и экспериментальных основ и принципов разработки оптимальных композиций и эффективных методов получения микро- и нанокристаллических магнитотвердых материалов (далее – МТМ) основе сплавов системы Nd-Fe-B, базирующихся на установленных закономерностях формирования в них высококоэрцитивного состояния (далее – ВКС), **несомненна**. Достижение положительных результатов в этом направлении исследований вносит существенный вклад в фундаментальное понимание природы ВКС в микрокристаллических высокоэнергетических и высококоэрцитивных спечённых магнитах, а также в нанокристаллических МТМ на основе сплавов системы Nd-Fe-B разного состава, полученных методами быстрой закалки расплавов сплавов, в установление взаимосвязи «химический состав – технология получения – фазово-структурное состояние – свойства» МТМ. Полученные в работе результаты могут стать научной основой эффективных технологических решений и разработки композиций микрокристаллических спечённых магнитов посредством реализации зернограничного структурирования для повышения свойств магнитов при ресурсосберегающем потреблении тяжёлых РЗМ, а также разработки композиций и

режимов быстрой закалки расплавов, кристаллизационных отжигов и/или механоактивации порошков нанокристаллических МТМ на основе сплавов систем R-Fe-B, где R – РЗМ, Dd, ММ или их смеси, которые возможно осуществить на оборудовании существующих в Российской Федерации или планируемых к созданию производственных предприятиях.

В разделе об актуальности также сформулирована цель и задачи, решаемые для её достижения.

### **Структура и объём диссертационной работы**

Диссертация состоит из расширенного введения, четырёх глав с изложением необходимых аналитических и оригинальных результатов, основных выводов, списка цитируемой литературы и приложений. В конце каждой главы приводится заключение по её основным результатам. Диссертация изложена на 606 страницах машинописного текста и содержит 222 рисунка, 58 таблиц, 3 приложения на 47 страницах. Список цитируемой литературы содержит 1169 наименований.

### **Анализ содержания работы и основных положений, выносимых на защиту**

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации и показана степень её разработанности, сформулированы цель и задачи работы, определены научная новизна, описываются научная и практическая значимость работы, методология и методы исследования, а также приводятся положения, выносимые на защиту, и сведения, подтверждающие достоверность положений, выводов и рекомендаций диссертации. Приведены сведения об апробации работы и количестве публикаций по теме работы. Дан краткий обзор структуры и объёма диссертационной работы.

В первой главе приведены результаты выполненных исследований по установлению закономерностей формирования ВКС, влияния на фазовый состав, морфологию микроструктуры и магнитные гистерезисные свойства микрокристаллических спечённых магнитов на основе сплавов систем R-Fe-B, где R – РЗМ, дидим (Dd), мишметалл (ММ) или их смеси, их химического состава, режимов и ключевых параметров основных этапов традиционной порошковой технологии: получение сплавов методом вакуумной индукционной плавки; водородное охрупчивание сплавов; дробление, измельчение и тонкий помол сплавов; компактирование порошков в магнитном поле; спекание пресс-заготовок

магнитов; заключительная термообработка (отжиг) спечённых магнитов, а также их анализ и сопоставление с аналогичными результатами, полученными другими авторами.

Во второй главе приведены результаты выполненных исследований по установлению закономерностей влияния частичного или полного замещения Nd в сплавах Nd-Fe-B на лёгкие РЗМ (Ce, Pr), Dd, MM или их смеси, легирования сплавов Nd-Fe-B тяжёлыми РЗМ (Dy, Tb), а также легирования сплавов Nd-Fe-B Al, Ga, Sc, Ti, Mo и Nb, как традиционным методом порошковой металлургии (в процессе выплавки сплавов), так и «методом смесей», на магнитные гистерезисные свойства и формирование ВКС в соответствующих спечённых магнитах. Полученные данные анализируются с учётом имеющихся в литературе сведений о влиянии частичного замещения Nd и/или Fe на фундаментальные магнитные характеристики магнитотвёрдого интерметаллида  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , а также на фазовый состав и структуру спечённых магнитов Nd-Fe-B.

В третьей главе обсуждаются существующие проблемы повышения максимального энергетического произведения  $(BH)_{\text{max}}$  высокоэнергетических и высококоэрцитивных магнитов из сплавов Nd-Fe-B и возможные пути их решения. Предложена и обосновывается система принципов, положенных в основу моделирования химического и фазового состава, структуры МТМ на основе сплавов системы Nd-Fe-B с улучшенными гистерезисными свойствами (высокоэнергетических или высококоэрцитивных), а также возможный способ («метод смесей») и примеры практической реализации результатов моделирования МТМ на основе указанных принципов. Приведены результаты детальных исследований закономерностей влияния различных режимов низкотемпературного отжига на гистерезисные свойства магнитов на основе сплавов системы Nd-Fe-B, полученных методом смесей, а также процессов намагничивания и перемагничивания магнитов на основе сплавов системы Nd-Fe-B с различным уровнем гистерезисных свойств.

В четвёртой главе приведены результаты исследований по установлению закономерностей влияния на фазовый состав, морфологию микроструктуры и магнитные гистерезисные свойства нанокристаллических МТМ на основе сплавов систем R-Fe-B их химического состава, режимов получения и обработки. В том числе, проведена систематизация нанокристаллических материалов по атомному содержанию бора, обсуждаются известные микромагнитные модели формирования

ВКС и магнитных гистерезисных свойств в нанокристаллических композитах  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/(\alpha\text{-Fe}, \text{Fe}_3\text{B})$ . Приведены результаты исследований магнитных гистерезисных свойств при комнатной и повышенных температурах наноструктурированных МТМ разных групп: (1) на основе быстрозакалённых сплавов  $\text{Nd-Fe-B}$  застехиометрического состава (высоконеодимовых), (2) магнитотвёрдых нанокомпозитов типа  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ , – на основе достехиометрических быстрозакалённых сплавов  $\text{Nd-Fe-B}$ , (3) магнитотвёрдых нанокомпозитов типа  $\text{Fe}_3\text{B}/\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , – на основе низконеодимовых, с высоким содержанием бора, быстрозакалённых сплавов  $\text{Nd-Fe-B}$ .

В Заключении приведены выводы по работе, описаны перспективы и даны рекомендации для дальнейшей разработки темы.

**На защиту автор выносит** десять научных положений, обоснованных в диссертационной работе в главах с первой по четвёртую.

В первом научном положении для микрокристаллических МТМ предложена модель идеальной микроструктуры, системы легирования (два типа сплавов-добавок), а также способ их реализации на практике («метод смесей»), которые обеспечивают получение спечённых магнитов на основе сплавов системы  $\text{Nd-Fe-B}$  с улучшенными гистерезисными свойствами.

Во втором научном положении постулируется, что в спечённых магнитах на основе сплавов системы  $\text{Nd-Fe-B}$ , полученных «методом смесей», сосуществуют два механизма формирования ВКС и гистерезисных свойств, – механизмы «магнитного» и «фазово-структурного» твердения.

В третьем научном положении рассматривается и обосновывается предположение о том, что в основе механизма «фазово-структурного твердения» лежат превращения в обогащенной Nd зернограничной фазе, которые протекают в соответствии с предложенной гипотетической метастабильной диаграммой состояния системы  $\text{Nd-Fe}$ , и что именно они ответственны за сложное поведение коэрцитивной силы по намагниченности спечённых магнитов  $\text{Nd-Fe-B}$  после низкотемпературных отжигов, а также её обратимость (эффект «порчи-восстановления»).

В четвёртом научном положении представлено заключение о том, что ВКС в микрокристаллических МТМ с улучшенными гистерезисными свойствами (высокоэнергетических и высококоэрцитивных) контролируется процессом

зарождения доменов обратной намагниченности.

В пятом научном положении на основе результатов систематических исследований делается вывод, что фазовый состав, морфология микроструктуры и магнитные гистерезисные свойства спечённых магнитов на основе сплавов систем R-Fe-B (где R – РЗМ, Dd, MM или их смеси) зависят от их химического состава, длительности и условий мокрого помола, напряжённости текстурирующего магнитного поля, температур спекания пресс-заготовок и отжига спечённых магнитов, легирования или полного замещения Nd на лёгкие РЗМ (Ce, Pr), Dd, MM или их смеси, легирования сплавов Nd-Fe-B тяжёлыми РЗМ (Dy, Tb), частичного замещения Fe на Al, Ga, Sc, Ti, Mo или Nb, а также от содержания кислорода в сплавах.

В шестом научном положении рассматривается то, как содержание бора и неодима, а также различных легирующих элементов (Co, Ga, Zr, Ti, Al) влияют на склонность к аморфизации и кинетику кристаллизации застехиометрических быстрозакалённых сплавов Nd-Fe-B (обогащённых РЗМ по сравнению со стехиометрией интерметаллида  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ).

В седьмом научном положении рассматривается влияние замещений 0.5 ат. % Fe атомами Al, Co, Cr, Cu, Mo, Ti, V или Zr в достехиометрическом сплаве  $\text{Nd}_{9.5}\text{Fe}_{84.5}\text{B}_6$  (обеднён РЗМ по сравнению со стехиометрией интерметаллида  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ) на характер его кристаллизации из аморфного состояния, в результате которого установлено, что кристаллизация быстрозакалённых сплавов  $\text{Nd}_{9.5}\text{Fe}_{84}\text{B}_6\text{M}_{0.5}$ , где M = Fe, Ti или Cu, имеет одностадийный характер, сплава  $\text{Nd}_{9.5}\text{Fe}_{84}\text{B}_6\text{Mo}_{0.5}$  – двухстадийный характер, а сплавов  $\text{Nd}_{9.5}\text{Fe}_{84}\text{B}_6\text{M}_{0.5}$ , где M = Zr или Cr, – трёхстадийный характер.

В восьмом научном положении определяется, что ВКС порошков быстрозакалённого сплава  $\text{Nd}_{9.0}\text{Pr}_{1.0}\text{Zr}_{0.6}\text{Fe}_{79.1}\text{Co}_{4.0}\text{Al}_{0.3}\text{B}_{6.0}$  в интервале температур от комнатной до 250 °C формируется в результате обменного взаимодействия между соседними зёрнами магнитотвёрдой фазы, и магнитотвёрдой и магнитомягкой фаз, при этом одновременно реализуются оба механизма: сильное закрепление доменных стенок (является доминирующим примерно до 150 °C) и трудное зарождение доменов обратной намагниченности (доминирует при температурах выше 150 °C). Выше 250 °C порошки перестают проявлять анизотропию магнитных свойств.

В девятом научном положении рассматриваются впервые построенные

диаграммы «температура обработки – фазовый состав – магнитные гистерезисные свойства», которые позволили выявить для быстрозакалённого сплава  $\text{Nd}_{10.4}\text{Zr}_{4.0}\text{Fe}_{75.1}\text{Co}_{4.1}\text{B}_{6.4}$  количественные корреляции между магнитными гистерезисными свойствами и фазовым составом и микроструктурой порошков сплавов, а также обнаружить протекание при температурах отжига выше  $580^\circ\text{C}$  твердофазной реакции  $(\text{Nd,Zr})_2(\text{Fe,Co})_{14}\text{B} \rightarrow \text{Nd}_2(\text{Fe,Co})_{17} + \alpha\text{-(Fe,Co)} + \text{ZrB}$ .

В десятом научном положении в результате анализа диаграмм «длительность отжига – температура отжига» аморфного сплава  $\text{Nd}_4\text{Fe}_{78}\text{B}_{18}$  после кристаллизационных отжигов в интервале температур  $560 - 800^\circ\text{C}$  длительностью  $5 - 40$  мин установлено существование двух областей (низко- и высокотемпературной), в пределах которых формируется высококоэрцитивное обменно-связное состояние.

**Научную новизну** диссертационной работы Александра Григорьевича Савченко можно сформулировать следующим образом.

1. Сформулированы и обоснованы ключевые принципы, обеспечивающие выбор оптимального состава микрокристаллических МТМ на основе сплавов системы  $\text{Nd-Fe-B}$  с улучшенными гистерезисными свойствами, предложена модель идеальной микроструктуры спечённых магнитов  $\text{Nd-Fe-B}$ , удовлетворяющая этим требованиям, а также композиции сплавов-добавок и способ практической реализации указанных принципов для получения идеальной микроструктуры, – «метод смесей».

2. Предложена гипотетическая метастабильная диаграмма системы  $\text{Nd-Fe}$  и схема фазовых превращений в сплавах  $\text{Nd-Fe}$ , позволившая при анализе процессов формирования ВКС в спечённых магнитах  $\text{Nd-Fe-B}$  разделить эффекты «магнитного» и «фазово-структурного» твердения, а также непротиворечиво объяснить явление «порчи-восстановления» и сложное немонотонное поведение коэрцитивной силы по намагниченности магнитов  $\text{Nd-Fe-B}$  после низкотемпературных отжигов при разных температурах и по разным режимам.

3. Впервые построены и проанализированы диаграммы «температура обработки – фазовый состав – магнитные гистерезисные свойства» быстрозакалённого сплава  $\text{Nd}_{10.4}\text{Zr}_{4.0}\text{Fe}_{75.1}\text{Co}_{4.1}\text{B}_{6.4}$  после кристаллизационных отжигов разной длительности, позволившие выявить корреляции между магнитными гистерезисными свойствами и фазовым составом и микроструктурой сплавов, а также обнаружить протекание при температурах отжига выше  $580^\circ\text{C}$

твердофазной реакции  $(\text{Nd,Zr})_2(\text{Fe,Co})_{14}\text{B} \rightarrow \text{Nd}_2(\text{Fe,Co})_{17} + \alpha\text{-(Fe,Co)} + \text{ZrB}$ , – о существовании такого рода превращения (образования значительного количества магнитомягкой фазы  $\text{Nd}_2(\text{Fe,Co})_{17}$ ) в спечённых магнитах ранее не сообщалось.

4. Установлено, что в интервале температур от комнатной до  $250^\circ\text{C}$  обменное взаимодействие между соседними зёрнами магнитотвёрдой фазы, и магнитотвёрдой и магнитомягкой фаз определяет их ВКС, при этом одновременно реализуются оба механизма формирования ВКС: трудное зарождение, и сильное закрепление доменных стенок на дефектах структуры. Механизм закрепления является доминирующим примерно до  $150^\circ\text{C}$ , а выше – основным становится механизм зарождения, при этом, при температурах выше  $250^\circ\text{C}$  порошки перестают проявлять анизотропию магнитных свойств.

5. В результате детальных исследований влияния кристаллизационных отжигов аморфных порошков сплава  $\text{Nd}_4\text{Fe}_{78}\text{B}_{18}$  в интервале температур  $560 - 800^\circ\text{C}$  в течение  $5 - 40$  мин на их магнитные гистерезисные свойства, установлено, что, в зависимости от температуры кристаллизации, фазовые превращения в аморфных лентах  $\text{Nd}_4\text{Fe}_{78}\text{B}_{18}$  могут протекать либо в две стадии: (1) аморфная фаза (далее – Am)  $\rightarrow \text{Am}' + \text{Fe}_3\text{B}$ , (2)  $\text{Am}' \rightarrow \text{Fe}_3\text{B} + \text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , либо в три стадии: (1)  $\text{Am} \rightarrow \text{Am}' + \text{Fe}_3\text{B}$ , (2)  $\text{Am}' \rightarrow \text{Am}'' + \text{Fe}_3\text{B} + \text{Nd}_2\text{Fe}_{23}\text{B}_3$ , (3)  $\text{Am}'' + \text{Nd}_2\text{Fe}_{23}\text{B}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{B} + \text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , а на диаграмме «длительность ( $\tau_{\text{отж}}$ ) – температура ( $T_{\text{отж}}$ ) отжига» присутствуют две области, в которых формируется обменно-связное состояние: низкотемпературная ( $T_{\text{отж,ср}} \approx 580^\circ\text{C}$ ) и высокотемпературная ( $T_{\text{отж,ср}} \approx 680^\circ\text{C}$ ).

6. Аналитически выявлена положительная корреляция в изменении величин микромагнитных параметров  $c_0$  и  $N_{\text{eff}}$  в феноменологическом уравнении «модели зарождения» доменов обратной намагниченности  $H_{\text{ci}}(T) = c_0 H_n(T) - N_{\text{eff}} M_s(T)$ , где  $M_s$  – намагниченность насыщения,  $H_{\text{ci}}$  – коэрцитивная сила по намагниченности.  $T$  – температура,  $H_n$  – минимальное поле зарождения доменов обратной намагниченности.

7. Моделированием показано, что замещение Nd на Pr в соединении  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , во-первых, приводит к уменьшению отрицательного влияния низкотемпературного спин-переориентационного фазового перехода на величину остаточной индукции соединения  $(\text{Nd}_{1-x}\text{Pr}_x)_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , при этом начало «раскрытия» конуса векторов намагниченности смещается в сторону более низких температур и при  $x = 0.75$  угол «раскрытия»  $\theta_k$  становится равным нулю, во-вторых, способствует повышению

прямоугольности кривой размагничивания и, в-третьих, не оказывает заметного влияния на величину  $H_{ci}$ , смещая её максимум по мере увеличения  $x$  в область более низких температур.

Полученные в работе результаты безусловно содержат новые научные знания и вносят существенный вклад в фундаментальное понимание природы и закономерностей формирования ВКС в микро- и нанокристаллических МТМ на основе сплавов системы Nd-Fe-B в зависимости от их химического состава, режимов получения и обработки.

К числу наиболее интересных и **научно и практически значимых** результатов диссертационной работы Савченко Александра Григорьевича следует отнести следующие.

1. Предложены и апробированы на практике способ и требования, предъявляемые к системам легирования сплавов Nd-Fe-B (составу сплавов-добавок), положенные в основу моделирования морфологии межзёренной фазы и «декорирования» поверхности зёрен магнитотвёрдой фазы. При этом предполагается, что такой подход может быть использован при разработке других микро- и наноструктурированных композиционных материалов с особыми физическими свойствами (например, новых высокоэффективных сверхпроводящих, резистивных, фотовольтаических, термо-, магнито- и пьезоэлектрических материалов, мультиферроиков), достигаемыми в результате формирования структур типа «ядро-оболочка», когда зёрна матричной фазы разделены прослойкой контролируемой толщины и состава с наперёд заданными свойствами.

2. Установлено, что анализ кривых Хенкеля ( $\delta M(H)$ -кривых), при соответствующем учёте особенностей и различий процессов намагничивания и перемагничивания магнитов, состоящих из многодоменных зёрен, может быть эффективно использован для оценки влияния на магнитные гистерезисные свойства спечённых магнитов Nd-Fe-B их фазового состава, микроструктуры и характера микроскопических взаимодействий.

3. Показано, что совместный анализ температурных зависимостей коэрцитивной силы с использованием микромагнитных моделей закрепления и зарождения доменов обратной намагниченности, а также техники  $\delta M(H)$ -кривых могут быть эффективно использованы для изучения процессов перемагничивания и определения лимитирующих механизмов формирования ВКС в быстрозакалённых

сплавах Nd-Fe-B.

4. Установлены закономерности влияния на магнитные гистерезисные свойства спечённых магнитов из сплавов Nd-Fe-B: длительности мокрого помола; напряжённости текстурирующего магнитного поля и плотности пресс-заготовок магнитов; режимов, температуры и длительности спекания пресс-заготовок магнитов; режимов, температуры и длительности низкотемпературного отжига; частичного или полного замещения Nd в сплавах Nd-Fe-B на Pr, Dd, MM или их смеси; легирования сплавов Nd-Fe-B тяжёлыми РЗМ (Dy, Tb), Al, Ga, Sc, Ti, Mo и Nb; содержания в них кислорода.

5. Установлены закономерности влияния: легирования сплавов Nd-Fe-B на коррозионную стойкость порошков и пресс-заготовок магнитов в процессе их экспозиции на воздухе; типа жидкости, используемой в качестве среды измельчения, на морфологию и свойства порошков; содержания B и Nd, а также различных легирующих элементов (Co, Ga, Zr, Ti, Al) на склонность к аморфизации, кинетику кристаллизации, фазовый состав, структуру и магнитные гистерезисные свойства застехиометрических быстрозакалённых сплавов Nd-Fe-B; замещения Fe атомами Al, Co, Cr, Cu, Mo, Ti, V или Zr в достехиометрическом сплаве  $\text{Nd}_{9,5}\text{Fe}_{84,5}\text{B}_6$  на фазовый состав соответствующих литых сплавов, а также на многостадийный характер их кристаллизации из перезакалённого состояния и  $H_{ci}$  быстрозакалённых порошков после отжига; отжигов разной длительности на фазово-структурное состояние и гистерезисные свойства порошков быстрозакалённых сплава  $\text{Nd}_{10,4}\text{Zr}_{4,0}\text{Fe}_{75,1}\text{Co}_{4,1}\text{B}_{6,4}$ , в том числе впервые построенные и проанализированные диаграммы «температура обработки – фазовый состав – магнитные гистерезисные свойства».

6. Данные по влиянию различных систем легирования на гистерезисные свойства МТМ на основе сплавов систем R-Fe-B, где R – РЗМ, Dd, MM или их смеси, получаемых «методом смесей», могут быть использованы при получении спечённых с улучшенными гистерезисными характеристиками (высокоэнергетических или высококоэрцитивных) для повышения эксплуатационных характеристик существующих, а также разработки новых, в том числе инновационных изделий и систем с постоянными магнитами на их основе.

**Соответствие диссертационной работы критериям, предъявляемым к диссертациям**

Диссертационная работа Савченко Александра Григорьевича на соискание ученой степени доктора наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. В диссертационной работе содержится решение целого ряда научных задач, имеющих важное значение для развития соответствующих разделов физики конденсированного состояния, включая физику магнетизма микро- и нанокристаллических сплавов РЗМ с переходными металлами группы железа, а также физического материаловедения редкоземельных МТМ. Изложены новые научно обоснованные технологические решения, внедрение которых может внести значительный вклад в развитие отрасли редкоземельных магнитов в Российской Федерации, включая создание необходимых условий для импортозамещения и обеспечение технологической безопасности страны. В частности, полученные результаты могут служить научным основанием разработки новых композиций, эффективных технологических решений и режимов получения микрокристаллических спечённых магнитов посредством реализации зернограницного структурирования для повышения свойств магнитов при ресурсосберегающем потреблении тяжёлых РЗМ, а также разработки композиций и режимов быстрой закалки расплавов, кристаллизационных отжигов и/или механоактивации порошков нанокристаллических МТМ на основе сплавов систем R-Fe-B, где R – РЗМ, Dd, MM или их смеси.

Материалы диссертации обладают внутренним единством, изложены логично и корректно. Достоверность результатов работы не вызывает сомнений и обеспечивается их воспроизводимостью при выполнении экспериментов, проведением исследований на современном оборудовании, функционирование которого основано на различных физических принципах, взаимодополняющих друг друга, применением проверенных, признанных мировым научным сообществом методик исследования и диагностики материалов. Результаты работы, научные положения, включая выносимые на защиту, обладают научной новизной, в достаточной степени аргументированы и обоснованы автором, а также оценены сопоставлением с известными литературными данными, свидетельством чего является представленный в диссертационной работе библиографический список, включающий 1169 наименований.

## **Рекомендации по использованию результатов, выводов и рекомендаций, приведённых в диссертационной работе**

В диссертационной работе Александра Григорьевича Савченко получен ряд новых результатов, которые могут представлять значительный интерес для специалистов и организаций, деятельность которых связана с изучением и разработкой МТМ на основе сплавов РЗМ с переходными металлами группы железа, а также разработкой технологий и производством редкоземельных постоянных магнитов. Такими организациями могут быть, например, ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова, МГУ им. М.В. Ломоносова, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, НИЦ «Курчатовской институт» – ВИАМ, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара, МГТУ им. Н.Э. Баумана, АО «НПП «Исток» им. Шокина» (г. Фрязино), ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина, АО «ВНИИХТ им. Б.Н. Ласкорина», ООО «Русатом МеталлТех», ООО «ЭРГА», ООО «Полимагнит», ООО «Перспективные материалы», ООО «НПК «Магниты и магнитные системы», ООО «ПОЗ-Прогресс» (г. Верхняя Пышма), АО «Уральский электромеханический завод» (г. Екатеринбург), НПП «Неомаг» (г. Екатеринбург) и др.

## **Публикации и апробация результатов диссертационной работы**

По теме диссертации опубликовано более 50 работ, в том числе 48 в журналах, рекомендованных ВАК, а также входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus, получено 3 патента. Материалы диссертационной работы представлялись на более чем 80 российских и международных научных конференциях.

## **Замечания по работе:**

По диссертационной работе имеется несколько замечаний.

1. В тексте диссертации не приводится описание используемых методик. В частности, используется и неоднократно упоминается ИПДК - интенсивная пластическая деформация кручением, как это следует из списка Принятых сокращений и обозначений. Что из себя представляет ИПДК, в тексте Диссертации не описано.

2. На стр. 55-56, 65-68, 423-426 и 429 приведены результаты исследований и обсуждается влияние на магнитные гистерезисные свойства порошков сплавов Nd-Fe-B помольных или промывочных жидкостей, при этом ничего не говорится о

чистоте этих жидкостей, а также о возможном влиянии типичных для этих жидкостей примесей на магнитные свойства порошков после помолов.

3. Стр. 420. «Порошки БЗ сплава  $\text{Nd}_{9,6}\text{Fe}_{80,3}\text{Zr}_{3,7}\text{B}_{6,4}$  смешивали с гептаном и олеиновой кислотой и подвергали высокоэнергетическому измельчению». Не указано в каком соотношении использовались жидкости. Непонятна роль олеиновой кислоты при высокоэнергетичном измельчении.

4. Очевидно, в силу большого объема, диссертация содержит опечатки, орфографические и стилистические погрешности, например: стр. 81 – не понятно, что означает стрелка на Рис. 1.38 (а); стр. 181 – нет ссылки на Рис. 2.18 (б); на стр. 245 ссылки [28,34,35] приведены другим кеглем; на ст. 277 нет номера страницы; на стр. 305 опечатка в ссылке на рис. 3.28(7); на стр. 450 использован другой шрифт; на стр. 586 в подписи к Рис. А3 при перечислении элементов в качестве разделителя использованы точки, а не запятые; нет ссылки на Приложение В. Однако количество таких погрешностей не является критическим и не оказывает влияния на сущностное понимание работы.

В конечном итоге, отмеченные замечания носят, в основном, уточняющий характер, не ставят под сомнение основные выводы и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. В целом диссертационная работа, представленная Александром Григорьевичем Савченко, заслуживает высокой оценки. Результаты работы имеют значительную научную и практическую ценность. По тематике, актуальности, научной новизне, практической значимости и достоверности сформулированных выводов диссертация **соответствует** паспорту специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Автореферат полностью отражает содержание представленной диссертации.

### **Заключение по диссертационной работе**

По объёму и уровню исследований, полученным научным результатам, их анализу и интерпретации, научной новизне, научной и практической ценности, диссертационная работа Александра Григорьевича Савченко на тему «Закономерности формирования высококоэрцитивного состояния в микро- и нанокристаллических магнитотвёрдых материалах на основе сплавов системы Nd-Fe-B» является законченной научно-исследовательской работой и по совокупности разработанных положений, выводов и рекомендаций полностью **соответствует** всем

требованиям раздела 2 «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС», предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Савченко Александр Григорьевич, безусловно, **заслуживает** присвоения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа А.Г. Савченко была рассмотрена и получила положительную оценку на совместном научном семинаре «Материаловедение и Технология» и «Физический» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук 23 мая 2024 г., протокол № 04.

#### Отзыв составили

Зам. директора по научной работе  
доктор физико-математических наук  
Старший научный сотрудник  
кандидат физико-математических наук

  
В.И. Николайчик  
  
И.В. Маликов

Тел.: +7 (49652) 44208  
Эл. почта: nikola@iptm.ru

Подписи В.И. Николайчика и И.В. Маликова заверяю:

Ученый секретарь ИПТМ РАН  
кандидат физико-математических наук





О.В. Феклисова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН)

Адрес: 142432, г. Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д. 6  
Тел. +7 (49652) 44060; телефакс: +7 (49652) 44225  
E-mail: general@iptm.ru