



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
КБП КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
им. академика А.Г.Шипунова

Россия, 300004, г.Тула, ул. Щегловская засека, д. 59. Телефон: +7 (4872) 410-068
Факс: +7 (4872) 426-139, 469-861. E-mail: info@kbptula.ru, www.kbptula.ru

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель управляющего директора –
начальник конструкторского бюро,
кандидат технических наук



С. Л. Погорельский

» апреля 2025 г.

НИИ «Курчатовский институт»- ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 1472/14	в ДЕЛО
«13» 05 2025	№
Осн. 5 л.	подп.
Прил. — л.	

Отзыв

на автореферат диссертационной работы 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» по специальности 2.6.17 «Материаловедение (технические
науки)», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

При создании деталей из прецизионных магнитотвердых и магнитомягких материалов – кольцевых постоянных магнитов из магнитных сплавов и аддитивных магнитоэкранирующих корпусов – большое внимание уделяется технологиям их изготовления. Традиционно постоянные магниты для гирокоординаторов изготавливаются литьем, а элементы экранирующих корпусов – вытачиванием из заготовок, полученных ковкой. Но недостатки их применения для изготовления деталей сложной геометрии с высокой степенью точности связаны с большим количеством отходов при мелкосерийном производстве уникальных изделий, а литейные и прочие дефекты, засоры существенно снижают как механические, так и магнитные свойства.

В диссертационном исследовании основное внимание обращено на возможность замены стандартной технологии изготовления кольцевых постоянных магнитов из магнитотвердых сплавов и аддитивных магнитоэкранирующих корпусов на прогрессивную аддитивную технологию селективного лазерного сплавления (СЛС). В связи со сказанным **актуальность** представленного на отзыв диссертационного

исследования не вызывает сомнения.

Основные положения работы заключаются в решении важной **научно-технической задачи** обеспечения требуемых характеристик элементов изделий навигационной техники заданной геометрической формы, изготовленных лазерным сплавлением порошков магнитотвердых и магнитомягких сплавов.

Соискателем получены следующие **новые научные результаты**:

1. Получены экспериментальные зависимости пористости прецизионных сплавов 80НХС, 25Х15К и ЮНДК, изготовленных селективным лазерным сплавлением, от гранулометрического состава сплавляемых порошков соответствующих марок и параметров энерговложения. Показано, что в интервале энерговложений от 0,23 до 0,37 Вт·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. При селективном лазерном сплавлении 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 Вт·с/мм.

2. Предложен метод повышения коэффициента использования порошка прецизионного 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. При лазерном сплавлении смеси сферического и осколочного порошков прецизионного сплава 25Х15К дисперсностью менее 80 мкм, полученных газовым распылением расплава и струйным измельчением соответственно, в соотношении от 1:1 до 1:4, пористость материала увеличивается не более чем в 2 раза по сравнению с лазерным сплавлением сферического порошка той же марки.

3. Показано, что термическая обработка позволяет укрупнить размер зерна аддитивных ферромагнитных сплавов. Для сплава 80НХС режим термической обработки с выдержкой 9 ч при температуре 1300 °С позволил получить средний размер зерна 300 мкм, что обеспечивает достижение максимальной магнитной проницаемости 35710 Гс/Э.

4. Установлено, что коэрцитивная сила H_c аддитивных ферромагнитных сплавов 80НХС, 25Х15КА и ПЖРВ выше, чем у аналогичных материалов, полученных литьем или деформационной обработкой (3,1 А/м вместо 1,8 А/м, 45 кА/м вместо 40 кА/м и 582 А/м вместо 95 А/м соответственно), поскольку размер зерна в ферромагнитных сплавах, полученных методом селективного лазерного сплавления, оказывается на порядок меньше.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны технологические инструкции на процесс получения экспериментальных образцов порошков магнитотвердых сплавов методом распыления расплава и методом струйного измельчения, что позволило впервые получить порошки магнитотвердых сплавов необходимой текучести и фракции менее 80 мкм, пригодные для СЛС.

2. Создана установка струйного измельчения порошков прецизионных сплавов 25X15K и ЮНДК для получения порошков осколочной формы дисперсностью менее 80 мкм из сферических порошков дисперсностью более 80 мкм.

3. Разработана технологическая инструкция на процесс изготовления постоянных магнитов методом селективного лазерного сплавления. Разработан и освоен новый технологический процесс изготовления селективным лазерным сплавлением порошка сплава 25X15КА магнитов кольцевой формы с минимальными допусками на механическую обработку, высокими магнитными и механическими свойствами (коэрцитивная сила по индукции 46,5 кА/м, индукция на полюсах 31 мТл, синусоидальная форма распределения магнитной индукции в контрольной системе с показателями ангармоничности $K_2 = 2,85\%$ и $K_3 = 22,36\%$ при установленных требованиях к данным коэффициентам не более 25 %, твердость 482 МПа вместо 354 МПа и ударная вязкость 65 Дж/см² вместо 7,85 Дж/см²) и с исключением операции гомогенизационного отжига при термомагнитной обработке, что подтверждено актом внедрения в производственную деятельность АО «Спецмагнит», Москва, и патентом на изобретение №2800905, дата приоритета 17 октября 2022 г.

4. Разработан и освоен новый технологический процесс изготовления селективным лазерным сплавлением порошка сплава 80НХС экранирующих корпусов гироскопов с минимальными допусками на механическую обработку, требуемыми магнитными свойствами и вакуумной плотностью $1,2 \cdot 10^{-11}$ мЗ·Па/с, что подтверждено актом внедрения в производственную деятельность АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, и патентом на изобретение №2822540, дата приоритета 7 августа 2023 г.

Достоверность экспериментальных данных работы подтверждается большой статистикой результатов испытаний изготовленных образцов с воспроизводимыми параметрами выполненных экспериментов и воспроизводимыми свойствами, использованием современных методов исследований и современного поверенного исследовательского и опытно-производственного оборудования.

Основные результаты диссертационной работы прошли **апробацию** на 17 ведущих российских и международных конференциях: юбилейной научно-технической

конференции «СВЧ-электроника – 2023», г. Фрязино; XXIII Международной конференции по постоянным магнитам, 2022 г., г. Суздаль; Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин», 2020 и 2021 гг., г. Омск; конференции «CAMSTech-2020», г. Красноярск; конференции «LANE 2020», г. Фюрт (ФРГ); международной школе-семинаре «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах», 2018 и 2020 гг., г. Барнаул / г. Белокуриха; международной научной конференции «Far East Con», 2018 и 2020 гг., г. Владивосток; конференции «Materials Structure & Micromechanics of Fracture (MSMF9)», 2019 г., г. Брно (Чехия); конференции «NOLAMP17», 2019 г., г. Тронхейм (Норвегия); XV Российско-китайском симпозиуме, 2019 г., г. Сочи; конференции «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования», 2017 г., г. Вологда; LVIII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 2017 г., г. Пермь; конференции «NOLAMP 16», 2017 г., г. Ольборг (Дания); конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», 2017 г., г. Москва.

По теме диссертации **опубликовано** 17 научных работ, из них 9 статей в журналах, входящих в Перечень ВАК, 10 публикаций в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, 3 патента на изобретения РФ.

По нашему мнению, **достоинством** работы является оригинальное решение, новизна которого подтверждена патентом на изобретение РФ, научно обоснованно представленное в диссертации, является использование порошка с широким спектром фракционного состава, включая колотые зерна, что существенно отличается от общепринятого подхода с применением порошков с максимально единообразными зёрнами.

В целом автореферат дает достаточно полное и всестороннее представление о работе и соответствует требованиям ВАК, хотя и содержит ряд **недостатков**, не снижающих ее общий высокий уровень:

1. Судя по автореферату, в работе отсутствует детальный технико-экономический анализ предлагаемой аддитивной технологии в сравнении с использованием литых заготовок и проката. Это не позволяет оценить область эффективного применения предлагаемых решений.

2. Крайне неудачным решением является введение автором русскоязычной аббревиатуры СЛС для технологии селективного лазерного **сплавления** из-за созвучия с общепринятой англоязычной аббревиатурой SLS, используемой для технологии селективного лазерного **спекания**.

Представленный автореферат позволяет сделать вывод о том, что диссертационное исследование является законченным научно-квалификационным трудом, соответствует критериям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, которым должны отвечать диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, и соответствует формуле и областям исследования паспорта специальности 2.6.17 «Материаловедение (технические науки)».

На основании автореферата можно сделать вывод, что в диссертации «Разработка технологии селективного лазерного сплавления ферромагнитных материалов системы Fe-Cr-Ni(-Co) для получения на их основе элементов навигационной техники» изложены новые научно обоснованные решения по развитию аддитивных технологий для формирования магнитов с механическими и магнитными свойствами, не уступающими материалу, полученному по традиционной литейной технологии или вытачиванием из прутка, имеющие существенное значение для развития страны, а ее автор Жуков Антон Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 «Материаловедение (технические науки)».

Павел Алексеевич Андрианов,
заместитель главного инженера производства
по подготовке производства, к.т.н.



Василий Дмитриевич Мельников,
главный технолог и начальник отделения



ознакомлен *т.т.*
14.05.25