

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе НИТУ МИСИС,
профессор, д.т.н.



М.Р. Филонов

«_____» апреля 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Жукова Антона Сергеевича на тему «Разработка технологии селективного лазерного сплавления ферромагнитных материалов системы Fe-Cr-Ni(-Co) для получения на их основе элементов навигационной техники», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

Актуальность темы диссертационной работы

Одной из ключевых тенденций современного научно-технологического развития является разработка и повсеместное внедрение в промышленное производство аддитивных технологий, к числу важнейших из которых относится селективное лазерное сплавление (СЛС) металлических порошков. Данная технология обладает рядом преимуществ перед традиционными порошковыми и литейными технологиями, как с точки зрения экономических показателей (сокращение цикла производства, материальных затрат и потребляемой энергии), так и с точки зрения достигаемого уровня физико-механических свойств. Однако в области приборостроения и навигационной техники аддитивные технологии пока не нашли широкого применения. Как известно, в устройствах и системах такого типа детали из прецизионных магнитотвердых и магнитомягких сплавов играют существенную роль: служат источником или усилителем основного сигнала, являются экранирующими элементами, по существу, определяя точность и надежность их работы. Для примера, в настоящее время постоянные магниты для гирокоординаторов изготавливаются литьем, а элементы экранирующих корпусов – вытачиванием из заготовок, полученных деформационной обработкой. Это приводит к образованию большого количества отходов при малосерийном производстве уникальных изделий, а при

Федеральный научный центр физико-химических исследований ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 1289/17	в ДЕЛО
«24» 04 2025 г.	№ _____
Осн. 12 л.	подп. _____
Прил. — л.	

литье – к образованию дефектов типа раковин, трещин, засоров и др., что существенно снижает их механические и магнитные свойства. Кроме этого, традиционное литье не позволяет поддерживать высокий темп производства или быстро переходить на другие типоразмеры. С этой точки зрения, разработка и внедрение аддитивной технологии СЛС позволит минимизировать затраты на механообработку изделий, оптимизировать производственный цикл, сократить сроки постановки на производство и существенно расширить номенклатуру выпускаемых изделий.

Учитывая вышесказанное, тема диссертационной работы Жукова Антона Сергеевича, направленной на разработку технологии селективного лазерного сплавления ферромагнитных материалов системы Fe-Cr-Ni(-Co) для получения на их основе элементов навигационной техники представляется **очень актуальной**, а апробация разрабатываемой технологии на примере изготовления кольцевых постоянных магнитов из сплавов типа 25X15KA и ЮНДК, и магнитоэкранирующих корпусов из сплава 80НХС безусловно будут востребованы приборостроительными предприятиями и конструкторскими бюро.

Структура, объём и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня обозначений и сокращений, списка цитируемой литературы и шести приложений. Работа изложена на 210 страницах машинописного текста, включая 103 рисунка, 23 таблицы, списка литературы из 164 наименований и 6 приложений.

Во Введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, изложены научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Приведены основные положения, выносимые на защиту, а также сведения об обосновании достоверности результатов работы, апробация результатов и личный вклад автора. Описаны структура и объём диссертационной работы.

В первой главе приведен обзор и анализ литературных данных по теме диссертации, в котором изложены проблемы создания элементов навигационных систем, основное внимание при этом уделено динамически настраиваемым гироскопам, которые создаются с использованием магнитотвердых материалов, в том числе исследуемые в работе сплавы на основе систем Fe-Cr-Co и Fe-Ni-Al-Co, и нержавеющей сталей. Отдельно рассмотрены проблемы селективного лазерного спекания применительно к прецизионным

сплавам типа нержавеющей сталей AISI 316L и отечественной 12X18H10T, пермаллоев и магнитотвердых материалов (МТМ) на основе Nd-Fe-B, Sm-Co, Fe-Al-Ni-Co-Cu. Показано, что возможно получение аддитивными методами магнитных материалов со свойствами, не уступающими материалам, полученным по традиционным технологиям. В заключение главы 1 приведены цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе описаны исходные материалы – модельные порошки нержавеющей сталей и ПЖРВ (порошок железа, распыленного водой), порошки ферромагнитных материалов – магнитомягкого сплава 80НХС, магнитотвердых сплавов 25Х15К и ЮНДК. Описан способ получения порошков, отсутствующих в свободной продаже, магнитомягкого сплава 80НХС и магнитотвердых сплавов 25Х15К и ЮНДК методом атомизации расплава. Из полученных порошков ситовым методом отбиралась фракция с размером сферических частиц не менее 80 мкм. Также представлены методики исследований, включая методы рентгенофлуоресцентный, лазерной дифракции, определения текучести и насыпной плотности порошков, измерения плотности, измерения механических свойств, измерения магнитных свойств, электронной микроскопии. Также описано технологическое оборудование для селективного лазерного сплавления, термическое оборудование и оборудование для термомагнитной обработки магнитотвердых сплавов.

В третьей главе изложены результаты исследования порошков прецизионных сплавов и процесса их селективного лазерного сплавления. Первоначально описано изготовление методом распыления расплава порошков прецизионных сплавов, которые не удалось приобрести в готовом порошковом виде – магнитомягкого сплава 80НХС, 25Х15К и ЮНДК. Проведен химический состав порошков, полученных распылением расплавов, и их гранулометрический анализ. Показано, что порошковые смеси состоят на 90 % из частиц с размером частиц не более 52,8 мкм для сплава 25Х15К и 60,3 мкм для сплава ЮНДК. Для магнитомягкого сплава 80НХС – 77,1 мкм при выходе годного 93 %. Установлено, что принципиальной зависимости между текучестью и насыпной плотностью порошков не прослеживается. Необходимо вводить параметр скорости истечения из воронки Холла, так как для него наблюдается линейная зависимость от текучести.

Установлено, что при селективном лазерном сплавлении порошков прецизионных сплавов 80НХС, 25Х15К и ЮНДК в интервале энерговложений $0,23 \div 0,37 \text{ Вт} \cdot \text{с/мм}$ достигается пористость менее 1 %, если 10 % частиц порошка имеют диаметр не более 12 мкм, 50 % частиц порошка имеют диаметр не более 37 мкм и 90 % частиц порошка имеют диаметр не более 77 мкм. Самым широким диапазоном параметров сплавления обладает сплав ЮНДК. При селективном лазерном сплавлении порошков аустенитных сталей и ПЖРВ, у которых 50 % частиц порошка и 90 % частиц порошка имеют диаметр не более 30 мкм и 80 мкм, соответственно, пористость составляет не более 2 %, а интервал энерговложений сужается и составляет от 0,30 до 0,35 $\text{Вт} \cdot \text{с/мм}$.

В четвертой главе представлены результаты изучения структуры, механических и магнитных свойств аустенитных сталей и прецизионных сплавов, представляющие основную часть диссертационного исследования. Приведены результаты измерения предела текучести, временного сопротивления, ударной вязкости, твердости, в том числе, установлена их анизотропия относительно направления построения и зависимости магнитных и механических свойств аддитивных материалов от режимов лазерного сплавления. К наиболее интересным результатам данной главы необходимо отнести следующее: показано, что у всех исследуемых сплавов после СЛС прочностные свойства выше, чем у тех же сплавов, полученных традиционными технологиями. Интересны результаты по выявленным мелкозернистым структурам полученных СЛС сплавов и их дефектности. В структурах аддитивных материалов основными составляющими отмечены частично перекрывающиеся капли – полусферы, или микрованны расплава, образованные послойным проплавлением частиц порошка, наносимого на выращиваемую поверхность, и последующей кристаллизацией расплава. На микроуровне, проведенный EBSD анализ аддитивных ферромагнитных сплавов подтвердил их мелкозернистую структуру. В диссертационной работе показано, что магнитные характеристики зависят сплава 80НХС зависят от размера зерна и что мелкозернистое строение аддитивных образцов сплавов ПЖРВ и 80НХС отрицательно сказывается на магнитных свойствах.

В аддитивных и литых образцах сплава 25Х15КА обнаружены дисперсные частицы различной морфологии и размеров, было выявлено некоторые отличия как между составами основного металла, так и дисперсных включений аддитивного и литого

образцов. Включения в аддитивном образце значительно более мелкие, что может дополнительно способствовать росту коэрцитивной силы по индукции и увеличивает прочностные свойства. Для сплава 25Х15КА после СЛС определен режим терромагнитной обработки, позволяющий обеспечить высокий уровень магнитных свойств (магнитная индукция 1,24 Тл, коэрцитивная сила по индукции 45,7 кА/м, максимальное энергетическое произведение 32,2 кДж/м³). Показано, что магнитные характеристики зависят от размера зерна и что мелкозернистое строение аддитивных образцов положительно сказывается на магнитных свойствах магнитотвердых материалов. Показано, что технологическое оборудование не позволили изготовить образцы из сплава ЮНДК требуемого качества и данный чрезвычайно чувствителен к большим скоростям охлаждения и возникающим напряжениям. На примере сплава ЮНДК показано, что при селективном лазерном сплавлении хрупких сплавов, чрезвычайно чувствительных к большим скоростям охлаждения и возникающим напряжениям, необходимо применять кольцевые режимы сканирования вместо линейных. Показано, что структура полученных кольцевым сканированием образцов отличается отсутствием трещин в объеме образца, но содержит крупные поры.

Экспериментально подобран режим ТО (1300 °С при времени изотермической выдержки 9 ч), позволяющий укрупнить размер зерна сплава 80НХС, полученного селективным лазерным сплавлением, до ~300 мкм, что позволило достигнуть следующего уровня магнитных свойств: магнитная проницаемость 35710 Гс/Э и индукция 0,63 Тл, что сопоставимо со свойствами образцов, выточенных из кованных заготовок. Уточнено, что полученные магнитные характеристики СЛС материала удовлетворяют требованиям, предъявляемым АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» к изделиям из сплава 80НХС.

В пятой главе описана разработка технологии изготовления изделий из прецизионных сплавов методом СЛС – кольцевых магнитов из сплава 25Х15КА и корпусов гироскопов из сплава 80НХС.

Для сплава 25Х15КА разработана технология получения смесей сферических и осколочных порошков. Создана установка струйного измельчения порошков прецизионных сплавов для получения порошков осколочной формы дисперсностью менее 80 мкм из сферических порошков дисперсностью более 80 мкм. Изготовлена опытная

партия магнитов, которая прошла успешные испытания на АО «Спецмагнит», что подтверждено заключением главного технолога и актом внедрения в производственную деятельность, получен патент на изобретение.

Разработан технологический процесс изготовления экранирующих корпусов гироскопов из магнитомягкого сплава 80НХС методом СЛС, что подтверждено актом внедрения в производственную деятельность АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (г. Санкт-Петербург), и патентом на изобретение.

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

На защиту автор выносит четыре положения, обоснованных в диссертационной работе в главах со второй по пятую.

В первом положении рассматривается влияние фракционного состава порошков на их текучесть и насыпную плотность, а также пористость образцов из исследуемых сплавов, полученных методом СЛС.

Во втором положении обсуждается влияние режимов сплавления на магнитные и механические свойства образцов исследованных ферромагнитных материалов, полученных методом СЛС.

В третьем положении представлены оптимальные режимы термической обработки изделий из магнитомягкого сплава 80НХС и термомагнитной обработки образцов магнитотвердого сплава 25Х15КА, полученных методом СЛС.

В четвёртом положении обсуждаются результаты испытаний элементов изделий навигационной техники заданной геометрической формы из прецизионных сплавов 80НХС и 25Х15КА, полученных СЛС соответствующих порошков.

Научная новизна

В ряду результатов диссертационной работы Жукова Антона Сергеевича, обладающих **несомненной научной новизной**, можно отнести следующие.

1. Полученные экспериментальные зависимости пористости образцов прецизионных сплавов 80НХС, 25Х15К и ЮНДК, изготовленных методом СЛС, от гранулометрического состава сплавляемых порошков соответствующих марок и параметров энерговложения.

2. Установлением режима термической обработки образцов сплава 80НХС, полученных методом СЛС, заключающегося в выдержке в течение 9 ч при температуре 1300 °С, позволившего получить микроструктуру со средним размером зёрен 300 мкм, обеспечившей достижение максимальной магнитной проницаемости 35710 Гс/Э.

3. Предложенный метод повышения коэффициента использования порошка сплава 25Х15К за счет доизмельчения сферического порошка дисперсностью более 80 мкм и смешивания получаемого осколочного порошка дисперсностью менее 80 мкм со сферическим порошком дисперсностью менее 80 мкм.

4. Достигнутые у образцов сплавов 25Х15К, 80НХС и ПЖРВ после СЛС более высокие значения коэрцитивной силы, чем у аналогичных материалов, полученных традиционными металлургическими методами.

Практическая значимость

К числу наиболее интересных результатов диссертационного исследования Жукова Антона Сергеевича, безусловно обладающих высокой **практической значимостью**, необходимо отнести:

1. Разработку технологического процесса и установки для струйного измельчения порошков магнитотвердых сплавов 25Х15К и ЮНДК, обеспечивающую достаточно высокую однородность фракций порошинок и близкую к сферической форму частиц.

2. Разработку технологического процесса СЛС порошков сплава 25Х15КА при получении магнитов кольцевой формы, обладающими более высокими магнитными свойствами, чем у сплава, получаемого по традиционной технологии. По результатам данной работы получен патент и осуществлено внедрение технологии в промышленное производство.

3. Разработан технологический процесс изготовления экранирующих корпусов гироскопов методом СЛС из порошка сплава 80НХС. Научная новизна и практическая значимость полученных результатов также подтверждены патентом и внедрены в производство.

Соответствие диссертационной работы критериям, предъявляемым к диссертациям. Диссертационная работа Жукова Антона Сергеевича на соискание учёной степени кандидата наук является **законченной** научно-квалификационной работой, в

которой содержится решение научной задачи, направленной на разработку технологии СЛС порошков ферромагнитных материалов системы Fe-Cr-Ni(-Co) для получения на их основе элементов навигационной техники, имеющей важное значение для развития отечественного приборостроения.

Диссертационная работа Жукова Антона Сергеевича обладает внутренним единством, изложена логично и корректно, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о значительном вкладе автора диссертации в науку. В диссертации приводятся сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов.

Предложенные автором диссертации решения достаточно аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями.

Достоверность результатов работы обеспечивается большой статистикой и воспроизводимостью результатов при выполнении экспериментов, проведением исследований на современном оборудовании, функционирование которого основано на различных физических принципах, взаимодополняющих друг друга, применением проверенных, признанных мировым научным сообществом методик исследования и диагностики материалов, сопоставлением полученных данных с известными литературными данными.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведённых в диссертационной работе.

В диссертационной работе Жукова Антона Сергеевича получен ряд новых результатов, которые могут представлять значительный интерес для специалистов и организаций, деятельность которых связана с разработкой аддитивных технологий производства изделий и систем из магнитных сплавов, и, в частности, разработкой технологий и производством изделий для приборостроения из порошков магнитомягких и магнитотвёрдых сплавов методом СЛС. В ряду таких организаций могут быть, например, АО «НПП «Исток» им. Шокина», АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ООО «Русатом МеталлТех», ПАО «ОДК-Сатурн», НПО «Высокоточные комплексы» (АО «КБП»), АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро», ООО «НПК «Магниты и магнитные системы», АО «Гиредмет» и др.

Аннотация диссертационной работы Жукова Антона Сергеевича полностью соответствует установленным требованиям и в полной мере отражает все ключевые результаты, представленные в диссертационной работе.

По теме диссертации **опубликовано** 17 научных работ, из них 9 статей в журналах, рекомендованных перечнем ВАК, 10 публикаций в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science. Результаты работы обсуждены на 17 российских и международных научных конференциях. На основании проведённых исследований автором получено 3 патента РФ.

Замечания по работе

По диссертационной работе имеется несколько замечаний.

1. Отсутствует доказательство одинаковости структуры полученных методом СЛС образцов разных размеров и формы, в частности, кольцевых образцов для магнитных измерений магнитно-мягкого материала, образцов для испытаний на растяжение, образцов для испытаний на ударную вязкость, металлографических шлифов, магнитоэкранирующие корпуса гироскопа. Замечание связано с тем, что образцы для испытаний изготавливались отдельно, а не вырезались из готового изделия (см., например, фотографию на рисунке 4.1 диссертации). Это может привести к несоответствию результатов испытаний друг другу, например, механических свойств и структуры.

2. Недостатком работы является отсутствие экспериментального определения коэффициента экранирования имитаторов корпуса гироскопа. Вместо этого проведён расчёт коэффициента экранирования по формуле (5.4) диссертации (с. 159). Указанная формула приведена без вывода и без ссылки на источник информации, и поскольку вместо магнитной проницаемости использована максимальная проницаемость, то, по-видимому, базируется на предположении, что внешнее магнитное поле совпадает с полем максимальной проницаемости. Выполнение этого предположения неочевидно и автором не проверялось, поэтому оценка значения коэффициента экранирования 82 сомнительна.

3. В диссертации при расчёте площади поверхности частицы порошка в формулах (4.1), (4.3) и связанных с ними расчётами объёма оксида (формула (4.6) и таблица 4.9) допущена ошибка в 4 раза, так как вместо выражения для площади поверхности сферы использовано выражение для площади окружности.

4. В диссертации и автореферате [пункт 1 Практической значимости, с. 5, п. 3 Выводы к главе 5, с. 160] указывается, что разработаны технологические инструкции, однако текст таких инструкций не приведён. Не указаны также выходные данные, разработанных документов.

5. В тексте автореферата и диссертационной работы имеются опечатки, стилистические погрешности и неточности, например:

- на стр. 45 диссертации без пробела приведено словосочетание «сплавов80НХС»;
- на стр. 57-58 диссертации относительные погрешности магнитных свойств характеризуются только положительной составляющей;
- не совсем корректным представляется использование жаргонных словосочетаний «аддитивный сплав», «аддитивный материал», «аддитивный образец» ... (стр. 4, 5, 10, ..., 20, 21 автореферата, стр. 8, 11, 45, 46, 47, ..., 162, 163 диссертации), – сплавы для исследований получали традиционными металлургическими методами выплавки и распыления, а не методом СЛС, как это следует, например, из содержания первой задачи исследования и смысла термина «аддитивный сплав», а во втором – не понятно, речь идёт о порошках сплава для СЛС или о материале, из которого методом СЛС изготовлено изделие;
- на стр. 66 диссертации утверждается, что «Все изготовленные порошки обладают сфероидальной формой ...», но на представленных на рисунке 3.1 (рисунок 1 автореферата) изображениях порошков магнитотвердых сплавов присутствуют частицы с отклонениями от таковой, в связи с чем не понятно, на основании каких количественных оценок доли таких частиц и/или величины этих отклонений сделано столь категоричное, приведённое выше, утверждение;
- многократно, например, в автореферате на с. 15 и 21, использован неконвенциональный термин «объёмная доля включений» (безразмерная величина) вместо термина «объёмная плотность включений» (измеряется в $1/\text{м}^3$);
- значения максимальной магнитной проницаемости иногда приводятся с избыточным числом незначащих цифр, например, на стр. 12 автореферата значение 35710 с учётом значения погрешности измерений проницаемости 5 % (стр. 58 диссертации) должно быть округлено до 35700;

- единицы гауссовой системы единиц [Гс] и [Э] при определении единицы магнитной проницаемости (например, в автореферате на рисунке 5, стр. 13) следует из текста удалить, поскольку в СИ относительная магнитная проницаемость является безразмерной величиной.

В конечном итоге, отмеченные замечания носят, в основном, уточняющий или рекомендательный характер, не ставят под сомнение основные выводы и не влияют на общую **положительную** оценку диссертационной работы. В целом диссертационная работа, представленная Жуковым Антоном Сергеевичем, заслуживает высокой оценки. Как уже отмечалось, результаты работы имеют значительную научную и большую практическую ценность. По тематике, актуальности, научной новизне, практической значимости и достоверности полученных результатов и сформулированных выводов диссертация **соответствует** пунктам 1, 3, 4, 16 паспорта специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Заключение по диссертационной работе

Подводя итог вышесказанному, следует заключить, что диссертационная работа Жукова Антона Сергеевича на тему «Разработка технологии селективного лазерного сплавления ферромагнитных материалов системы Fe-Cr-Ni(-Co) для получения на их основе элементов навигационной техники» представляет собой **законченную научную работу**. По тематике, актуальности, научной новизне, практической значимости и достоверности сформулированных выводов диссертация **соответствует** п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями, утвержденными Постановлениями Правительства РФ, и пунктам 1, 3, 4, 16 паспорта специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки), а её автор, Жуков Антон Сергеевич, **безусловно заслуживает** присвоения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Диссертация заслушана и обсуждена на заседании кафедры физического материаловедения Института новых материалов и нанотехнологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский

технологический университет «МИСИС», протокол от 15 апреля 2025 года № 220.25.2-5/пр.

Заведующий кафедрой физического
материаловедения НИТУ МИСИС
д.ф.-м.н., с.н.с.
Тел.: +7(495)955-01-22
Эл. почта: savchenko@misis.ru

Александр Григорьевич Савченко

Ученый секретарь кафедры
физического материаловедения
доцент по кафедре, к.ф.-м.н.

Елена Сергеевна Савченко

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС»
119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1
Тел. (495) 955-00-32;
Факс: (499) 236-21-05
E-mail: kancela@misis.ru

Отзыв подготовили:

Профессор кафедры физического
материаловедения, профессор,
д.т.н. (2.6.17. – Материаловедение)

Владислав Юрьевич Задорожный

Доцент кафедры физического
материаловедения,
доцент по кафедре, к.ф.-м.н.
(1.3.8. – Физика конденсированного
состояния)

Вадим Юрьевич Введенский

Доцент кафедры физического
материаловедения,
доцент по кафедре, к.ф.-м.н.
(1.3.8. – Физика конденсированного
состояния)

Александр Сергеевич Перминов

Ознакомлен 
25.04.25