

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор ИРНИТУ

доктор технических наук,

Корняков Михаил Викторович



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Яцко Дмитрия Сергеевича

«Создание магнитного материала из порошков Sm, Co и Fe методом лазерных аддитивных технологий на немагнитной подложке в постоянных магнитных полях»,

представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение

### Актуальность темы исследования

Магнитные материалы являются ключевыми компонентами для современной техники, обеспечивая функционирование электродвигателей, генераторов, систем хранения данных и медицинской аппаратуры. Их способность управлять электромагнитной энергией делает их незаменимыми для энергетики, электротранспорта и высокотехнологичных производств. В связи с этим актуальной является диссертационная работа Яцко Д.С., направленная на разработку нового магнитного материала из порошков Sm-Co-Fe с использованием лазерных аддитивных технологий. Целью работы является создание контролируемого процесса формирования магнитных структур на металлических подложках, находящихся в магнитном поле, что открывает перспективы для автоматизированного производства магнитов с сокращением расхода дефицитных редкоземельных металлов.

Диссертационная работа Яцко Д.С. вносит вклад в понимание механизмов формирования магнитных материалов методом лазерных аддитивных технологий, что, в дальнейшем позволит разработать технологию изготовления постоянных магнитов сложной формы, используя аддитивные технологии.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 15-12-00032 «Изучение механизмов формирования локальных зон заданной

конфигурации, обладающих магнитными свойствами, в процессе сплавления частиц на металлической подложке при воздействии лазерного излучения» в период с 2015 по 2017 гг.

### **Общая характеристика работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 126 наименований и 2 приложений. Работа изложена на 134 листах машинописного текста, содержит 54 рисунка и 11 таблиц.

**Во введении** изложены актуальность выбранной темы, степень её научной разработанности. Представлена цель исследования, новизна, практическая значимость, степень достоверности полученных результатов. Сформулированы положения, выносимые на защиту и личный вклад автора.

**В первой главе** диссертационной работы представлен аналитический обзор состава и структуры магнитных материалов, их эволюция и практическое применение. Отдельное внимание уделено развитию технологий производства постоянных магнитов на основе редкоземельных металлов.

В главе убедительно продемонстрирована значимость магнитных материалов в современной промышленности, начиная от авиастроения и заканчивая оптическими системами. Автор грамотно систематизирует информацию о различных типах постоянных магнитов, их характеристиках и областях применения, что позволяет сформировать целостное представление о предмете исследования.

Значительное внимание уделяется анализу существующих технологий производства магнитных материалов. Автор детально рассматривает как традиционные методы (литъе, прессование), так и современные подходы, включая аддитивные технологии. Особенно важным представляется анализ преимуществ последних, таких как экономия материалов и времени производства, что особенно актуально при работе с дорогостоящими редкоземельными металлами.

Отдельно следует отметить качественный обзор современного состояния исследований в области аддитивных технологий. Автор успешно систематизирует существующие подходы, выделяя их преимущества и недостатки, что создаёт прочную основу для дальнейшего изложения собственных исследований.

В главе представлен подробный анализ различных групп аддитивных технологий, включая струйное нанесение материалов, фотополимеризацию и синтез на подложке. Особенно ценным является рассмотрение современных классификаций АТ, что демонстрирует глубокое понимание автором

нормативной базы исследования.

**Во второй главе** представлены сведения технического и методического обеспечения процессов формирования магнитных структур методом лазерных аддитивных технологий. В главе детально описывается применяемая экспериментальная установка для наплавки металлических порошков с использованием лазерного излучения. Отдельное внимание уделено форме, химическому и гранулометрическому составу применяемых в работе металлических порошков.

В главе подробно описаны методы исследования микроструктуры и магнитных свойств полученных образцов. Автор использует современное аналитическое оборудование: металлографический микроскоп, сканирующий электронный микроскоп, рентгеновский дифрактометр и СКВИД-магнитометр.

Представлен детальный анализ существующих марок постоянных магнитов, их химического состава и основных магнитных параметров. Автор последовательно рассматривает различные марки магнитных материалов на основе самария, кобальта, и неодима, что позволяет сформировать полное представление о современном состоянии производства постоянных магнитов. Автор демонстрирует понимание предметной области, анализируя не только химический состав материалов, но и их практическое применение.

Однако по тексту есть некоторые вопросы, так например, на странице 37 автор указывает: «*Режим наплавки магнитных структур определялся экспериментальным путём. Как показали результаты исследований, оптимальная мощность лазерного излучения составляет: 600 Вт для Sm и 500 Вт Fe. При использовании указанной мощности лазерного излучения происходит плавление металла без его испарения.*

На странице 37 есть указание: «*В работе использован газ аргон марки А с добавлением 7±2% гелия*». Но по тексту нет пояснения, зачем и почему 7%?

На странице 38 уже другой режим: «*В результате проделанной работы был определён режим наплавки композиций порошков самария (37%) и кобальта (63%) на нержавеющую сталь марки 12Х18Н10Т. Наплавка композиций порошков проведена в среде защитных газов (argon+гелий) температурой 22 °С, предотвращающих окисление металла. Скорость движения лазерного пятна по поверхности подложки равнялась 10 мм/с а мощность лазерного излучения 350 Вт*».

На странице 39 еще один режим: «*Для исследования получаемых магнитных структур было подготовлено три образца. Так-как образцы исследованы с целью определения оптимальных режимов данной серии*

образцов были присвоены номера 0.1,0.2 и 0.3. Образец 0.1, полученный из сплавленного порошка SmCo в соотношении 37 Sm к 63 Co (по массе). Сплавленного в магнитном поле лазерным излучением мощностью 1000Вт. Образец 0.2 получен посредством сплавления двух цилиндров при мощности 1000 Вт, для получения образца большей толщины. Образец 0.3 получен посредством сплавления двух цилиндров на мощность 1000 Вт на первом цилиндре и 800 Вт на втором».

На страницах 43-53 в **пункте 2.3 Анализ марок постоянных магнитов**, во первых не обозначены составы марок постоянных магнитов, которые были взяты за прототипы по процентному содержанию элементов. Во-вторых нарушена нумерация таблиц было 2.1- 2.8, а на странице 52-53, появилась нумерация 3.8.-3.9.

Далее по тексту есть еще вопросы:

«Образец №1 изготовлен методом послойного наплавления порошков самария (Sm) и железа (Fe), на основу из 12Х18Н10Т. Каждый слой порошка сплавлялся лазерным излучением мощностью 600 Вт для Sm и 500 Вт для Fe. Площадь поверхности наплавленного материала равна 25x23 мм<sup>2</sup>. В процессе получения на образец 1 воздействовало постоянное магнитное поле напряжённостью 500-540 мТл. Первый образец является начальной точкой, от которой будут вестись остальные исследования и сравнения».

Однако ранее автор пишет на странице 37: «Для разработки технологии создания магнитных структур использованы порошки Sm, Co, Fe, сплав КС25ДЦ и их композиции. Порошки готовились в стеклянной таре, посредством гомогенного смещивания порошков».

*Вопрос, послойное наплавление каждого порошка по отдельности или была гомогенная композиция Sm-Fe?*

Образец №2,3,4, также согласно текста диссертации, изготовлен методом послойного наплавления порошков самария (Sm) и железа (Fe), на основу из 12Х18Н10Т.

«Образец №5 изготовлен методом наплавления спрессованной композиции порошков Sm и Co (5:8) лазерным излучением на подложку из 12Х18Н10Т в постоянном магнитном поле напряжённостью 500-540 мТл. Исследование полученной структуры позволит оценить перспективность работы со спрессованными материалами.

*Образец №6 изготовлен методом последовательной лазерной наплавкой порошков самария (Sm) и кобальта (Co) на подложку из*

*12X18H10T в постоянном магнитном поле напряжённостью 500-540 мТл. Каждый слой порошка сплавлялся лазерным излучением мощностью 600 Вт для Sm и 200 Вт для Co.*

*Образец №7 изготовлен методом последовательной лазерной наплавкой порошков самария (Sm) и кобальта (Co) на подложку из 12X18H10T в постоянном магнитном поле напряжённостью 500-540 мТл. Каждый слой порошка сплавлялся лазерным излучением мощностью 600 Вт для Sm и 200 Вт для Co. Для повышения качества защитной атмосферы использован сосуд с высокими стенками, предотвращающий утечку аргона.*

*Образец №8 изготовлен методом последовательной лазерной наплавкой порошка самария (Sm) и кобальта (Co) на подложке из сплава АМг3.*

*Образец №9 изготовлен методом последовательной лазерной наплавкой порошка самария (Sm) и железа (Fe) на подложку из сплава АМг3 без воздействия внешнего магнитного поля. Каждый слой порошка сплавлялся лазерным излучением мощностью 600 Вт для Sm и 500 Вт для Fe. Для повышения качества защитной атмосферы использован сосуд с высокими стенками, предотвращающий утечку аргона.*

*Образец №10 изготовлен методом последовательной лазерной наплавкой порошка самария (Sm) и железа (Fe) на подложку из сплава АМг3 в постоянном магнитном поле напряжённостью 500-540 мТл. Каждый слой порошка сплавлялся лазерным излучением мощностью 600 Вт для Sm и 500 Вт для Fe. Для повышения качества защитной атмосферы использован сосуд с высокими стенками, предотвращающий утечку аргона».*

*В выводах по главе 2 сказано: «Были определены основные режимы для работы с металлическими порошками Sm, Co, Fe и их композиций».*

Однако из теста главы 2 это не следует, так как не совсем ясно, что было взято за основу оптимизации режимов – магнитные свойства или качество (отсутствие трещин, пор, не сплавления) получаемых образцов. Важно отметить, что по тексту главы 2 нет упоминания сколько слоев, было наплавлено, диаметр пятна нагрева, скорость наплавки.

**В третьей главе** диссертационной работы представлены результаты комплексного экспериментального исследования структуры и состава материалов, полученных методом лазерных аддитивных технологий. Автор последовательно проводит анализ различных аспектов исследуемых образцов, что позволяет получить целостное представление о свойствах созданных материалов. Проведено детальное исследование образцов из композиций порошков Sm-Co и Sm-Fe, включающее анализ их состава и

фазового строения.

Особого внимания заслуживает исследование влияния различных связующих материалов (канифоли и полистирола) на структуру и свойства получаемых материалов. Установленные закономерности позволяют оптимизировать технологический процесс и получать материалы с задаваемыми характеристиками.

В тоже время отметим на некоторые вопросы, которые возникают при прочтении текста. Так, например на странице 93, приведены выводы по главе:

*«Проведённый структурно-фазовый анализ показал, что в образцах присутствуют оксиды. Предположительно, причиной появления оксидов, несмотря на меты по созданию защитной атмосферы, стало применение связующего в виде раствора канифоли в изопропиловом спирте».*

Есть опечатка -меты.

Предположение о появлении оксидов из раствора канифоли в изопропиловом спирте не обосновано.

Далее автор пишет: «*При исследовании микроструктуры обнаружены дефекты в виде пор и трещин микрометрового размера*».

Однако нет анализа появления пор и трещин. Что послужило причиной образования. Нет мер по снижению поробразования и трещинообразования

Автор без доказательно утверждает: «*Также, исследование микроструктуры показало, что направление магнитного поля не оказывает заметного воздействия на направление роста зёрен и микроструктуру в целом*».

Автор считает: «*Определено, что изготовление образцов методом послойной наплавки порошков Sm, Co и Fe не имеет существенных преимуществ, в сравнении с изготовлением образцов методом сплавления композиции порошков*».

Необходимо отметить, что это не совсем корректное утверждение и оно не подкреплено экспериментальными результатами, представленными в главе 3.

**В четвертой главе** диссертационной работы представлены результаты комплексного экспериментального исследования магнитных свойств материалов, полученных методом лазерных аддитивных технологий. Изучено влияние методов лазерной наплавки порошков на их магнитные характеристики, что позволяет выявить ключевые факторы, определяющие конечные свойства материалов.

В тоже время не совсем понятно из текста на странице 94, почему были взяты для исследования образец 1 и 2 в сравнении. Если ранее по

тексту было отмечено, что в образце № 1 имеются многочисленные макро и микротрешины.

Далее автор пишет на странице 96: «Следовательно, не зависимо от состояния микроструктуры, состава сплавов сформированных на основе атомов железа и различий в распределении атомов Sm по толщине слоя намагниченность насыщения и коэрцитивная силы изменяются незначительно».

Однако согласно методике эксперимента изложенной на странице 54, на образец №1 в процессе наплавления воздействовало постоянное магнитное поле напряжённостью 500-540 мТл, а на образец №2 такого воздействия не было.

Возникает вопрос, если намагниченность насыщения и коэрцитивная силы изменяются незначительно в образцах с магнитным воздействием и без него, тогда зачем нам необходимо это воздействие?

В работе представлен подробный анализ магнитных свойств образцов, включая исследование петель магнитного гистерезиса, температурной зависимости намагниченности и других важных параметров. Полученные результаты имеют как теоретическое, так и практическое значение, поскольку позволяют прогнозировать поведение материалов в различных условиях эксплуатации.

В целом необходимо отметить, что автор успешно решает поставленные задачи, демонстрируя способность к глубокому анализу полученных данных и формулировке обоснованных выводов. Проведенные исследования вносят существенный вклад в развитие методов получения магнитных материалов с использованием лазерных аддитивных технологий.

В заключении выполнено обобщение полученных в ходе исследования данных, сформулированы основные научные результаты, их практическая значимость и перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации. Рукопись диссертации и автореферат оформлены в соответствии с требованиями ВАК. Полученные соискателем результаты обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в журналах, периодических изданиях, включённых в перечень ВАК при министерстве образования и науки РФ, а также в изданиях, приравненных к ним. Всего опубликовано 10 научных работ. Основные результаты представлены в работах:

1. Яцко, Д.С. Структура и магнитные свойства слоёв, сформированных методом лазерного наплавления порошков на немагнитных подложках / Н.Г.

Галкин, Д.С. Яцко, Е.П. Субботин, Ю.Н. Кульчин, И.Н. Завестовская. — Текст: электронный // Краткие сообщения по физике физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук. — 2015. — Т. 42. — №12. — С. 50-55. — Перечень ВАК.

<https://ksf.lebedev.ru/contents.php?post=1&year=2015&number=12&pages=&z=0&i=8>

2. Яцко, Д. С. Аддитивные технологии для создания магнитных материалов / Д. С. Яцко. — Текст: электронный // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. №11 (149). С.17-23. doi: 10.30987/2223-4608-2023-17-23. — К2. — Перечень ВАК.

<https://naukaru.ru/ru/nauka/article/71603/view>

3. Яцко, Д. С. Исследование влияния органических связующих на микроструктуру образцов лазерной порошковой наплавки порошков SmFe в магнитном поле / Д. С. Яцко. — Текст: электронный // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2024. №2 (152). С.3-11. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-11. — К2. — Перечень ВАК.

<https://naukaru.ru/ru/nauka/article/75442/view>

### **Научная новизна и основные результаты исследования**

Научная новизна работы заключается в разработке новой методологии контролируемого синтеза магнитных материалов из порошков Sm, Co, Fe, реализуемой посредством лазерного аддитивного сплавления порошковых композиций для получения постоянных магнитов со сложной формой магнитного поля. При этом в диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся новизной:

1. Разработан физико-химический процесс изготовления магнитного материала из порошков Sm, Co, Fe на немагнитной подложке методом лазерной аддитивной технологии, позволяющий создавать постоянные магниты с магнитными полями сложной формы.
2. Экспериментально определены рациональные характеристики защитной среды и параметры лазерного излучения, действующие на композиции порошков Sm<sub>20</sub>Fe<sub>80</sub> и Sm<sub>37</sub>Co<sub>63</sub> со связующим веществом (канифоли, полистирола) в постоянном магнитном поле индукцией 500-540 мТл, на металлической немагнитной подложке без дополнительного спекания.
3. Установлены закономерности формирования микроструктуры при лазерной наплавке композиции порошков Sm<sub>20</sub>Fe<sub>80</sub>, и Sm<sub>37</sub>Co<sub>63</sub> на немагнитную металлическую подложку. Обнаружено, что состав наплавляемого материала усредняется между наплавляемым материалом и

ванной расплава. При этом диффузия между наплавляемым материалом и предыдущим слоем наплавки отсутствует, что существенно снижает проникновение элементов подложки при многослойной наплавке.

### **Значимость полученных автором результатов диссертации для развития соответствующей отрасли науки**

1. Разработаны основы технологии производства постоянных магнитов из порошков Sm, Co и Fe методом лазерной аддитивной технологии на немагнитной подложке, позволяющей сделать магнитный материал неотъемлемой частью конструкции.
2. Предложен способ удержания металлических порошков при их лазерном сплавлении в магнитном поле на немагнитной подложке с применением связующего агента, защищающего порошок от окисления, и позволяющего получить магнитный материал с однородной структурой.
3. Определены состав, структура и магнитные свойства магнитного материала из порошков Sm, Co и Fe, полученного методом лазерной аддитивной технологии.
4. Результаты работы внедрены в учебный процесс бакалавриата по дисциплинам учебного плана «Аддитивные технологии в машиностроении» и «Металловедение и термическая обработка в сварочном и аддитивном производстве».
5. Результаты диссертационной работы использованы при освоении и внедрении в производство технологических процессов восстановления деталей ремонтируемой авиационной техники в АО «322 АРЗ».

### **Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений**

Основные положения диссертационной работы подтверждены детальным анализом результатов, полученных с применением современных методов анализа. Выводы работы объективны, достоверны и соответствуют поставленным задачам. Практические рекомендации предлагают пути внедрения разработанной технологии контролируемого синтеза магнитных материалов из порошков Sm, Co, Fe, реализуемой посредством лазерного аддитивного сплавления. Обоснованность выводов и рекомендаций подтверждается значительным объемом экспериментальных исследований и актом внедрения.

**По диссертационной работе Яцко Дмитрия Сергеевича имеются следующие замечания:**

- 1 В работе отсутствует детальный анализ существующих методов

контроля качества получаемых магнитных материалов, что затрудняет оценку достоверности полученных результатов и воспроизводимости эксперимента.

2 В разделе, посвящённом исследованию магнитных свойств, не представлен сравнительный анализ полученных результатов с теоретическими расчётом и литературными данными, что снижает научную ценность работы.

3 Методика подготовки образцов для исследования требует более детального описания, особенно в части гомогенизации смесей порошков и контроля их качества перед наплавкой.

4 В работе недостаточно внимания уделено вопросам влияния параметров лазерного излучения на микроструктуру получаемых материалов, что могло бы расширить понимание механизмов формирования магнитных свойств.

5 В описании экспериментальной части не представлены данные о воспроизводимости результатов и статистической обработке полученных данных, что является важным для подтверждения достоверности выводов.

6 Методика фиксации порошков в магнитном поле требует более детального описания и обоснования выбора конкретных связующих материалов (канифоль, полистирол).

### **Заключение**

Отмеченные замечания по работе не снижают теоретическую и практическую значимость работы, выполненной на высоком уровне. Полученные в диссертации результаты соответствуют поставленной цели. Представляемая работа Яцко Дмитрия Сергеевича «Создание магнитного материала из порошков Sm, Co и Fe методом лазерных аддитивных технологий на немагнитной подложке в постоянных магнитных полях» является законченной научно-квалификационной работой, сочетающей фундаментальные научные результаты и практические разработки. Результаты исследования расширяют область применения лазерных аддитивных технологий для изготовления магнитных материалов. Научная новизна подтверждается наличием акта об использовании результатов работы в учебном процессе, а практическая значимость подтверждается наличием справки о внедрении на производстве.

По своей актуальности, научной новизне, уровню выполнения, объёму, научной и практической значимости диссертационная работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по пунктам 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого

постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 № 842 (ред. от 16.10.2024). Автор диссертации, Яцко Дмитрий Сергеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Диссертационная работа, автореферат и содержание отзыва обсуждены и одобрены на заседании кафедры Материаловедения, сварочных и аддитивных технологий ИРНИТУ, протокол № 1 от «9» сентября 2025 года.

На заседании присутствовало 11 человек. Результаты голосования: «за» – 11; «против» – 0; «воздержались» – 0.

**Составитель отзыва:** Заведующий кафедрой материаловедения, сварочных и аддитивных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Иркутский национальный исследовательский технический университет" (ИРНИТУ), кандидат технических наук, доцент, Балановский Андрей Евгеньевич, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, e-mail: fuco.64@mail.ru



Балановский Андрей Евгеньевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ИРНИТУ).

Адрес: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83,  
тел/факс 8 (3952) 405-100, 405-009,  
e-mail: info@istu.edu

«10» сентября 2025 г.



Специалист по управлению  
персоналом 1 категории