

ОТЗЫВ**официального оппонента**

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

Вх. № 1238/12	в ДЕЛО
«25» 04 2025 г.	№
Осн. л.	подп. л.

I. Актуальность темы

Детали из ферромагнитных материалов широко применяются в навигационной технике. Технология изготовления таких деталей сопряжена с большим расходом материала, с большим количеством технологических операций и с невозможностью получения сложных форм этих деталей. Размерная обработка этих деталей всегда предполагает большое количество стадий и отличается невысоким выходом годного. Современные методы 3D-печати позволяют устранить все эти недостатки и при этом сохранить высокий уровень технических и эксплуатационных характеристик изделий. Однако для магнитных материалов системы Fe-Cr-Ni(Co) технология изготовления изделий с использованием методов 3D-печати отсутствует. В связи с этим диссертация Жукова А.С., посвящённая разработке технологии изготовления деталей для навигационной техники с использованием метода селективного лазерного плавления (SLM), является весьма актуальной.

II. Достоверность и новизна основных выводов диссертации

В работе показано, что минимальной пористости (менее 1%) SLM-заготовок из магнитных сплавов 80НХС, 25Х15К и ЮНДК можно добиться используя порошки с вполне определённым соотношением частиц заданного диаметра. Установлена возможность одновременного использования порошков с частицами сферической и осколочной формы без существенного увеличения пористости SLM-заготовок. Показана возможность укрупнения зерна SLM-заготовок из магнитных сплавов посредством термической обработки, в результате чего повышаются магнитные свойства этих заготовок.

Установлена возможность исключения операции гомогенизационного отжига при термической обработке SLM-заготовок из сплава 25Х15К без снижения уровня магнитных свойств получаемых постоянных магнитов. Все вышеперечисленные технические решения обладают научной новизной, которая подтверждается тремя патентами Российской Федерации.

Достоверность полученных в работе результатов не вызывает сомнения, поскольку подтверждается использованием современных методик исследования, аттестованного исследовательского оборудования и приборов, а также применением методов статистической обработки экспериментальных данных.

III. Ценность диссертации для науки и практики

Диссертация Жукова А.С. имеет чёткую практическую направленность и ценность для науки. Разработанные диссертантом способы получения порошков для 3D-печати некоторых магнитных сплавов с последующим подбором режимов энергетического (лазерного) воздействия и сканирования позволили автору создать 3D-технология изготовления бездефектных кольцевых постоянных магнитов из сплава 25Х15К со свойствами, превосходящими имеющиеся на сегодняшний день в промышленности. Одновременно была разработана и освоена ресурсосберегающая 3D-технология изготовления экранирующих корпусов гироскопов из сплава 80НХС, которые до настоящего времени изготавливают весьма трудоёмким и материалозатратным методом прецизионной механической обработки отдельных частей этого экранирующего корпуса с последующей их лазерной сваркой. Результаты этой работы имеют как большую практическую, так и научную ценность.

Несомненную ценность для науки и практики представляет разработанная диссертантом методика оценки качества и пригодности порошков для 3D-печати, заключающаяся во введении универсальных характеристик, основанных на измерении значений текучести,

насыпной плотности и скорости истечения этих порошков. Эта методика наверняка будет использована промышленными предприятиями для входного контроля порошков, предназначенных для 3D-печати различных изделий. Нельзя не отметить научную и практическую значимость обнаруженной диссертантом Жуковым А.С. такой особенности SLM-заготовок из сплава 25X15K как их высокая однородность химического состава. Это наблюдение позволило усовершенствовать технологию термообработки заготовок магнитов из этого сплава, а именно исключить операцию их гомогенизирующего отжига. Очень большую практическую ценность имеют результаты работы по созданию и внедрению в производство установки струйного помола порошков прецизионных сплавов. Новизна всех этих вышеприведенных результатов подтверждена патентами Российской Федерации, а практическая значимость — актами внедрения отечественных промышленных предприятий АО «Спецмагнит» и «Концерн ЦНИИ «Электроприбор».

IV. Оценка содержания диссертации. Публикации.

Диссертация Жукова А.С. состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 6 приложений, включающих документы об использовании результатов работы. Диссертация содержит 210 страниц машинописного текста, 103 рисунка и 23 таблицы. Список литературы включает 164 наименования.

В разделе «Введение» автор работы обосновывает актуальность темы диссертации, излагает её цели и задачи, научную новизну и практическую значимость, методы исследования, степень достоверности результатов, личный вклад автора и положения, выносимые на защиту. Здесь же приведены сведения о публичных обсуждениях результатов работы на различных собраниях научно-технической общественности.

В первой главе диссертации приведены результаты информационных исследований по проблемным вопросам создания элементов навигационных систем и преимуществ аддитивных технологий, по сравнению с традиционными, при изготовлении изделий в условиях мелкосерийного и, тем более, единичного производства. Подчёркнуты особенности метода SLM и состояние вопроса в области получения порошковых материалов для реализации этого метода. Сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе диссертации рассмотрены порошковые материалы, предназначенные для исследования в данной работе. Часть из этих материалов это продукция, выпускаемая отечественной промышленностью, другая часть — порошковые материалы, полученные самостоятельно при помощи оборудования, имеющегося в НИЦ «Курчатовский институт». Здесь же приводятся технические характеристики этого и другого, применяемого в данной работе оборудования, его возможности и конструктивные особенности, а также применяемые в работе методики исследования.

В третьей главе диссертации представлены результаты исследования порошков магнитных материалов, полученных при различных режимах распыления, а также поведение их при реализации процессов 3D-печати, в частности метода SLM. Были установлены режимы распыления, обеспечивающие максимальный выход годного этих порошков. Было показано, что текучесть, насыпная плотность и скорость истечения порошка из питателя являются универсальными постоянными для данного порошкового материала и данного гранулометрического состава этого материала и могут определять его качество при проведении входного контроля. Показано также, что диапазон фракционного состава порошкового материала определяет значение пористости заготовки, полученной из этого материала методом SLM. Аргументация при формулировании этих зависимостей представляется вполне логичной и обоснованной.

В четвёртой главе диссертации приведены результаты определения механических и магнитных свойств изделий, полученных диссертантом из модельных и магнитных сплавов с использованием метода SLM. Здесь же приведены результаты металлографических исследований материала этих изделий. Показано, что механические свойства модельных заготовок из стали, полученных методом SLM, превышают механические свойства заготовок, полученных по традиционным технологиям изготовления. Структура стальных SLM-

заготовок зависит от режимов 3D-печати. При этом механические свойства всегда выше там, где выше плотность заготовки. Показано также, что коэрцитивная сила SLM-заготовок из магнитомягкого сплава 80НХС может быть снижена до требуемых значений рекристаллизационной термообработкой. Установлено, что заготовки из магнитотвёрдого сплава 25Х15К, полученные методом SLM, обеспечивают повышенные механические свойства по сравнению с требуемыми по ГОСТ 24897-81, а постоянные магниты, изготовленные из этих заготовок, имеют магнитные свойства, установленные данным ГОСТ, даже без рекомендуемой гомогенизационной термической обработки. Полученные таким образом данные позволили диссертанту разработать технологии изготовления заготовок из вышеуказанных магнитных сплавов, с использованием метода SLM, вполне пригодных для практического применения в качестве элементов навигационной техники, что подтверждается актами промышленных испытаний и внедрения.

В пятой главе диссертации приведены результаты работ по внедрению разработанных диссертантом технологий изготовления деталей гироскопов из магнитотвёрдого сплава 25Х15К и магнитомягкого сплава 80НХС с использованием метода SLM, а также работ по повышению эффективности этих технологий. Показана возможность повышения коэффициента использования порошкового материала при изготовлении деталей методом SLM. Для реализации этих возможностей была создана установка сухого помола порошковых материалов. Приведены результаты испытаний разработанных диссертантом технологий изготовления постоянных магнитов из сплава 25Х15К и деталей корпуса гироскопа из магнитомягкого сплава 80НХС с использованием метода SLM. Показано, что разработанные технологии обеспечивают получение вышеуказанных деталей гироскопа в полном соответствии с требованиями ГОСТ 24897-81 и Заказчика. Технологии внедрены в промышленное производство, что подтверждается актами внедрения. Новизна технических решений, используемых в данных технологиях, подтверждена патентами РФ.

Выводы по диссертации, представленные в Заключение, представляются вполне обоснованными. Смысловое содержание выводов подтверждает решение поставленных в работе задач исследования.

Основное содержание диссертации изложено в 17 печатных работах, из которых 9 являются статьями из перечня ВАК, 10 статьями, опубликованными в изданиях индексируемых по базам данных Scopus и Web of Science, 3 - патентами РФ. Автореферат и публикации отражают основное содержание диссертации. Тема диссертации соответствует специальности 2.6.17. - Материаловедение (технические науки).

V.Замечания по диссертации

1. Методом SLM в работе изготавливали не постоянные магниты, а **заготовки** для постоянных магнитов т.к. магнитами эти заготовки становятся только после проведения операций термомагнитной обработки и последующего намагничивания (стр. 10 и др.).
2. Неправильно утверждать, что традиционные технологии изготовления литых постоянных магнитов не позволяют избавиться от таких дефектов как раковины, трещины, засоры. Возникновение этих дефектов на действующих промышленных предприятиях предупреждают методами направленного затвердевания, фильтрации расплава, правильным подбором температуры заливки расплава в литейную форму и температуры самой литейной формы (стр. 35).
3. В материаловедении тип кристаллической решётки обозначают ГЦК, ОЦК и т.д., а не γ -Fe, α -Fe, как в таблице 2.1.(стр.48).
4. В тексте диссертации имеются неудачные выражения, такие как «аддитивные материалы», «первичное дендритное расстояние», «время перегрева» (стр.8,30, 31, 65, 78, 83 и др.).
5. Нельзя направо-налево употреблять слово «оптимальный» без проведения соответствующей работы по поиску оптимума (стр.66 и др.).

Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности работы, не затрагивают её основных положений и выводов, не влияют на достоверность полученных результатов.

Заключение.

Автором диссертационной работы, Жуковым Антоном Сергеевичем, сформулировано содержание научно-технической проблемы — создание технологии изготовления элементов навигационной техники из ферромагнитных материалов системы Fe-Cr-Ni(-Co) с использованием метода селективного лазерного сплавления, выполнены постановка задач исследования и их решение. Разработана технология получения сфероидизированного порошкового материала из ферромагнитных сплавов системы Fe-Cr-Ni(-Co) и разработаны методы его тестирования. Разработана промышленная технология изготовления из этих порошковых материалов элементов навигационной техники с использованием метода селективного лазерного плавления. Проведены металлографические исследования структуры, а также исследования механических и магнитных свойств, изготовленных этим способом элементов навигационной техники. Показано, что изделия, изготовленные с использованием метода селективного лазерного плавления, не уступают по своим техническим характеристикам изделиям, полученным традиционными методами изготовления, но отличаются повышенной технологичностью и экономичностью в изготовлении. Проведена отработка разработанной технологии и внедрение её в действующее производство. Приоритет автора подтверждается тремя патентами Российской Федерации.

Диссертация Жукова А.С., «Разработка технологии селективного лазерного сплавления ферромагнитных материалов системы Fe-Cr-Ni(-Co) для получения на их основе элементов навигационной техники», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки), является законченной научной работой, отвечает требованиям п.9 «Положение о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, а её автор, Жуков Антон Сергеевич, заслуживает присвоения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Официальный оппонент:

профессор кафедры Технологии машиностроения
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный
университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых»,
доктор технических наук по специальности 05.16.04.-
«Литейное производство», профессор

Беляев Игорь Васильевич

Место работы: ВлГУ
Адрес: 600000, г. Владимир,
ул. Горького, 87
тел. +79107793542
e-mail: belyaev-iv54@yandex.ru



ознакомлен *т*

28.04.25