

Шитов Александр Владимирович

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И МИКРОСТРУКТУРА СПЕЧЕННЫХ
МАГНИТОВ (Nd,Dy)-(Fe,Co)-В

1.3.12. Физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН)

Научный руководитель: **Головня Оксана Александровна,**
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории перспективных магнитных материалов ФГБУН Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Официальные оппоненты: **Таскаев Сергей Валерьевич,**
доктор физико-математических наук, доцент, ректор ФГБОУ ВО «Челябинский Государственный университет», г. Челябинск;

Костюченко Надежда Викторовна,
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики магнитных гетероструктур и спинтроники для энергосберегающих информационных технологий Центра фотоники и двумерных материалов ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», г. Долгопрудный, Московская область.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»», г. Москва.

Защита состоится 6 июня 2025 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.1.133.01 на базе ИФМ УрО РАН по адресу: 620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ УрО РАН, а также на официальном сайте ИФМ УрО РАН <https://www.imp.uran.ru>.

Автореферат разослан _____ 2025 года

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник

Чарикова Т.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Магниты на основе соединения $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ имеют рекордные значения максимального энергетического произведения $(BH)_{\text{max}}$ до 59.5 МГс·Э (474 кДж/м³) [1], что позволяет использовать их, например, в гибридных автомобилях и электромобилях, электротранспорте и ветроэнергетике. При этом низкие значения коэрцитивной силы по намагниченности (H_{cJ}) ограничивают круг их применения. Значение H_{cJ} в магните зависит от значений поля анизотропии (H_{A}) соединения $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, а также от микроструктуры магнита. H_{A} является фундаментальным свойством вещества, его повышают за счет замещения Nd на тяжелые редкоземельные элементы Dy и Tb [2]. Для модификации микроструктуры магнита исходный сплав дополнительно легируют, например, Cu и Ga [3].

Легирующие исходного сплава тяжелыми редкоземельными элементами приводит к снижению значений остаточной индукции (B_{r}) магнитов [4]. Предложенный в [5] метод диффузии тяжелых редкоземельных элементов по границам зерен позволяет избежать снижения B_{r} . При таком способе диффузии атомы тяжелых редкоземельных элементов не попадают в основное зерно $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$.

Микроструктура исходного сплава оказывает существенное влияние на микроструктуру магнитов и, соответственно, на формирование основных магнитных характеристик магнитов, в частности, H_{cJ} и B_{r} . На сегодняшний день стало стандартом изготовление высокоэнергоемких магнитов Nd-Fe-B из сплавов, выплавленных по методу strip casting (метод полосового литья). Внедрение этого метода, с одной стороны, позволило снизить содержание редкоземельных элементов в исходном сплаве [6], что привело к существенному увеличению значений $(BH)_{\text{max}}$ магнитов. С другой стороны, специфическая микроструктура сплава, изготовленного методом литья полосы, создает благоприятные условия для формирования оптимальной микроструктуры в магнитах, а именно – способствует изготовлению магнитов с более высокой степенью текстуры.

Современное применение магнитов Nd-Fe-B требует от них высокой температурной стабильности, характеризующейся низкими (по модулю) значениями температурных коэффициентов остаточной индукции (α) и коэрцитивной силы по намагниченности (β). Этому способствует замещение части Fe на Co [4], однако, неизбежно приводит к снижению значений H_{A} , и, как следствие, значений H_{cJ} . Чтобы этого избежать, Nd в соединении Nd-(Fe,Co)-B замещают на Pr, Tb, Dy и Ho, тем самым увеличивая поле анизотропии соединения [7]. При этом возникают дополнительные возможности изменения состава и режима обработок, не исследованные в настоящее время.

Целью работы является разработка методов получения спеченных образцов магнитов (Nd,Dy)-(Fe,Co)-B с высокими гистерезисными характеристиками и установление связи между их структурными и магнитными свойствами.

Задачи работы заключаются в следующем:

1. Изучить влияние температуры расплава перед разливкой, на микроструктуру материалов на основе системы (Nd,Dy)-(Fe,Co)-B, полученных методом полосового литья, и гистерезисные характеристики спеченных образцов, изготовленных из этих материалов.

2. Оценить влияние изменения концентрации Dy в исходном сплаве $(\text{Nd}_{1-d}\text{Dy}_d)_{13.7}\text{Fe}_{79.4}\text{Co}_{1.1}\text{Cu}_{0.1}\text{Ga}_{0.1}\text{B}_{5.5}$, выплавленном методом полосового литья, на микроструктуру, фазовый состав и гистерезисные характеристики спеченных образцов, изготовленных из этих материалов.

3. Изучить влияние легирующих добавок кобальта на микроструктуру, фазовый состав, гистерезисные характеристики и температурные коэффициенты остаточной индукции в спеченных образцах из сплавов $(Nd_{0.75}Dy_{0.25})_{13.9}(Fe_{1-c}Co_c)_{79.8}Cu_{0.1}Ga_{0.1}B_{6.1}$, изготовленных по методу полосового литья.

4. Изучить влияние легирующих добавок кобальта в сплавах $(Nd_{0.75}Dy_{0.25})_{15.1}(Fe_{1-c}Co_c)_{78.4}Cu_{0.1}Ga_{0.3}B_{6.1}$ и гольмия в сплавах $(Nd_{0.75-h}Ho_hDy_{0.25})_{15.1}(Fe_{0.65}Co_{0.36})_{78.4}Cu_{0.1}Ga_{0.3}B_{6.1}$, выплавленных методом разлива в изложницу, на температуру Кюри и температурные коэффициенты остаточной индукции изготавливаемых из этих сплавов спеченных образцов.

5. Изучить влияние отжига спеченных образцов из сплава $Nd_{14.7}Fe_{79.2}B_{6.1}$, отожженных в контакте с порошками Dy , Dy_3Co , $DyCu$, $DyGa$, DyH_x ($x = 2.0 - 2.2$), на микроструктуру и гистерезисные характеристики спеченных образцов.

6. Исследовать влияние гранулометрического состава порошков $Nd-Fe-B$ на микроструктуру и гистерезисные характеристики спеченных образцов.

Объектами исследования являются спеченные образцы (в общей сложности – 62 образца различного состава), изготовленные из сплавов: $(Nd_{1-d}Dy_d)_{13.7}Fe_{79.4}Co_{0.1}Cu_{0.1}Ga_{0.1}B_{5.5}$ с содержанием диспрозия от 0 до 0.3;

$(Nd_{0.75}Dy_{0.25})_{13.9}(Fe_{1-c}Co_c)_{79.8}Cu_{0.1}Ga_{0.1}B_{6.1}$ с содержанием кобальта от 0 до 0.2;

$(Nd_{0.75}Dy_{0.25})_{13.9}(Fe_{1-c}Co_c)_{79.8}Cu_{0.1}Ga_gB_{6.1}$ с содержанием галлия от 0.1 до 0.3;

$(Nd_{0.75}Dy_{0.25})_{15.1}(Fe_{1-c}Co_c)_{78.4}Cu_{0.1}Ga_{0.3}B_{6.1}$ с содержанием кобальта от 0.2 до 0.36;

$(Nd_{0.75-h}Ho_hDy_{0.25})_{15.1}(Fe_{0.65}Co_{0.35})_{78.4}Cu_{0.1}Ga_{0.3}B_{6.1}$ с содержанием гольмия от 0.1 до 0.26.

Предметом исследования являются магнитные свойства и их взаимосвязь со структурой, исследованные на спеченных образцах из указанных сплавов.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые исследованы фазовый состав, микроструктура и гистерезисные характеристики спеченных образцов на основе соединения $(Nd_{0.75}Dy_{0.25})_{15.1}(Fe_{1-c}Co_c)_{78.4}Cu_{0.1}Ga_{0.3}B_{6.1}$ с расширенной до 0.36 концентрацией по кобальту. Также для образцов, приготовленных по низкоокислородной технологии без процесса прессования порошка получены значения максимального энергетического произведения до 48 МГс·Э (382 кДж/м³).

Научная и практическая значимость работы

1. Проведенное систематическое исследование влияния концентрации Dy на гистерезисные характеристики, температурные коэффициенты остаточной индукции и коэрцитивной силы магнитов $(Nd,Dy)-(Fe,Co,Cu,Ga)-B$ позволяет проектировать спеченные образцы с рабочей температурой вплоть до 180 °С.

2. В ходе выполнения данной работы определены концентрации легирующих элементов Co и Ho , необходимые для достижения значений температурного коэффициента остаточной индукции вплоть до $-0.02 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ в интервале температур 27 – 120 °С.

3. В процессе исследования влияния концентрации Dy на свойства спеченных образцов были получены образцы со значениями $B_r \geq 13.2 \text{ кГс}$ (1.32 Тл); $H_{cJ} \geq 17.0 \text{ кЭ}$ (1353 кА/м); $(BH)_{\max} \geq 42.0 \text{ МГс} \cdot \text{Э}$ (334 кДж/м³), полностью удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к магнитам для ветроэнергетических установок.

4. О практической значимости работы свидетельствует патент [A16], а также внедрение низкокислородной технологии изготовления постоянных магнитов Nd-Fe-B на АО «Уральский электромеханический завод».

Методология и методы исследования

Исследование проводили на спеченных образцах, изготовленных из сплавов на основе соединения $(\text{Nd,Dy})_2(\text{Fe,Co,Cu,Ga})_{14}\text{B}$ методом порошковой металлургии и по низкокислородной технологии.

Определение количественного химического анализа проводили на спектрометре Optima 2000 DV методом индукционно-связанной плазмы, определение количественного содержания кислорода в образцах – восстановительным методом на анализаторе LECO ONH-836, сканирующая электронная микроскопия была выполнена на электронных микроскопах Quanta и MIRA TESCAN, рентгеноструктурные исследования – на рентгеновском дифрактометре высокого разрешения Empyrean (PANalytical) в $\text{Cu K}\alpha$ излучении. Исследование температурных зависимостей магнитной восприимчивости проводили на индукционном магнитометре, исследование гистерезисных характеристик в температурном интервале от комнатной температуры вплоть до $180\text{ }^\circ\text{C}$ – на установке Permagraph L.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разливка сплавов, изготовленных по методу полосового литья, при температуре $1430\text{ }^\circ\text{C}$ приводит к уменьшению размера дендритных зерен фазы $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ за счет сильного температурного градиента в сплаве. Спеченные образцы из такого сплава имеют более высокие значения остаточной индукции по сравнению с образцами, изготовленными из сплава с температурой разливки $1370\text{ }^\circ\text{C}$.

2. Повышение концентрации Dy до 0.2 в спеченных образцах $(\text{Nd}_{1-d}\text{Dy}_d)_{13.7}\text{Fe}_{79.4}\text{Co}_{0.1}\text{Cu}_{0.1}\text{Ga}_{0.1}\text{B}_{5.5}$ приводит к неоднородности межзеренной фазы $(\text{Nd,Dy,Fe,Co,Cu,Ga})\text{O}_y$ по соотношению содержания элементов $\text{Fe}/(\text{Nd+Dy})$. Такая неоднородность приводит к ухудшению магнитной изоляции некоторых зерен основной фазы $(\text{Nd,Dy})_2(\text{Fe,Co})_{14}\text{B}$, что является причиной отклонения формы кривых размагничивания спеченных образцов от прямоугольной формы.

3. В процессе отжига порошков Dy_3Co , DyGa и DyH_x ($x = 2.0 - 2.2$) в контакте со спеченными образцами состава $\text{Nd}_{14.7}\text{Fe}_{79.2}\text{B}_{6.1}$ в течение 10 ч атомы диспрозия диффундируют преимущественно по межзеренной фазе, обогащенной неодимом, замещая неодим и формируя тонкую оболочку на поверхности зерен основной фазы $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Такая микроструктура приводит к повышению значений коэрцитивной силы в спеченных образцах примерно на 80 % при снижении значений остаточной индукции не более чем на 5 – 7 %.

4. Значения остаточной индукции в спеченных образцах $\text{Nd}_{14.7}\text{Fe}_{79.2}\text{B}_{6.1}$, изготовленных по методу «процесс без прессования», увеличиваются на 3 % при применении текстурования порошков противонаправленными текстурующими импульсами магнитного поля по сравнению с текстурованием однополярными импульсами.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием метрологически аттестованного оборудования и апробированных методик изготовления и аттестации образцов, надежной воспроизводимостью результатов, применением разнообразных современных

взаимодополняющих методов исследования. Результаты исследований согласуются между собой, а также с имеющимися литературными данными.

Личный вклад автора

Постановка цели и задач исследования, а также подготовка публикаций и тезисов докладов проводилась автором совместно с руководителем группы постоянных магнитов Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук А.Г. Поповым и научным руководителем О.А. Головной. Все результаты, приведенные в диссертации, получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии. Изготовление сплавов по методам литья полосы и разливкой в изложницу было выполнено при участии автора. Изготовление спеченных образцов, определение основных магнитных характеристик при комнатной и повышенной температурах, а также расчет температурных коэффициентов коэрцитивной силы и остаточной индукции осуществлялись автором. Определение химического анализа сплавов и спеченных образцов было выполнено в химико-технологической лаборатории АО «Уральский электромеханический завод». Исследования методом сканирующей электронной микроскопии выполнены совместно с Подкорытовым К.В., обработка результатов выполнена автором. Рентгенографические исследования были выполнены в Центре коллективного пользования Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук В.С. Гавико. Исследование температурных зависимостей магнитной восприимчивости было выполнено лично автором.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Работа соответствует пункту 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 различных внешних воздействий) Паспорта специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений (отрасль науки – физико-математические).

Апробация результатов работы

Результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на следующих конференциях: XIX Международная конференция по постоянным магнитам (МКПМ 2013, г. Суздаль, 2013); XX Международная конференция по постоянным магнитам (МКПМ 2015, г. Суздаль, 2015); VI Международная конференция «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества» (ФНМ 2016, г. Суздаль, 2016); XXI Международная конференция по постоянным магнитам (МКПМ 2017), (г. Суздаль, 2017); VIII Euro-Asian Symposium “Trends in MAGnetism” (EASTMAG 2022, г. Казань, 2022); XXIII Международная конференция по постоянным магнитам (МКПМ 2022, г. Суздаль, 2022); XXII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-22, г. Екатеринбург, 2022).

Связь работы с научными программами и темами

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Магнит» при поддержке грантов УрО РАН (проект № 09-П-2-1035, проект № 12-П-23-2005, № 12-М-23-2066 и проект ОФИ УРО РАН № 11-23-07-УЭМЗ, проект № 12-М-23-2066, 2016 г. № 15-9-2-19, № 18-10-2-5) и Программы стратегического академического лидерства УрФУ «Приоритет-2030».

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 8 статьях в рецензируемых научных журналах, включенных в Перечень ВАК и индексируемых в международных базах научного цитирования [A1-A8]. Результаты работы были представлены на 7 международных и российских научных конференциях [A9-A15], получен 1 патент [A16].

Объем и структура диссертации

Работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка публикаций автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 151 страницу, диссертация содержит 91 рисунок, 27 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность рассматриваемой проблемы, сформулированы цель и задачи работы, представлены новизна, научная и практическая значимость работы и положения, выносимые на защиту. Введение также включает методологию и методы исследования, сведения о степени достоверности и апробации результатов.

В первой главе представлен обзор современных представлений об основных магнитных и термодинамических свойствах соединений $R_2Fe_{14}B$ ($R - Nd, Pr, Dy$), о влиянии микроструктуры и фазового состава на магнитные свойства спеченных образцов на основе соединения $Nd_2Fe_{14}B$. Показано, что увеличение концентрации Dy в основной фазе $(Nd,Dy)_2Fe_{14}B$ приводит к повышению значений $H_{сж}$ спеченных образцов, а легирование Ga и Cu способствует формированию более сложных фаз тройных стыков зерен и межзеренных границ, что также приводит к увеличению значений $H_{сж}$. Метод диффузии по границам зерен позволяет эффективно модифицировать микроструктуру спеченных образцов. В настоящей работе, наряду с металлическим Dy, в качестве источников диффузии было выбрано несколько интерметаллических соединений, богатых Dy: Dy_3Co , $DyCu$ и $DyGa$, а также гидрид DyH_x ($x = 2.0 - 2.2$). Низкая температура Кюри (T_C) основной фазы $Nd_2Fe_{14}B$ привела к широкому распространению замещения Fe в тройной системе Nd-Fe-B на Co.

Во второй главе приведено описание процесса изготовления сплавов методом разливки в водоохлаждаемую изложницу и методом литья полосы, а также приведены химические составы выплавленных сплавов. Описан процесс получения диффундантов, а также описан отжиг в процессе диффузии по границам зерен. Описан метод «процесс без прессования» (ПБП), исключая стадию прессования порошков, а также подробно рассмотрен процесс изготовления спеченных образцов по низкокислородной технологии (НКТ).

Фазовый состав образцов исследовали методом рентгеноструктурного анализа с использованием рентгеновского дифрактометра высокого разрешения. Исследование микроструктуры проводили методом сканирующей электронной микроскопии на шлифах и изломах сплавов и спеченных образцов. Массовую долю элементов в сплавах и спеченных образцах устанавливали методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на эмиссионном спектрометре. Содержания кислорода в сплавах и спеченных образцах определяли при помощи газоанализатора. Исследование гистерезисных характеристик спеченных образцов проводили в замкнутой магнитной цепи при комнатной и повышенных температурах. Для определения температурных зависимостей магнитной восприимчивости использовали индукционный магнитометр. Температурные зависимости намагниченности исследовали с помощью вибрационного магнитометра.

В третьей главе рассмотрена микроструктура сплавов, полученных по методу литья полосы при температурах расплава T_p перед разливкой в интервале от 1370 до 1430 °C и скоростях

вращения поверхности барабана V_6 от 0.8 до 1.2 м/с, и сравнивается с микроструктурой сплавов, полученных методом разливки в водоохлаждаемую изложницу. Рассмотрены сплавы двух групп: в группе А находятся сплавы на основе тройного соединения Nd-Fe-B, а в группе Б – сплавы, легированные Dy. Затем обсуждаются микроструктура и магнитные свойства спеченных образцов, изготовленных из этих сплавов, в сравнении со сплавами, полученными методом разливки в водоохлаждаемую изложницу. В таблице 1 представлены значения гистерезисных характеристик спеченных образцов в зависимости от T_p исходного сплава и V_6 .

Таблица 1 – Гистерезисные характеристики спеченных образцов

Сплав	T_p , °C	V_6 , м/с	B_r , кГс (Тл)	$H_{св}$, кЭ (кА/м)	$H_{сJ}$, кЭ (кА/м)	$(BH)_{max}$, МГс·Э (кДж/м ³)
А-сплавы Nd-Fe-B						
USC-3.0	1370	0.8	13.7 (1.37)	8.1 (644.8)	8.4 (668.6)	42.9 (341.5)
USC-3.2	1400		13.8 (1.38)	7.7 (612.9)	7.8 (620.9)	42.8 (340.1)
USC-3.3	1430		13.9 (1.39)	8.3 (660.7)	8.5 (676.6)	44.3 (352.6)
USC-3.4	1370	1.0	13.6 (1.36)	9.0 (716.4)	9.2 (932.3)	43.9 (349.4)
USC-3.5	1400		13.6 (1.36)	7.6 (605.0)	7.7 (612.9)	42.9 (341.5)
USC-3.6	1430		13.7 (1.37)	9.3 (740.3)	9.4 (748.2)	44.9 (357.4)
USC-3.8	1400	1.2	13.5 (1.35)	7.7 (612.9)	7.8 (620.9)	40.8 (324.8)
USC-3.9	1430		14.1 (1.41)	8.5 (676.6)	8.7 (692.5)	46.4 (369.3)
Б-сплавы (Nd,Dy)-Fe-B						
USC-3.0L	1430	1.0	13.6 (1.36)	11.2 (891.5)	11.7 (931.3)	45.3 (360.6)
USC-3.1L	1430	1.0	12.9 (1.29)	11.4 (907.4)	16.3 (1297.5)	39.9 (317.6)
USC-3.2L	1430	1.0	12.5 (1.25)	11.1 (883.6)	15.2 (1209.9)	35.5 (282.6)
USC-3.3L	1458	0.8	12.7 (1.27)	11.6 (923.4)	14.3 (1138.3)	37.2 (296.1)

Установлено, что с повышением температуры расплава от 1370 до 1430 °C толщина пластинок сплава, изготовленного по методу литья полосы, уменьшается, дендритные зерна основной фазы Nd₂Fe₁₄B при этом становятся более дисперсными, распределение по размеру – более однородным, а отклонение ориентировки зерен от направления теплоотвода уменьшается. Особенности микроструктуры сплавов, полученных по методу литья полосы, способствуют формированию более высоких значений B_r в спеченных образцах Nd-Fe-B.

В четвертой главе рассмотрены гистерезисные характеристики спеченных образцов (Nd,Dy)-Fe-B с концентрацией Dy от 0 до 1 вес. % (высокоэнергоемкие образцы), изготовленных по НКТ. Зависимость гистерезисных характеристик спеченных образцов от суммарного содержания Nd и Dy приведено на рисунке 1.

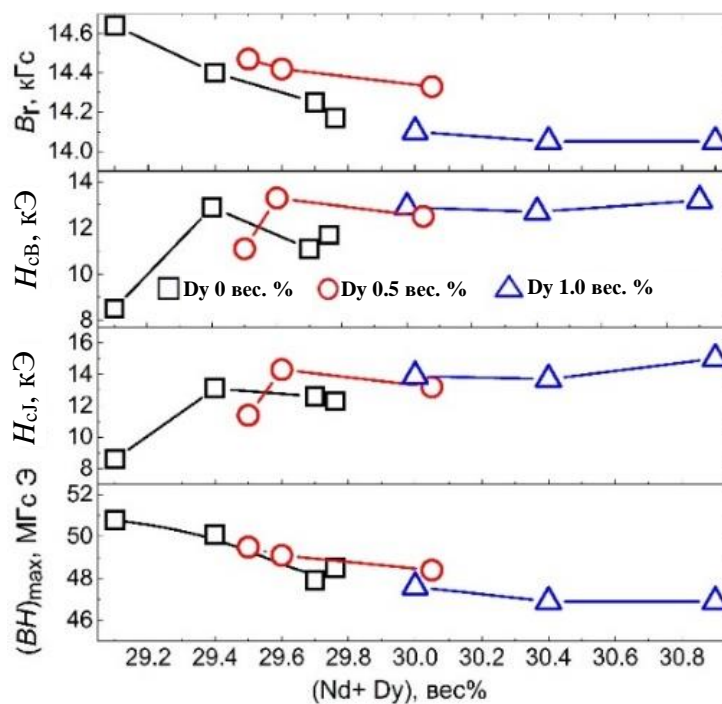


Рисунок 1 – Зависимость гистерезисных характеристик (сверху вниз – остаточной индукции, коэрцитивной силы по индукции, коэрцитивной силы по намагниченности, максимального энергетического произведения) спеченных образцов от содержания редкоземельных элементов в исходных сплавах

С увеличением содержания суммы Nd+Dy значения $H_{сл}$ повышаются до 12 – 13 кЭ (955 – 1035 кА/м), но значения B_r и $(BH)_{max}$ монотонно снижаются. Для стабилизации значений $H_{сл}$ спеченных образцов не ниже 13 кЭ (1035 кА/м) в сплавы добавляли 0.5 и 1.0 вес. % Dy (сумма (Nd + Dy) > 29.6 вес. %). При этом значения $(BH)_{max}$ образцов с 0.5 вес. % Dy и суммой (Nd + Dy) = 29.6 – 30.1 вес. % изменяются в диапазоне 48.5 – 49.5 МГс·Э (386 – 394 кДж/м³), а у образцов с 1.0 вес. % Dy они снижаются до 47 МГс·Э (381.3 кДж/м³). В микроструктуре таких образцов можно выделить фазу А (фаза (Nd,Dy)₂Fe₁₄B), фазу В (фаза NdDyO_y с гранецентрированной кубической (ГЦК) структурой), фазу С (фаза состава (Nd,Dy,Fe,M)O_y, где М – Cu, Ga, Co) и фазу D (фаза (Nd,Dy)₂O₃). Микроструктура и фазовый состав высокоэнергетического образца с содержанием Dy 0.5 вес. % представлена на рисунке 2. Фаза (С) своими острыми углами соединяется с обогащенными Nd тонкими светло-серыми слоями межзеренных границ, которые разделяют зерна и хорошо видны на рисунке 2 б. В процессе дополнительного отжига спеченных образцов при 520 – 600 °С фаза (С) выступает в качестве источника жидкофазной диффузии элементов Co, Cu, Ga.

Далее рассмотрены спеченные образцы (Nd,Dy)-Fe-B с концентрацией Dy от 0 до 10.3 вес. % (термостабильные образцы). В микроструктуре образцов с высокой концентрацией Dy объемная доля фазы (С) выше, и практически не выявляются тонкие ламели фазы в межзеренных границах. На рисунке 3 приведены зависимости $B_r(T)$, $H_{сл}(T)$, $\alpha(T)$, $\beta(T)$ для спеченных образцов с содержанием Dy от 0 до 10.3 вес. %. Спеченные образцы с содержанием Dy 8.4 и 10.3 вес. % имеют прямолинейные участки кривых размагничивания по индукции $B(H)$ во втором квадранте при температурах 180 и 200 °С, соответственно и поэтому могут успешно эксплуатироваться при этих температурах.

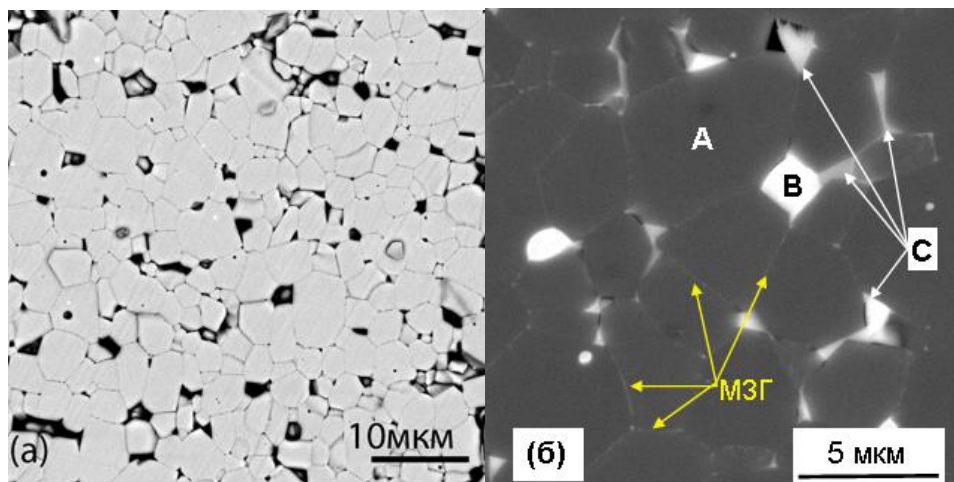


Рисунок 2 – Микроструктура спеченного образца из сплава с 0.5 вес. % Dy: (а) травленный шлиф; (б) нетравленный шлиф, обозначены фазы А – $(Nd,Dy)_2Fe_{14}B$, В – $NdDyO_y$, С – и межзеренные границы (МЗГ)

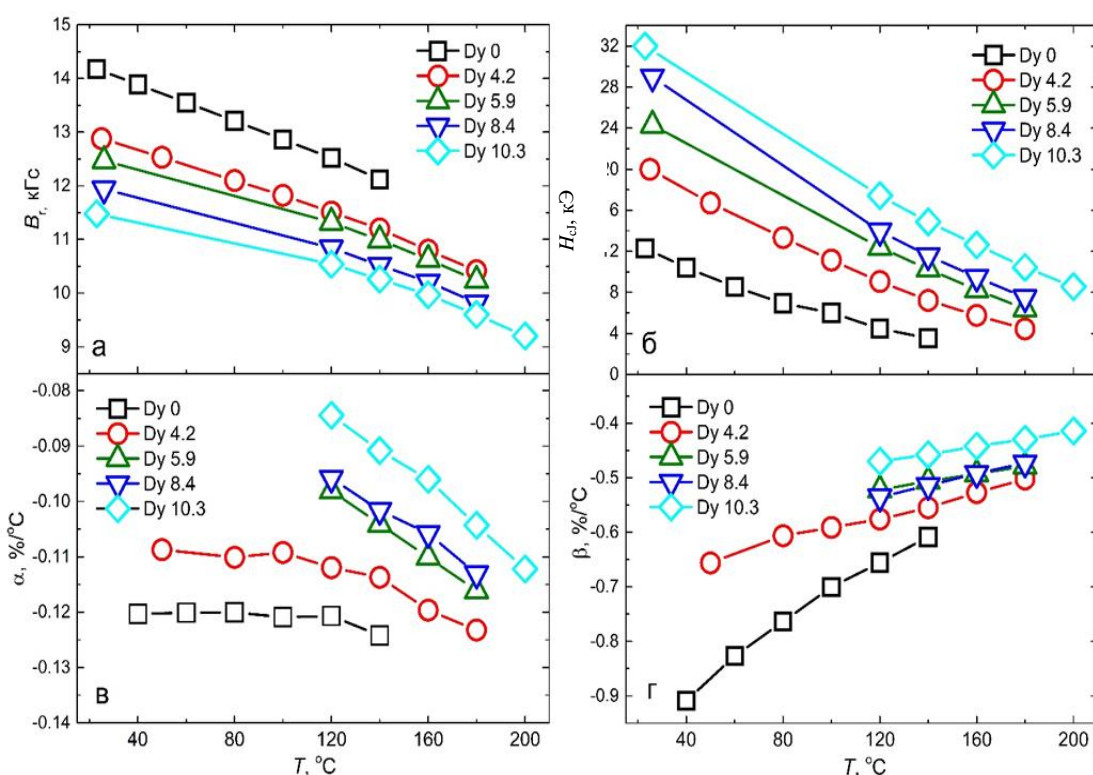


Рисунок 3 – Температурные зависимости: (а) остаточной индукции $B_r(T)$, (б) коэрцитивной силы $H_{cJ}(T)$, (в) температурного коэффициента остаточной индукции $\alpha(T)$, (г) температурного коэффициента коэрцитивной силы $\beta(T)$ спеченных образцов с концентрацией Dy от 0 до 10.3 вес.%

Далее с помощью сканирующей электронной микроскопии исследованы сплавы состава $(Nd_{0.75}Dy_{0.25})_{13.9}(Fe_{1-c}Co_c)_{79.8}Cu_{0.1}Ga_{0.1}B_{6.1}$ с концентрацией Co от 0 до 0.2, выплавленные по методу литья полосы. Также исследованы температурные зависимости магнитной восприимчивости сплавов с концентрацией Co от 0 до 0.2. На рисунке 4 сравниваются зависимости B_r , H_{cJ} и $(BH)_{max}$ от содержания кобальта в спеченных образцах, измеренные при 23 и 140 °C. Значения H_{cJ} монотонно снижаются как при 23 °C, так и при 140 °C на 42 и 58 % соответственно. В результате численные значения H_{cJ} в системе единиц СГС (сантиметр – грамм – секунда) становятся меньше значений B_r , и это приводит к критическому условию саморазмагничивания спеченных образцов

в магнитных системах даже с невысоким размагничивающим коэффициентом $B/H \sim 2$, что ограничивает условия их работы при повышенных температурах. Анализ фазового состава спеченных образцов выявил в спеченном образце из сплава со значением $c = 0.2$ изменение состава фазы (Б) – уменьшается стехиометрическое соотношение $(Nd+Dy):M$ от 1:2.3 до 1:3.8 ($M - Cu, Ga, Co$). Причиной этого является расширение области гомогенности фазы Лавеса $(Nd,Dy)M_{2+\delta}$ при обогащении ее Co и Fe .

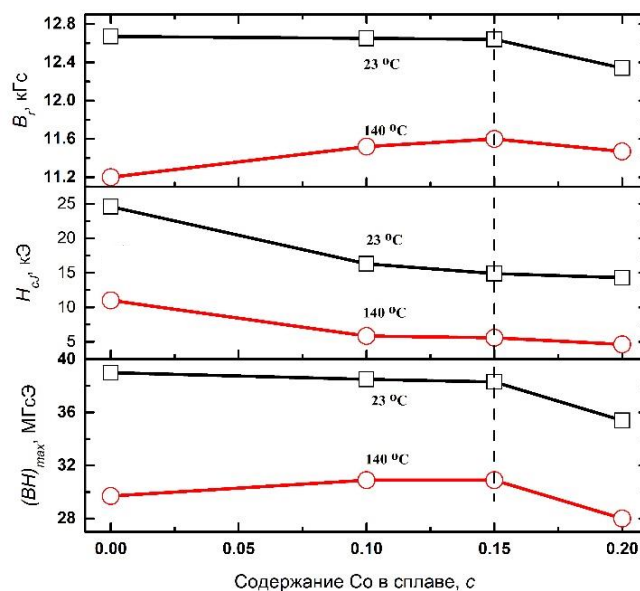


Рисунок 4 – Зависимости B_r , H_{cJ} и $(BH)_{max}$ от содержания Co в сплаве, измеренные при 23 и 140 °C

Из литературных данных известно, что фазы Лавеса состава $(Nd,Dy)(Fe,Co)_2$ являются магнитомягкими ферромагнетиками с T_C выше комнатной температуры [9].

Для материалов, исследуемых в настоящей работе, были измерены температурные зависимости магнитной восприимчивости $\chi(T)$ на текстурованных спеченных образцах с приложением поля в направлении, перпендикулярном текстуре, что позволило выявить малый вклад от ферромагнитных фаз с небольшой объемной долей и невысокой намагниченностью насыщения. Результаты этих измерений показаны на рисунке 5. В образцах со значениями $c = 0.15$ и 0.20 выявлены дополнительные аномалии на кривых $\chi(T)$ при 268 и 388 °C, соответственно, которые можно связать с формированием в межзеренном пространстве фаз, близких по составу к $(Nd,Dy)M_2$ и которые ухудшают магнитную изоляцию зерен, что наряду с уменьшением поля анизотропии фазы 2:14:1 является причиной существенного снижения H_{cJ} .

После этого исследуется влияние легирования исходного сплава галлием на гистерезисные характеристики, температурную зависимость магнитной восприимчивости и микроструктуру спеченных образцов. В результате такого дополнительного легирования в межзеренном пространстве магнита с увеличенной концентрацией Ga вместо ферромагнитной фазы $(Nd,Dy)(Fe,Co)_2$ образуется парамагнитная фаза $(Nd,Dy)(Fe,Co,Ga)_2$, что приводит к улучшению магнитной изоляции зерен фазы $(Nd,Dy)_2(Fe,Co)_{14}B$.

Исследована микроструктура, фазовый состав и магнитные свойства спеченных образцов, изготовленных из выплавленных в изложницу сплавов $(Nd_{0.64}Dy_{0.36})_{16}(Fe_{1-c}Co_c)_{77.5}Cu_{0.1}Ga_{0.3}B_{6.1}$ с концентрацией Co от 0.22 до 0.36 и $(Nd_{0.64-h}Dy_{0.36}Ho_h)_{16}(Fe_{0.64}Co_{0.36})_{77.5}Cu_{0.1}Ga_{0.3}B_{6.1}$ с концентрацией Ho от 0 до 0.26. Микроструктура спеченных образцов обоих составов включает в

себя зерна $(\text{Nd,Dy})_2(\text{Fe,Co})_{14}\text{B}$, фазу $(\text{Nd,Dy})(\text{Fe,Co})_3$, и оксиды $(\text{Nd,Dy})\text{O}_y$. При увеличении концентрации Co до 0.36 выявлена фаза $(\text{Nd,Dy})_2(\text{Fe,Co})_{17}$. Для спеченных образцов с концентрацией гольмия $h = 0.26$ получено значение $\alpha = +0.009 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ в интервале температур 27 – 120 $^\circ\text{C}$.

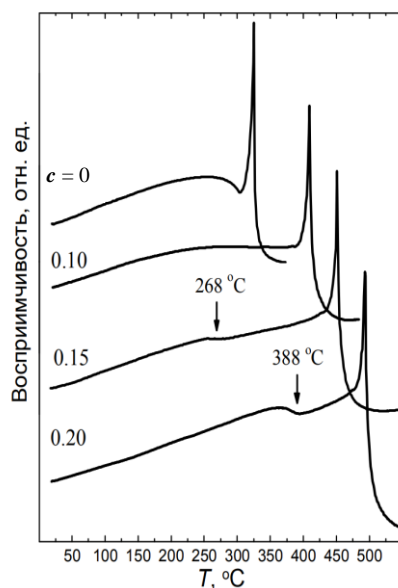


Рисунок 5 – Температурные зависимости магнитной восприимчивости, измеренной поперек направления текстуры спеченных образцов $(\text{Nd}_{0.75}\text{Dy}_{0.25})_{13.9}(\text{Fe}_{1-c}\text{Co}_c)_{79.8}\text{Cu}_{0.1}\text{Ga}_{0.1}\text{B}_{6.1}$ с концентрациями кобальта c от 0 до 0.2.

В пятой главе исследовано влияние диффузионного отжига на гистерезисные характеристики спеченных образцов Nd-Fe-B. На рисунке 6 приведена зависимость гистерезисных характеристик тонких пластинок, отожженных в контакте с порошками соединений Dy, DyCu, DyGa, Dy₃Co и DyH_x при 750 $^\circ\text{C}$ в течение времени t_{DA} от 0.5 до 10 ч.

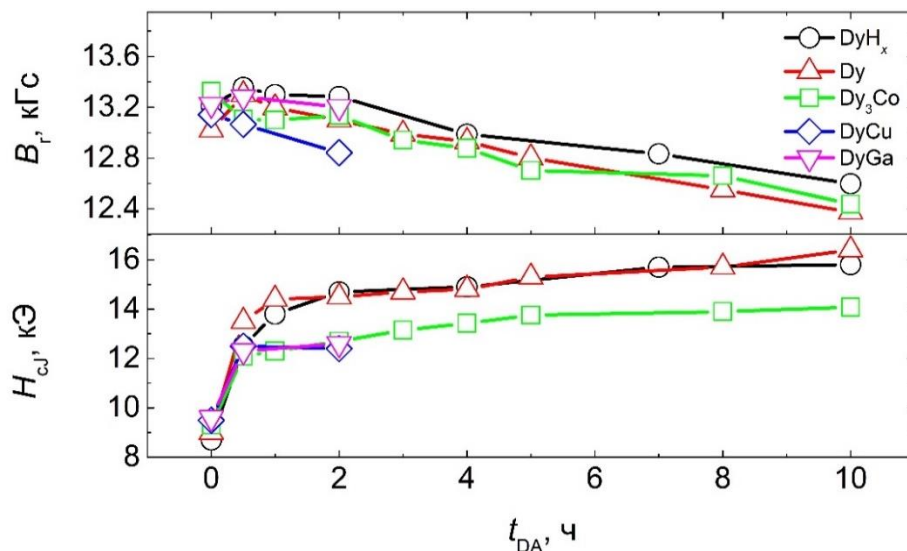


Рисунок 6 – Зависимости B_r и H_{cj} тонких пластинок Nd-Fe-B, запрессованных в порошки Co и DyH_x от времени диффузионного отжига t_{DA} при 750 $^\circ\text{C}$

Получены качественно одинаковые зависимости H_{c1} , B_r от времени диффузионного отжига для всех порошков диффундантов. H_{c1} резко возрастает в течение первого часа, а затем монотонно и практически линейно увеличивается со скоростью около 0.2 кЭ/ч (15.9 кА/м в час). Наиболее высокие значения H_{c1} достигнуты в спеченных образцах, запрессованных в порошки Du_3Co и DuH_x .

В шестой главе исследовано формирование текстуры в спеченных образцах. Исследована зависимость плотности спеченных образцов, полученных после вибрационного измельчения методом «процесс без прессования» (ПБП), от насыпной плотности порошка ρ_n . Установлено, что с уменьшением размера частиц D_{cp} от 3.9 до = 3.2 мкм спекаемость порошков улучшается, и высокие значения плотности спеченных образцов ($\rho > 7.45$ г/см³) достигаются при все меньших значениях насыпной плотности порошков. На рисунке 7 приведены зависимости гистерезисных свойств спеченных образцов, изготовленных по методу ПБП, от величины насыпной плотности при текстуровании для различных значений среднего размера частиц порошка.

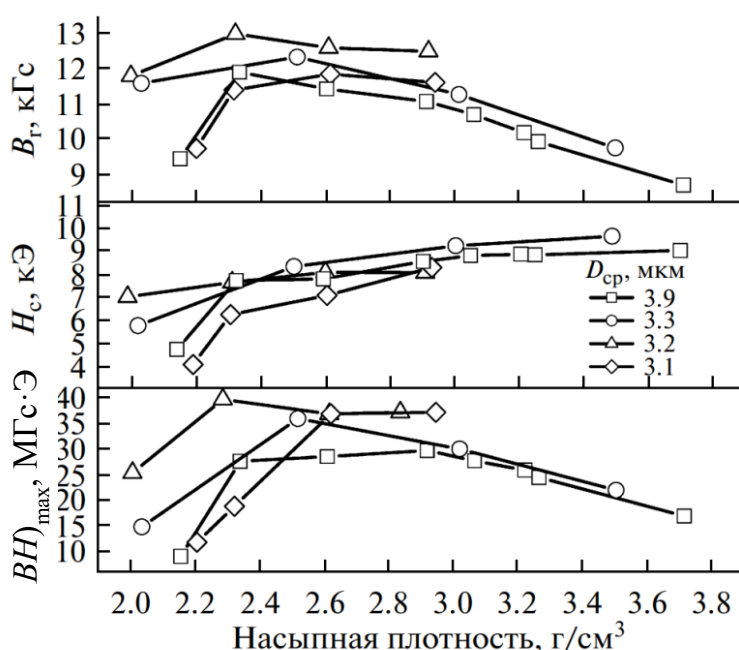


Рисунок 7 – Гистерезисные характеристики спеченных образцов, изготовленных по низкоокислородной технологии из сплава $Nd_{14.7}Fe_{79.2}B_{6.1}$ с использованием процесса без прессования в зависимости от насыпной плотности для различных размеров частиц порошка

Наличие максимума на кривых $B_r(\rho_n)$ спеченных образцов из этих порошков обусловлено, с одной стороны, тем, что порошки с малой насыпной плотностью хуже спекаются, а с другой стороны, при высокой насыпной плотности они плохо текстуруются. Величина максимума меняется с размером частиц. H_{c1} спеченных образцов монотонно возрастает по мере увеличения насыпной плотности. Это вызвано ухудшением текстуры магнитов и известной эмпирической закономерностью повышения H_{c1} с увеличением угла разориентации осей легкого намагничивания зерен в магнитах Nd-Fe-B.

В таблице 2 представлены значения остаточной индукции и коэрцитивной силы по намагниченности спеченных образцов в соответствии с количеством N однополярных и противоположно направленных текстурующих импульсов напряженностью импульсного магнитного поля величиной 46 кЭ (3662 кА/м) и длительностью импульса 6.5 мс. С увеличением числа однополярных импульсов гистерезисные характеристики спеченных образцов изменяются

очень слабо. Более заметный прирост B_r на 3 % и $(BH)_{\max}$ на 5.5 % наблюдается при увеличении N противоположно направленным импульсам. Значения коэрцитивной силы, напротив, несколько уменьшаются.

Таблица 2 – Зависимости гистерезисных свойств спеченных образцов от количества текстурирующих однополярных и противоположно направленных импульсов

N	Однополярные импульсы				Противоположно направленные импульсы			
	ρ , г/см ³	B_r , кГс (Тл)	H_{cl} , кЭ (кА/м)	$(BH)_{\max}$, МГс·Э (кДж/м ³)	ρ , г/см ³	B_r , кГс (Тл)	H_{cl} , кЭ (кА/м)	$(BH)_{\max}$, МГс·Э (кДж/м ³)
1	7.50	12.6 (1.26)	8.1 (645)	37.0 (295)	7.4	12.7 (1.27)	9.1 (728)	38.2 (304)
3	7.51	12.6 (1.26)	8.1 (645)	36.9 (294)	7.4	13.0 (1.30)	8.8 (701)	39.4 (314)
5	7.50	12.6 (1.26)	8.0 (637)	36.8 (293)	7.5	13.1 (1.31)	8.8 (701)	40.1 (319)
7	7.50	12.7 (1.27)	7.9 (629)	36.7 (292)	7.4	13.2 (1.32)	8.1 (645)	40.3 (321)

Далее рассмотрено влияние напряженности импульсного магнитного поля на значения остаточной индукции текстурированных порошков и спеченных образцов. Высокие значения текстурирующего магнитного поля величиной 70 кЭ (5572 кА/м) позволяют достигать наибольших значений B_r спеченных образцов. Также выявлен положительный эффект противонаправленных последовательных импульсов текстурирующего поля по сравнению с однополярными. В спеченном образце из порошка с $D_{cp} = 3,1$ мкм и наиболее высоким значением $B_r = 14.3$ кГс (1.43 Тл) удалось реализовать $(BH)_{\max} = 48$ МГс·Э (382 кДж/м³).

Также в главе 6 исследовано применение активированного измельчения порошков при изготовлении спеченных образцов методом ПБП. Вначале исследованы порошки после вибрационного измельчения в среде ацетона без использования и с использованием поверхностно-активного вещества силоксан. С добавкой силксана измельчение происходит интенсивнее. Сравнивая средние размеры частиц двух видов порошков по методу Фишера и из обработки изображений порошка, полученных со сканирующего электронного микроскопа выявлено существенное различие. При измерении размера частиц методом Фишера происходит измерение объемного среднего значения, а в методе анализа изображений – оценка математического среднего значения размера исследованных частиц.

Далее по электронно-микроскопическим изображениям проводили исследование распределения зерен в травленных шлифах спеченных образцов, изготовленных из порошков после вибрационного измельчения с использованием поверхностно активных веществ и без них. С увеличением среднего размера частиц порошка происходит практически линейное увеличение среднего размера зерен спеченного магнита, коэффициент пропорциональности составляет 1.9. При этом размер фракции мелких зерен увеличивается более медленно. Площадь, ограниченная кривой распределения, представляет собой общее число зерен фракции. Отношение мод практически не зависит от среднего размера частиц порошка и составляет примерно 2.

На рисунке 8 б приведена зависимость доли зерен фракции мелких частиц от среднего размера по методу Фишера. С уменьшением среднего размера частиц порошка происходит рост числа мелких зерен спеченных образцов вплоть до среднего размера 3.5 мкм. При обработке гистограмм распределения частиц порошка по размерам выявлено, что распределения частиц порошка и зерен спеченного образца по размерам бимодальны и описываются суперпозицией двух логнормальных распределений.

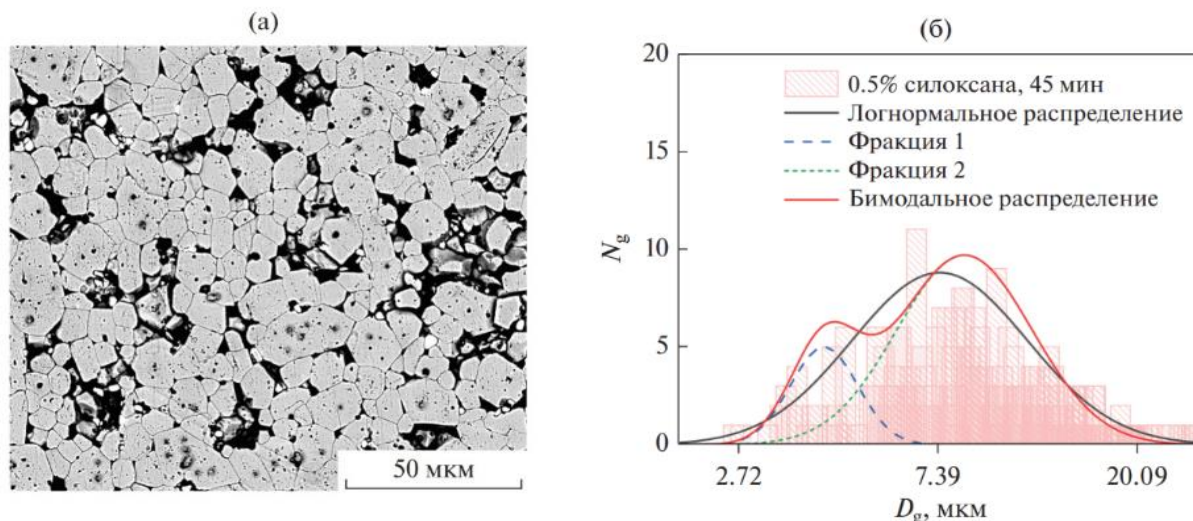


Рисунок 8 – Изображение шлифа спеченного образца, полученного с 0.5 % силиксона, время измельчения 45 мин (а) и гистограмма распределения зерен спеченного образца по размерам (б)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. При повышении температуры расплава сплавов, изготовленных по методу полосового литья, от 1370 °С до 1430 °С дендритные зерна основной фазы $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ в сплаве становятся более дисперсными, их распределение по размеру – более однородным, что приводит к формированию более высоких значений остаточной индукции в спеченных образцах по сравнению с образцами, изготавливаемыми из сплавов, полученных методом разлива в изложницу.

2. Повышение концентрации Dy от 0 до 0.3 в сплавах $(\text{Nd}_{1-d}\text{Dy}_d)_{13.7}\text{Fe}_{79.4}\text{Co}_{1.1}\text{Cu}_{0.1}\text{Ga}_{0.1}\text{B}_{5.5}$, выплавленных по методу полосового литья, приводит к появлению в микроструктуре спеченных образцов фаз $(\text{Nd,Dy})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, оксидов $(\text{Nd,Dy})\text{O}_y$, фаз $(\text{Nd,Dy,Fe,Co,Cu,Ga})\text{O}_y$, локализуемых в тройных стыках зерен и соединяющихся с межзеренными границами. Такая микроструктура приводит к увеличению значений коэрцитивной силы спеченных образцов с 12 до 32 кЭ при снижении значений остаточной индукции с 14.5 до 11.5 кЭ.

3. Повышение концентрации кобальта от 0 до 0.2 в сплавах $(\text{Nd}_{0.75}\text{Dy}_{0.25})_{13.9}(\text{Fe}_{1-c}\text{Co}_c)_{79.8}\text{Cu}_{0.1}\text{Ga}_{0.1}\text{B}_{6.1}$ приводит к формированию в тройных стыках зерен спеченных образцов магнитомягких фаз $(\text{Nd,Dy})(\text{Fe,Co})_2$, что является причиной снижения коэрцитивной силы с 24 до 15 кЭ. Увеличение концентрации Ga до 0.3 в исходном сплаве приводит к формированию вместо фаз $(\text{Nd,Dy})(\text{Fe,Co})_2$ парамагнитных фаз $(\text{Nd,Dy})(\text{Fe,Co,Ga})_2$, что позволяет при концентрации кобальта 0.15 достигать значений коэрцитивной силы до 21 кЭ. Значения температурного коэффициента индукции в таких магнитах составляет $-0.06 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ в интервале температур от 23 до 140 °С.

4. Увеличение концентрации кобальта от 0.22 до 0.36 в спеченных образцах сплавов $(\text{Nd}_{0.64}\text{Dy}_{0.36})_{16}(\text{Fe}_{1-c}\text{Co}_c)_{77.5}\text{Cu}_{0.1}\text{Ga}_{0.3}\text{B}_{6.1}$, полученных методом разлива в изложницу, приводит к увеличению температуры Кюри от 501 до 580 °С. Значение температурного коэффициента остаточной индукции в таких магнитах составляет $-0.02 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ в интервале температур 27 °С – 120 °С.

5. Увеличение концентрации гольмия от 0 до 0.26 в спеченных образцах сплавов $(Nd_{0.64-h}Dy_{0.36}Ho_h)_{16}(Fe_{0.64}Co_{0.36})_{77.5}Cu_{0.1}Ga_{0.3}B_{6.1}$, полученных методом разлива в изложницу, приводит к снижению температуры Кюри от 580 до 572°C. Значение температурного коэффициента остаточной индукции в таких магнитах составляет +0.009 %/°C в интервале температур 27 °C – 120 °C.

6. В процессе отжига спеченных образцов сплава $Nd_{14.7}Fe_{79.2}B_{6.1}$ в контакте с порошками Dy, Dy_3Co , DyCu, DyGa, DyH_x, при температурах 750 °C – 850 °C в течение 0.5 – 2 ч на поверхности зерен $Nd_2Fe_{14}B$ формируется диспрозиевая оболочка. Такая микроструктура приводит к увеличению значений коэрцитивной силы на 40 % (отжиг с порошками Dy_3Co , DyCu, DyGa) и на 60 % (отжиг с порошками Dy, DyH_x) при снижении значений остаточной индукции не более чем на 2 %.

7. Наличие двух фракций порошка состава $Nd_{35.0}Fe_{63.48}Al_{0.3}Ti_{0.2}B_{1.02}$ с двумя различными средними размерами частиц в пресс-порошке после вибрационного измельчения приводит к неоднородности микроструктуры спеченного образца по среднему размеру зерен и, как следствие, к снижению значений остаточной индукции спеченных образцов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. Влияние диффузионного отжига на гистерезисные свойства спеченных магнитов Nd-Fe-B / А. Г. Попов, Д. Ю. Василенко, Т. З. Пузанова, **А. В. Шитов**, А. В. Власюга. – Текст: непосредственный // Физика Металлов и Metallovedenie. — 2011. Т. 111, №5. — С. 493-501.

A2. Получение спеченных магнитов Nd-Fe-B без процесса прессования порошков / А. Г. Попов, **А. В. Шитов**, Е. Г. Герасимов, Д. Ю. Василенко, М. Ю. Говорков, Д. Ю. Братушев, В. П. Вяткин, К. Ю. Шуняев, Т. Л. Михайлова. – Текст: непосредственный // Физика Металлов и Metallovedenie. — 2012. — Т. 113, №4. — С. 352.

A3. Микроструктура и свойства сплавов состава Nd-Fe-B, полученных методом «Strip Casting», и изготовленных из них постоянных магнитов / Д. Ю. Василенко, **А. В. Шитов**, А. В. Власюга, А. Г. Попов, Н. В. Кудреватых, Н. В. Печищева. – Текст: непосредственный // Metallovedenie и термическая обработка металлов. — 2014. — №11 (713) — С. 10-16.

A4. Высокоэнергоемкие магниты (Nd,Dy)-(Fe,Co)-B с пониженным температурным коэффициентом индукции / А. Г. Попов, Д. А. Колодкин, В. С. Гавико, Д. Ю. Василенко, **А. В. Шитов**, А. В. Власюга, М. Ю. Говорков, Д. Ю. Братушев. – Текст: непосредственный // Физика Металлов и Metallovedenie. — 2017. — Т.118, №10. — С. 981-992.

A5. Структура и свойства постоянных магнитов R-(Fe,Co)-B (R – Nd,Dy,Ho) с низким температурным коэффициентом индукции / Д. Ю. Василенко, Д. Ю. Братушев, А. Г. Попов, Д. А. Колодкин, **А. В. Шитов**. – Текст: непосредственный // Metallovedenie и термическая обработка металлов — 2018. — №8 (758). — С. 42-47.

A6. Магнитные гистерезисные свойства и микроструктура высокоэнергоемких магнитов (Nd,Dy)-Fe-B с низким содержанием кислорода / Д. Ю. Василенко, **А. В. Шитов**, Д. Ю. Братушев, К. И. Подкорытов, В. С. Гавико, О. А. Головня, А. Г. Попов. – Текст: непосредственный // Физика Металлов и Metallovedenie. — 2022. — Т. 122, №12. — С. 1261-1270.

A7. Магнитные гистерезисные свойства и микроструктура высококоэрцитивных магнитов (Nd,Dy)-Fe-B с концентрацией Dy до 10 вес.% и низким содержанием кислорода / Д. Ю. Василенко, **А. В. Шитов**, А. Г. Попов, В. С. Гавико, Д. Ю. Братушев, К. И. Подкорытов, О. А. Головня. – Текст: непосредственный // Физика Металлов и Metallovedenie. — 2022. — Т. 123, №2. — С. 158-168.

A8. Применение активированного измельчения порошков при изготовлении магнитов Nd-Fe-B методом PLP / О. А. Головня, К. А. Кручинина, А. В. Протасова, Д. А. Колодкин, **А. В. Шитов**, Л. А. Сташкова, А. В. Огурцов, Д. В. Таранов. – Текст: непосредственный // Физика Металлов и Металловедение — 2023. — Т. 124, №5. – С. 347-356.

A9. Исследование микроструктуры и свойств сплавов Nd-Fe-B типа Strip Casting и получаемых из них постоянных магнитов / А. В. Шитов, Д. Ю. Василенко, М. Ю. Говорков, В. П. Вяткин, А. В. Власюга, А. Г. Попов, Н. В. Печищева // XIX международная конференция по постоянным магнитам (МКПМ 2013), Суздаль, 23-26 сентября, 2013: тезисы докладов. – стр. 126-127.

A10. Получение высококоэрцитивных магнитов (Nd,Dy)-Fe-B по низкокислородной технологии / А. В. Шитов, Д. Ю. Василенко, М. Ю. Говорков, В. П. Вяткин, А. Г. Попов // XX международная конференция по постоянным магнитам (МКПМ 2015), Суздаль, 21-25 сентября, 2015: тезисы докладов. – стр. 92-93.

A11. Высокоэнергоемкие постоянные магниты (Nd,Dy)-Fe-B с рабочей температурой до 180 °С / А. В. Шитов, Д. Ю. Василенко, М. Ю. Говорков, Д. Ю. Братушев, Д. А. Колодкин, А. Г. Попов // XXI международная конференция по постоянным магнитам (МКПМ 2017), Суздаль, 18-22 сентября, 2017: тезисы докладов. – стр. 122-123.

A12. Phase transformations upon sintering of Nd-Dy-Fe-B powders studied by in-situ DSC / A. V. Shitov, O. A. Golovnia, L. A. Stashkova, A. V. Protasov, A. V. Ogurtsov, M. K. Sharin, A. G. Popov, K. A. Kruchinina // VIII Euro-Asian Symp. «Trends in MAGnetism» (EASTMAG 2022), Kazan, 22-26 августа, 2022: –V. 2, – 223 с.

A13. Study of alignment degree of Nd-Dy-Fe-B sintered magnets by different methods / A. V. Shitov, O. A. Golovnya, V. S. Gaviko, A. G. Popov, D. Yu. Vasilenko // VIII Euro-Asian Symp. «Trends in MAGnetism» (EASTMAG 2022), Kazan, 22-26 августа, 2022: –V. 2, – 253 с.

A14. Применение активированного измельчения порошков при изготовлении магнитов Nd-Fe-B методом PLP / А. В. Шитов, О. А. Головня, А. В. Протасов, Д. А. Колодкин, А. Г. Попов, К. А. Кручинина, Д. В. Таранов, А. В. Огурцов, М. К. Шарин. // XXIII международная конференция по постоянным магнитам (МКПМ 2022), Суздаль, 27-30 сентября, 2022: тезисы докладов – 94 с.

A15. Высококоэрцитивные магниты (Nd,Pr)-(Fe,Co,Cu,Ga)-B без тяжелых редкоземельных элементов для генераторов ВЭУ / А. В. Шитов, Д. Ю. Братушев, Д. Ю. Василенко, А. Г. Попов, О. А. Головня, Д. А. Колодкин, А. В. Протасов // X международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА» (КОМАНДА 2023), Санкт-Петербург, 27-30 июня, 2023: тезисы докладов, – стр.145-146.

ПАТЕНТЫ

A16. Патент № 2476947 Российская федерация, МПК H01F 1/053 (2006.01), H01F 41/02 (2006/01). Способ получения высококоэрцитивных магнитов из сплавов на основе Nd-Fe-B : N2011123182/07 : заявл. 08.06.2011 : опубликовано 27.02.2013 / Попов А. Г., Василенко Д. Ю., **Шитов А. В.** – 14 с. ил. – Текст: непосредственный.

Список использованных источников

1. Matsuura, Y. Recent development of Nd-Fe-B sintered magnets and their applications / Y. Matsuura. – Текст: непосредственный // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2006. – Т. 303, № 2. – С. 344-347.

2. Magnetization and magnetic anisotropy of $R_2Fe_{14}B$ measured on single crystals / S. Hirosawa, Y. Matsuura, H. Yamamoto, S. Fujimura, H. Yamauchi. – Текст: непосредственный // Journal of Applied Physics. – 1986. – Т. 59. – С. 873-879.
3. Fidler J. Overview of Nd-Fe-B magnets and coercivity / J. Fidler, T. Schrefl. – Текст: непосредственный // Journal of Applied Physics. – 1996. – Т. 79, № 8. – С. 5029-5034.
4. Herbst J. F. $R_2Fe_{14}B$ materials: intrinsic properties and technological aspects / J. F. Herbst. – Текст: непосредственный // Reviews of Modern Physics. – 1991. – Т. 63. – С. 819-898.
5. Park H. S. Effect of metal coating and consecutive heat treatment on coercivity of thin Nd-Fe-B sintered magnets / H. S. Park, K. Hiraga. – Текст: непосредственный // Proceedings of 16th Int. Workshop on Rare Earth Magnets and Their Applications – Sendai, Japan, 2000. – С. 257.
6. Microstructural analysis of strip cast Nd-Fe-B alloys for high $(BH)_{max}$ magnets / J. Bernardi, J. Fidler, M. Sagawa, Y. Hirose. – Текст: непосредственный // Journal of Applied Physics – 1998. – Т. 83. – С. 6396-6398.
7. Влияние диспрозия и кобальта на температурную зависимость намагниченности и фазовый состав материала системы Nd-Dy-Fe-Co-B / Е. Н. Каблов, А. Ф. Петраков, В. П. Пискорский, Р. А. Валеев, Н. В. Назарова. – Текст: непосредственный // МиТОМ. – 2007. – С. 3-10.
8. Magnetic properties of the $Nd_2(Fe_{1-x}Co_x)_{14}B$ system / Y. Matsuura, S. Hirosawa, H. Yamamoto, S. Fujimura, M. Sagawa. – Текст: непосредственный // Applied Physics Letters. – 1985. – Т. 46. – С. 308-310.
9. Fidler J. The influence of Ga-substitution on the coercivity of Nd-(Fe,Co)-B sintered permanent magnets / J. Fidler, C. Groiss, M. Tokunaga. – Текст: непосредственный // IEEE Transaction on Magnetics. 1990. V. 26. № 5. P. 1948-1950.