

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Балтийский федеральный
университет имени Иммануила Канта»
(БФУ им. И. Канта)

ОКПО 02068255, ОГРН 1023901002949
ИНН 3906019856, КПП 390601001

ул. А. Невского, 14, г. Калининград, 236041
+7 (4012) 595-597, post@kantiana.ru
www.kantiana.ru

_____ № _____
на № _____ от _____

Учёному секретарю диссертационного
совета 24.2.316.01 при ФГБОУ ВО
«Комсомольский-на-Амуре
государственный университет»
Проценко Александру Евгеньевичу

Россия, 681013, Хабаровский край,
г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27
Тел. +7 9147787163, факс +7 (4217) 53-61-50
e-mail: diss.material@yandex.ru

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу Яцко Дмитрия
Сергеевича

**«Создание магнитного материала из порошков Sm, Co и Fe методом
лазерных аддитивных технологий в постоянных магнитных полях»**,
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по
специальности 2.6.17. Материаловедение

Диссертационная работа Дмитрия Сергеевича посвящена весьма актуальной, практически значимой и, по ожидаемым результатам, реально требующей ускоренного решения проблеме – разработка инновационного метода создания магнитных материалов из сплавов, содержащих РЗМ, и магнитных систем на их основе с использованием аддитивных процессов и наплавочных технологий.

Реализация выбранной технологии в условиях наложения внешнего магнитного поля, безусловно, является инновационным решением. Однако это кратно усложняет анализ полученных в диссертационных исследованиях результатов структурно-фазового, включая магнитную структуру, состояния материала, формирующегося в неравновесных условиях аддитивного процесса. Неоднозначность усиливается неизбежным влиянием реального состава технологической атмосферы в условиях реализуемого процесса и составом (сопутствующими примесями) шихтовых материалов. Поэтому оценку значимости выполненной работы правомерно делать не только с позиции материаловедения полученного сплава, но и с позиции микрометаллургического процесса при котором он был получен, т.е.

неравновесных условий затвердевания расплава. Повторюсь, наложение постоянного магнитного поля, напряженность которого имеет пространственное распределение, влияет как на расплав, так и на особенности его затвердевания и формирование магнитной структуры. Воздействие переменного магнитного поля на расплав при непрерывной разливке в кристаллизатор уже внедрено в металлургическое производство и оправдало себя. Базовая составляющая такого воздействия – это перемешивание и гомогенизация расплава, стабилизация температурного режима выдержки и слива. Безусловно, все эти составляющие могут и должны присутствовать в реализуемых исследованиях.

В технологии, когда материал плавится за счет воздействия мощного лазерного излучения на порошковую смесь из разных фракционных и морфологических составляющих разного химического состава – это сложный физико-химический процесс. Гидродинамика расплава при лазерном воздействии не менее сложна. В классическом представлении воздействие даже сильного магнитного поля на распространение лазерного луча в вакууме отсутствует. Однако для сложной гидродинамики расплава, реализуемой в аддитивных процессах лазерной наплавки в условиях наложения постоянного внешнего магнитного поля (до 1 Тл), эффекты взаимодействия такого поля с циркулирующим металлическим расплавом и синергия воздействия постоянного поля и лазерного излучения будут сопоставимы с воздействием переменного магнитного поля на расплав в известных производственных металлургических процессах.

В связи с этим, выполненные диссертационные исследования носят междисциплинарный характер. Как следствие, для их проведения потребовались комплексные исследования влияния технологических параметров реализуемого процесса на химический состав, структурно-фазовое состояние и физико-химические свойства получаемого материала. Безусловно, при междисциплинарном характере решаемой проблемы и большой многофакторности решаемых задач нужны были обоснованные ограничения и мотивированные допущения для достижения поставленной цели и доказательства выдвинутых предположений.

В диссертации они сделаны путем оптимального (с точки зрения решаемых материаловедческих задач) выбора типа магнитного сплава (сплав системы Co-Sm) и подложки (аустенитная нержавеющая сталь). При такой комбинации сплавляемых материалов (порошки кобальта и самария, сталь марки 12X18H10T) применяемыми методами исследований действительно можно с высокой степенью достоверности проследить перераспределение элементов сплавляемых материалов в объеме формирующейся наплавки при фиксированных технологических параметрах процесса. Выявленные

особенности и закономерности обосновано связать с реализуемым (наблюдаемым) структурно-фазовым состоянием в сплаве наплавки.

Понимая, что благодаря большому накопленному научному и практическому материалу о том, как структурно-фазовое состояние сплава влияет на магнитные свойства промышленно выпускаемых (Co-Sm)-магнитов, допустимо (что и сделано в диссертационных исследованиях) оптимизировать реализованный технологический процесс для получения материала с заданными функциональными и потребительскими (эксплуатационными) свойствами. Это классический материаловедческий подход для разработки новых методов получения функциональных материалов с требуемым уровнем свойств.

Опираясь именно на такой подход в выполненных диссертационных исследованиях мотивировано и целенаправленно в качестве методологии для получения магнитного сплава системы Co-Sm применены фундаментальные основы кристаллохимии формирования и устойчивости соединения Co_5Sm в неравновесных условиях быстрого охлаждения и направленного теплоотвода при закалке из жидкого состояния (ЗЖС) по технологии аддитивного процесса лазерной наплавки порошковых материалов разного химического состава в виде шихтовых компонент микрометаллургического процесса во внешнем магнитном поле.

Учитывая сказанное, предполагая продолжение выполненных исследований, можно согласиться с выносимым на защиту обобщающим положением, что была разработана «методология изготовления магнитных материалов из порошков Sm, Co и Fe на немагнитной подложке методом лазерной аддитивной технологии».

Актуальность исследования очевидна и обусловлена растущей потребностью в высокоэнергетических магнитах широкого спектра номенклатуры для энергетики, машиностроения, приборостроения, электроники и медицины, где традиционные методы производства (литье, прессование) имеют существенные ограничения по сложности геометрии.

Ключевое преимущество предлагаемого подхода – это принципиальная техническая и технологическая возможность создавать магниты сложной формы непосредственно в составе детали (как подложки) без дополнительной или специальной механической обработки. Это реализуется за счет комбинированного воздействия лазерного излучения и создаваемого контролируемого магнитного поля, что позволяет влиять на формирующуюся (при охлаждении и в процессе лазерной термообработки) доменную структуру в материале и в перспективе формировать магнитную систему с заданной конфигурацией поля.

Особую научную и практическую значимость представляют результаты диссертационной работы, касающиеся выбора (определения) технологических режимов (условий) синтеза интерметаллидов с заданными функциональными свойствами в сплавах систем Sm-Co и Sm-Fe, прежде всего обеспечивающих высокие магнитные характеристики материала (магнита) на их основе при минимальном расходе редкоземельных металлов (как шихтовых материалов).

С этой точки зрения выполненные диссертационные исследования вносят значимый вклад как в фундаментальное материаловедение (изучение неравновесных процессов кристаллизации), так и в прикладные разработки (влияние структурно-фазового состояния на магнитные свойства наплавки), отвечая на вызовы современного высокотехнологичного производства.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации. Достоверность научных результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается комплексным применением современных экспериментальных методов и методик исследований, использованием высокотехнологичного оборудования для синтеза материалов и передового (в отдельных случаях уникального) аналитического оборудования для анализа химического состава, структуры и свойств материалов.

Исследование проводилось с соблюдением стандартизированных методов статистической обработки данных и применением специализированного программного обеспечения, что гарантировало высокую точность и хорошую воспроизводимость полученных результатов.

Комплексное исследование полученных образцов включает количественный анализ структурных параметров, детальное изучение локальных неоднородностей химического (элементного) состава и прецизионные измерения магнитных свойств в широком температурном диапазоне.

Выводы работы основаны на достаточном (в отдельных случаях значительном) объеме экспериментальных данных, которые были получены с учетом требований стандартов (ГОСТов), норм используемых методов и методик и общих требований к производственному и научному экспериментам для достижения заявленной достоверности.

Логическая связь между экспериментальными результатами и теоретическими выводами прослеживается четко и соответствует общепринятым научным принципам.

Использование современных аналитических методов в сочетании с корректной методологией исследования обеспечивает высокую степень надежности представленных научных положений и обоснованность сделанных выводов.

Научная новизна и практическая значимость. Представленные в диссертационной работе научные положения, выносимые на защиту, обладают высокой степенью новизны и подтверждены комплексом взаимодополняющих экспериментальных исследований, выполненных с применением современных методик и высокоточного аналитического оборудования.

Основной научный вклад исследования заключается в применении и практической реализации инновационного метода синтеза магнитных материалов из порошков Sm, Co, Fe с использованием лазерной аддитивной технологии.

Значимым научным результатом является выявление закономерностей влияния пространственной ориентации магнитного поля по отношению к направлению процесса наплавки на формирование микроструктуры и магнитных характеристик получаемых материалов (наплавки).

Практическая значимость исследования определяется возможностью промышленного внедрения предложенной технологии, позволяющей создавать магнитные материалы с заданными свойствами для применения в высокотехнологичных отраслях промышленности. Полученные результаты открывают новые технические и технологические возможности для производства магнитов и магнитных систем сложной формы и разных размеров с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа изложена на 134 страницах, содержит 54 рисунка, 11 таблиц и 2 приложения. Состоит из введения, четырёх глав, выводов, заключения, списка литературы из 126 наименований.

Во введении обоснована актуальность и цель исследования, его новизна и практическая значимость, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены результаты обзора литературных данных, включая современные научные статьи, патенты, результаты последних НИР, НИОКР и НИОКиПТР по заявленной к исследованию проблеме. Выполнен подробный анализ современных подходов к процессам и технологии производства постоянных магнитов, прежде всего с применением РЗМ. Рассмотрены подходы и закономерности по совершенствованию составов и свойств постоянных магнитов. Описаны основные тенденции и тренды по разработки постоянных магнитов для новых задач по созданию и применению магнитных систем сложной геометрии, как по форме изделия, так и формируемому магнитному полю. Особое внимание уделено изучению взаимосвязи между технологическими приемами и ключевыми магнитными

характеристиками, такими как коэрцитивная сила и остаточная намагниченность.

Значительная часть главы посвящена технологическим аспектам производства постоянных магнитов. Автор последовательно рассматривает основные стадии (операции) технологического процесса: подготовку и сплавление исходных компонентов; измельчение и прессование порошковых материалов; термическую обработку полученных изделий. И это обосновано, так как любая из указанных операций может существенно влиять на структурно-фазовое состояние материала в готовом изделии и, как следствие, на функциональные свойства получаемого материала и конечные потребительские свойства изделия.

Проведенный в главе детальный анализ и сделанная оценка традиционных методов производства постоянных магнитов позволили автору сформулировать их принципиальные ограничения и существующие преимущества. Это и стало теоретической основой, технической и технологической посылками для разработки предложенных в диссертации инновационных решений.

Особую научную ценность в главе представляет раздел, посвященный применению аддитивных технологий в производстве магнитных материалов. В работе применительно к выбранному объекту исследований (сплавы для постоянных магнитов на основе РЗМ) систематизированы основные направления развития аддитивного производства, проанализированы ключевые технологические особенности различных методов, обоснованы преимущества аддитивных технологий для создания магнитов сложной конфигурации.

Автор в первой главе достаточно убедительно обосновал перспективность использования аддитивных процессов для изготовления магнитов из порошковых смесей (без предварительного изготовления порошков заданного химического состава). Особо выделены следующие важные аспекты: возможность управления (изменения) структурой сплава формирующегося материала; существенное сокращение расхода материала (в том числе дорогостоящего РЗМ); принципиальная возможность и гибкость в проектировании изделий со сложной геометрией.

Изложенный в главе материал свидетельствует о глубокой теоретической проработке темы и соответствует современному уровню развития науки в области материаловедения магнитных материалов и аддитивных технологий для получения таких материалов и систем (магнитных) на его основе.

Во второй главе содержится детальное описание экспериментальной части работы, включающее характеристику специализированного оборудования для создания и поддержания стабильного магнитного поля с указанием его физических характеристик и описанием технических

возможностей проведения экспериментальных исследований. Здесь же приводится описание технологической схемы изготовления экспериментальных образцов, где подробно изложены все существенные его этапы.

Созданная экспериментальная установка отличается высокой стабильностью рабочих характеристик и точностью управления технологическими параметрами.

В качестве объектов исследования и исходных материалов для реализуемого технологического процесса, использовались металлические порошки самария, кобальта и железа. Соответственно для каждого из них имеется сертификат происхождения. Тем не менее, для чистоты эксперимента и достоверности исследований были определены показатели «чистоты» (контроль примесей) и гранулометрического состава.

Методический аппарат исследования, как уже отмечалось ранее, базируется на применении современных аналитических методик. Изучение особенностей макро- и микроструктуры исходных порошков и синтезированного сплава проводилось с использованием оптической металлографии и сканирующей электронной микроскопии с функцией рентгеновского энергодисперсионного анализа (рентгеновская спектроскопия). Фазовый состав сплава и структура присутствующих в нем фаз исследовались рентгеновскими методами дифракционного анализа на современном оборудовании с применением новейшего программного обеспечения и достаточно полных баз данных (ASTM).

Магнитные характеристики образцов определялись с помощью SQUID-магнитометрии, можно сказать, на уникальном оборудовании, что обеспечило высокую чувствительность и повышенную достоверность полученных результатов.

Значительное место в работе отведено изучению влияния технологических режимов сплавления порошковых композиций в условиях магнитного поля на химическую неоднородность и структурно-фазовое состояние получаемого материала, его функциональные свойства.

Автором определены и научно обоснованы выбранные параметры реализованного процесса, включающие мощность лазерного излучения, диаметр рабочего пятна, скорость обработки и величину приложенного магнитного поля. Все предложенные методические решения соответствуют современным требованиям к материаловедческим исследованиям для магнитных материалов и подтверждены полученными экспериментальными данными.

Проведён систематизированный анализ нормативной документации, в частности государственных стандартов (ГОСТ), а также химического состава современных постоянных магнитов. С учетом полученных результатов анализа,

выполнен детальный обзор марочного ассортимента постоянных магнитов с указанием технических и технологических требований для их производства, компонентного состава, физико-химических свойств и функциональных характеристик.

На основании выполненного сравнительного исследования различных композиционных вариантов магнитного сплава, технических и технологических особенностей его промышленного производства, автором обоснован выбор конкретного химического состава для создания экспериментальных образцов для своих исследований.

Далее, во второй главе описаны разработанные технологические параметры изготовления экспериментальных образцов, включающие режимы обработки исходных материалов, временные параметры технологических процессов, а также специфику формирования конечной микроструктуры сплава материала.

Понимая значимость химического состава для формирования необходимого структурно-фазового состояния в сплаве при реализуемой технологии и особую роль структурно-фазового состояния для достижения необходимого уровня магнитных свойств материала и изделия, вполне объяснимо то, что в работе уделено повышенное внимание изучению химического состава и его неоднородностей (флуктуаций) в материале изготавливаемых экспериментальных образцов. Приведены качественные и количественные показатели содержания и распределения основных легирующих элементов в сплаве наплавки таких, как самарий, кобальт и железо. Это позволило объективно оценить состав исследуемых материалов и прогнозировать (рекомендовать) оптимальный состав магнитного сплава для его изготовления методом аддитивного процесса и наплавочной технологии в магнитном поле.

В третьей главе подробно представлено описание результатов экспериментальных исследований структурно-фазового состояния в сплавах материала экспериментальных образцов, полученных с применением предложенной автором методологии и выбранных параметров реализованного аддитивного процесса наплавочной технологии.

Важной и значимой составляющей содержания третьей главы, является детальное описание методик примененных экспериментальных исследований, включая исследования локальной химической неоднородности и микроструктуры сплава материала экспериментальных образцов с использованием сканирующей электронной микроскопии с режимом энергодисперсионного анализа и структурно-фазового анализа сплава методом рентгеновской дифракции с автоматизированной обработкой полученных данных с применением современного ПО и полной базы данных ASTM.

Кроме того, в третьей главе мотивировано, детально и достаточно полно приведены результаты экспериментальных исследований применения полистирола в качестве связующего компонента для предложенного технологического процесса. Полученные и приведенные экспериментальные результаты демонстрируют перспективность предложенного решения для улучшения качества наплаваемых структур. Найденное решение обеспечило хорошую повторяемость и высокую надежность полученных экспериментальных результатов, в том числе функциональных свойств локальных объемов синтезированного материала.

Четвёртая глава диссертационной работы представляет собой детальное описание результатов исследований магнитных свойств изготовленных экспериментальных образцов, полученных методом лазерных аддитивных технологий.

В главе подробно описаны результаты исследований на SQUID-магнитометре магнитных свойств изготовленных экспериментальных образцов. Выбранный метод и использованное оборудование, можно сказать, даже с избытком обеспечивают высокую чувствительность и повышенную достоверность полученных экспериментальных данных.

В четвертой главе диссертант приводит результаты детального анализа полученных данных магнитных свойств материала экспериментальных образцов, изготовленных из порошков Sm, Co, Fe и проводит их сравнительный анализ в зависимости от ранее полученных данных о структурно-фазовом состоянии и используемых технологических параметров реализованного процесса (для получения соответствующих экспериментальных образцов).

Отдельный анализ посвящён сравнению магнитных свойств экспериментального образца (по разрабатываемой технологии) из сплава KC25ДЦ с магнитными свойствами самого сплава KC25ДЦ, что позволяет всесторонне оценить влияние технологических параметров на конечные свойства материалов.

Такое тестирование технических и технологических особенностей влияния разрабатываемого метода на функциональные свойства классического магнитного сплава существенно повышает надежность и практическую значимость полученных в диссертационных исследованиях результатов, выводит разрабатываемый метод на возможности опытно-промышленного и промышленного производства.

Выводы по главе сформулированы чётко и логично, подчёркивая значимость полученных результатов для развития аддитивных процессов и наплавочных технологий для магнитных сплавов, содержащих РЗМ.

Практическая ценность выполненного исследования заключается в показанной возможности экспериментального создания магнитных структур с заданными свойствами, что безусловно будет востребовано в науке и производстве, прежде всего при производстве магнитных систем и изделий сложной формы с уникальными характеристиками магнитного поля.

Замечания, вопросы и рекомендации к диссертации. Они неизбежны и обусловлены актуальностью и повышенной практической значимостью выбранных объектов исследований (сплавы, содержащие РЗМ) и реализованной инновационной технологии (неравновесная кристаллизация расплава в условиях аддитивного процесса лазерной наплавочной технологии во внешнем магнитном поле). Эти два фактора объективно порождают множество дискуссионных вопросов из-за сложности реализованных физико-химических процессов, неравновесных термодинамических и кинетических закономерностей, влияния технологических примесей и неравновесных условий затвердевания на фазовое и структурное образование в выбранных сплавах в таких условиях.

Выделю, прежде всего, замечания из такого спектра, которые следует отнести к устранимым в ходе дальнейших исследований.

Это следующие замечания:

1. Несмотря на усилия по созданию защитной атмосферы проблема окисления порошков остаётся нерешённой. Автор предлагает возможные пути минимизация этого влияния, например, изменение скорости подачи аргона. Это возможно, но требует оптимизационных исследований и существенно зависит от других технических и технологических параметров процесса. Т.е. это многофакторный оптимизационный процесс и его, безусловно, надо проводить, но как самостоятельное научно-производственное исследование. Кроме этого существуют и альтернативные технические и технологические методы защиты материала при реализуемом процессе (защитные камеры с инертной или восстановительной средой) или наплавка под флюсом. К сожалению, автор в диссертации не анализирует такие возможности хотя бы в разрезе применимости их к предложенному методу.

2. Выполненные диссертационные исследования в большинстве своем опираются на результаты, полученные при неравновесной кристаллизации многокомпонентных сплавов. Наиболее близким аналогом реализуемого процесса – это закалка из жидкого состояния (ЗЖС). Выбранные для исследований сплавы (как минимум сплавы системы Co-Sm) хорошо изучены при получении с помощью метода ЗЖС. К сожалению, диссертант в своих исследованиях, прежде всего при интерпретации наблюдаемого структурно-фазового состояния и химической неоднородности в сплаве материала полученных экспериментальных образцов, хотя неравновесные условия для

аддитивного процесса наплавочной технологии и для ЖЗС технологии сопоставимы, практически не использовал такие данные. Их применение для анализа полученных экспериментальных данных в диссертационных исследованиях позволило бы существенно усилить сформулированные выводы, а главное, опираться не только на качественные, но и количественные характеристики неравновесного процесса для его оптимизации.

3. Применение в качестве шихтового материала порошка железа не совсем оправдано и избыточно. Введение указанного компонента в аддитивный процесс наплавочной технологии на подложку из нержавеющей стали аустенитного класса существенно усложняет анализ перераспределения элементов в сплаве и между сплавом и подложкой. Возникает неоднозначность оценки перераспределения атомов железа при описании процесса. А выигрыш в функциональных свойствах от введения атомов железа в магнитный сплав на основе системы Co-Sm выглядит спорным и недостаточно обоснованным.

4. Безусловно, реализованная инновационная технология аддитивного процесса наплавки магнитного сплава в магнитном поле требует применения связующего. Возможно, выбранный автором для этих целей полистирол и обеспечил достижение поставленной в диссертационных исследованиях цели. Однако указанное связующие вносит в сплав новые неметаллические легирующие компоненты, а в технологическую атмосферу - газовые компоненты. В первом случае это изменяет термодинамические условия сплавления, а во втором – физико-химические закономерности этого процесса. Обе составляющие влияют на структурно-фазовое состояние в получаемом сплаве в неравновесных условиях затвердевания и кристаллизации расплава. Причем для исследуемой системы дополнительные неметаллические элементы являются аморфизующими добавками и могут вызывать аморфное затвердевание расплава в локальных объемах (формирующихся многокомпонентных низкотемпературных эвтектик) быстро охлаждаемого расплава (где достигаются соответствующие переохлаждения) в условиях неравновесного аддитивного процесса при наплавочной технологии. В диссертации автор этому, к сожалению, не уделил достаточного внимания.

5. В диссертационной работе весьма подробно описаны технологические режимы процесса лазерной наплавки (мощность, скорость подачи порошка и т. д.), но не всегда указаны погрешности измерений приводимых параметров. Для повышения достоверности результатов желательно привести данные статистической обработки экспериментальных результатов (если это возможно, например, стандартное отклонение по нескольким образцам).

6. В разделе 4.1.4 упоминается, что SmCo_5 и $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ являются "жесткими ферромагнетиками", но не приводятся конкретные значения их

магнитных параметров для понимания и сопоставления с результатами диссертационных исследований (например, из ГОСТ 21559-76 или ТУ).

7. В разделе 4.2.2 сравниваются свойства порошка КС25ДЦ и образца №11, но не объясняется, почему коэрцитивная сила снижается после наплавки. Такой результат не кажется очевидным и требует дополнительного пояснения.

8. Учитывая, что представленная к защите диссертация содержит много новых (зачастую оригинальных) экспериментальных данных и может быть использована как хороший справочный материал для ученых и практиков, то правомерно сделать следующее замечание (которое носит рекомендательный характер): заменить низкокачественные изображения микроструктур на более чёткие снимки с расшифровкой структурных и фазовых составляющих.

9. Данное замечание в современных условиях подготовки кадров высшей квалификации становится уже привычным. В диссертации присутствуют грамматические ошибки, пунктуационные и стилистические неточности. Безусловно, их лучше устранить и многие неточности (согласование подлежащего и сказуемого; правильное использование падежей; устранение лишних предлогов) диссертант уже исправил. И даже можно отметить, что в конечном варианте диссертации их существенно меньше. Правильнее обратить внимание диссертанта на повторяющиеся специфические (скорее принятые в терминологии реального промышленного производства) выражения и определения (профессиональный жаргон). Одно такое определение («жесткий ферромагнетик») я уже приводил в ранее сделанном замечании. Но это, наверно, правомерно отнести к междисциплинарному характеру выполненных исследований: физическое материаловедение; магнитные материалы; металлургия аддитивного процесса; сварочные наплавочные технологии. Поэтому данное замечание я бы свел к рекомендации по формированию у диссертанта более совершенного индивидуального стиля научного письма и более требовательного отношения к общепринятой научной терминологии.

10. В целях повышения научной ценности и практической значимости полученных результатов рекомендую при дальнейших исследованиях сосредоточиться на следующих принципиальных моментах. Прежде всего, разграничить полученные экспериментальные данные и провести их более детальный сравнительный анализ, в том числе опираясь на результаты литературных данных, как минимум, о полученных для технологии ЗЖС (закалка из жидкого состояния на барабан или газового распыления расплава инертным газом) и осаждения из парогазовой фазы (например, магнетронное напыление) по структурно-фазовому состоянию и магнитным свойствам сплавов систем Sm-Co и Sm-Fe. Расширить область исследований на другой вид подложек. Здесь перспективными с точки зрения формирования промышленно

значимых магнитных систем являются подложки из материала с высокой магнитной проницаемостью (трансформаторные стали и другие магнитомягкие материалы).

Заключение

Диссертационная работа Яцко Дмитрия Сергеевича представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой автор на высоком научно-практическом уровне решил задачу применения аддитивных технологий для изготовления магнитных материалов сплавов системы Co-Sm и Fe-Sm. Сделанные выводы, выявленные закономерности и сформулированные рекомендации базируются на достоверных экспериментальных и теоретических данных, научно обоснованы и подтверждаются общепринятыми положениями в соответствующих областях знаний.

Представленная диссертация по теме «Создание магнитного материала из порошков Sm, Co и Fe методом лазерных аддитивных технологий в постоянных магнитных полях» соответствует требованиям ВАК РФ.

Учитывая все сказанное, считаю, что Яцко Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – «Материаловедение».

Официальный оппонент, доктор физ. – мат. наук по специальности 01.04.07 – «Физика твердого тела», заведующий лабораторией физического материаловедения, профессор Высшей школы нанотехнологий и инженерии Образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий» ФГАОУВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», профессор +7 906 218-47-07; e-mail: VVSavin@kantiana.ru

В.В. Савин

Подпись Савина Валерия Васильевича заверяю:

Ученый секретарь Ученого Совета
ФГАОУВО «БФУ им. И. Канта»
AShpilevoi@kantiana.ru
+7 (4012) 59-55-95 #4550

«__09__» сентября 2025 г.

