

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук 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)

НИИ «Курчатовский институт»- ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 1223/17	в ДЕЛО
«25» 04 2025 г.	№
Осн. 6 л.	подп.
Прил. — л.	

В настоящее время селективное лазерное сплавление стало одной из самых востребованных технологий трехмерной печати деталей из металлов и сплавов. Она применима к широкому кругу металлических материалов. В качестве исходного материала используются порошки, большое разнообразие которых имеется на рынке. Точность печати позволяет минимизировать механическую обработку. Возможность получения сложных геометрических форм сокращает количество сборочных операций. Наконец, печать непосредственно по цифровым моделям, не требующая специальных форм или оснастки, может значительно ускорить разработку новых изделий.

К сожалению, эта технология не лишена и недостатков. Один из них — высокие требования к форме частиц порошка, гранулометрическому и химическому составу. Это сильно сужает номенклатуру пригодных для печати порошков. В процессе лазерной обработки порошки могут дополнительно окисляться, что усложняет задачу получения материалов с допустимым содержанием примесей. Напечатанный материал практически всегда имеет остаточную пористость порядка одного процента. Возможно появление микротрещин. Высокие скорости охлаждения при лазерном воздействии способствуют возникновению мелкозернистой структуры и неравновесных фаз, поэтому может потребоваться дополнительная термообработка. Возникающие при селективном лазерном сплавлении термонапряжения могут вызвать нежелательную деформацию напечатанных деталей.

Данная диссертационная работа посвящена трехмерной печати методом селективного лазерного сплавления деталей из магнитомягких и магнитотвердых сплавов. Пригодных для печати порошков исследуемых ферромагнитных сплавов на рынке практически нет. Поэтому соискатель одновременно решает и задачу получения таких порошков. Фактически работа затрагивает весь технологический цикл, включая подбор параметров печати и пост-обработки для каждого ферромагнитного сплава. Сейчас в отечественном машиностроении существует большая потребность в изготовлении деталей сложной формы из ферромагнитных сплавов, которую можно было бы решить путем внедрения трехмерной

печати методом селективного лазерного сплавления. Поэтому тематика данной диссертационной работы является безусловно **актуальной**.

Построение диссертации традиционное. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка обозначений и сокращений, списка литературы из 164 наименований, и шести приложений. Общий объем диссертации – 210 страниц, включая 103 рисунка и 23 таблицы. Каждая глава содержит определенный законченный раздел работы, в конце которого сформулированы выводы.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации и сформулированы ее цели, подчеркнута научная новизна и научная и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой** главе приведен литературный обзор. Освещена проблема создания элементов навигационных систем. Рассмотрены современные методы трехмерной печати, методы получения порошков. Содержится современное состояние вопроса трехмерной печати методом селективного лазерного сплавления из нержавеющей стали и прецизионных сплавов. Сформулирована постановка задачи для диссертационной работы.

Во **второй** главе описаны используемые материалы и экспериментальные методики. Приведен химический и гранулометрический состав используемых коммерчески доступных порошков, описаны исходные материалы для распыления порошков. Описано оборудование для распыления порошков, методики контроля их химического и гранулометрического состава, определения текучести и насыпной плотности. Приведены схемы работы и характеристики двух используемых установок селективного лазерного сплавления. Описаны методики исследования напечатанных образцов: структурных металлографических исследований, измерения плотности, механических и магнитных свойств. Приведены режимы применяемой термической и термомагнитной обработки.

Третья глава посвящена изготовлению и исследованию порошков прецизионных сплавов. Исследовалось получение распылением расплава порошков следующих сплавов: 80НХС, 25Х15К и ЮНДК. В различных режимах распыления определены химический и гранулометрический составы порошков. На основании этих данных выбраны оптимальные режимы распыления. Установлены зависимости удельной плотности и удельного расхода порошка от текучести и насыпной плотности. Проведен параметрический анализ селективного лазерного сплавления и найдены оптимальные параметры процесса, обеспечивающие минимальную пористость для следующих материалов: сталь 316L, сталь 12Х18Н10Т, технически чистое железо марки ПЖРВ и ферромагнитные сплавы 80НХС, 25Х15К и ЮНДК.

Четвертая глава посвящена исследованию микроструктуры, механических и магнитных свойств образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления из магнитомягких материалов ПЖРВ и 80НХС, магнитотвердых сплавов 25Х15К и ЮНДК и модельных материалов 316L и 12Х18Н10Т. Показано, что благодаря высокой скорости охлаждения в данном процессе у всех рассмотренных сплавов происходит закалка из жидкого состояния с образованием столбчатых зерен. Размер зерна гораздо меньше, чем у тех же сплавов, полученных обычными методами. Мелкозернистая структура объясняет обнаруженные повышенные прочностные свойства и повышенную коэрцитивную силу.

Для магнитомягких материалов важна низкая коэрцитивная сила. Автор подобрал режимы рекристаллизационного отжига сплава 80НХС, обеспечивающие требуемую ГОСТом величину коэрцитивной силы. К сожалению, не удалось подобрать режимы отжига, приводящие к равномерному росту зерна в материале ПЖРВ. Поэтому не удалось достичь удовлетворительных значений коэрцитивной силы в этом материале.

Измерения показали, что магнитные свойства сплава 25Х15К удовлетворяют стандартным требованиям и даже могут их превосходить. Найдены оптимальные по магнитным свойствам режимы селективного лазерного сплавления этого сплава. Показано, что при термомагнитной обработке сплава 25Х15К можно пропустить стадию гомогенизационного отжига. Сплав ПЖРВ растрескивался при селективном лазерном спекании. Найдены стратегии сканирования, уменьшающие растрескивание, однако говорить о получении изделий из сплава ПЖРВ методом селективного лазерного сплавления пока рано. В конце четвертой главы приведено исследование частиц, вылетающих из области лазерного воздействия.

В **пятой** главе приведены рекомендации по разработке технологии изготовления изделий из прецизионных сплавов методом СЛС. Методом селективного лазерного сплавления изготовлены прототипы кольцевых магнитов из сплава 25Х15КА. Для удешевления производства автор предложил смешивать сферический порошок с колотым и нашел пропорции, при которых это смешение не снижает качество печати. Проведена термомагнитная обработка и измерена ангармоничность углового распределения магнитного поля, которая оказалась в пределах нормы. Методом селективного лазерного сплавления изготовлен прототип корпуса гироскопа из магнитомягкого сплава 80НХС и показана его работоспособность. В **заключении** сформулированы выводы.

По прочтении диссертации возникли следующие **замечания**:

1. В конце раздела 4.2 утверждается, что термообработка образцов, выращенных из порошка ПЖРВ, не привела к значительному росту зерна. Этот вывод не подкреплён металлографическими исследованиями. На первый взгляд кажется странным, что

стандартная термообработка, обычно вызывающая рост зерна, не действует именно на эти образцы. Возможно, дело в каких-то структурных особенностях, например порах или включениях, которые требуют более подробного исследования. В разделе 4.3 показано, что термообработка образцов, выращенных из сплава 80НХС, приводит к неравномерному росту зерна. Кроме того, рост зерна гораздо медленнее, чем в образцах того же сплава, полученных механической обработкой из кованого материала. Также хотелось бы понять причины уменьшения чувствительности сплава 80НХС к стандартной термообработке.

2. В конце раздела 3.4 написано: «можно сделать предположение [127], что текучесть и насыпная плотность, а также скорость истечения порошка являются универсальными постоянными для данной конкретной марки и данного гранулометрического состава». В методе ячейки Холла текучесть порошка характеризуется скоростью его истечения из воронки. Таким образом, текучесть и скорость истечения не могут рассматриваться как независимые параметры.

3. К вращающимся деталям гироскопов должны предъявляться требования по точности геометрии. Проводились ли метрологические измерения? Можно ли считать форму кольцевого магнита удовлетворительной сразу после печати? Возможно ли улучшить геометрию путем выбора оптимальной стратегии сканирования? Требуется ли дополнительная механическая обработка для исправления геометрии?

4. Автор иногда использует спорную терминологию и обозначения. Например, он считает, что структурная чешуя, характерная для лазерного сплавления, образуется благодаря наложению множества полусферических ванн расплава. В таких режимах лазерной обработки ванны обычно сильно вытянуты вдоль линии сканирования. Они при движении формируют непрерывные переплавленные валики, которые в сечении могут быть приблизительно полукруглыми. Так что скорее чешуйчатая структура в сечении поперек направления сканирования отражает наложение параллельных переплавленных валиков. В размерностях часто повторяется произведение Вт·с, хотя оно равно Джоулю. Эти размерности можно было бы упростить. В начале главы 5 механические свойства материала сведены к прочностным характеристикам.

Автор диссертации использовал ранее известные методики трехмерной печати, термической и термомагнитной обработки, но применил их таким образом, как раньше никто не делал. В частности, до настоящего времени отсутствовали достоверные данные об оптимальных параметрах трехмерной печати методом селективного лазерного сплавления прецизионных сплавов 80НХС, 25Х15К и ЮНДК, а автор их нашел, проведя параметрический анализ в зависимости от гранулометрии порошка и параметров лазерного

воздействия. Из-за существенных особенностей микроструктуры напечатанных сплавов пришлось выбирать новые режимы термической и термомагнитной обработки. Предложен новый метод повышения коэффициента использования порошка прецизионного сплава 25X15K за счет доизмельчения крупной фракции сферического порошка и смешивания получаемого осколочного порошка с мелкой фракцией сферического порошка. Таки образом, в работе имеется существенная **научная новизна**.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов диссертационной работы обеспечивается применением промышленного технологического оборудования, использованием широко известных и апробированных методик исследования материалов, достаточной статистикой экспериментальных измерений, сравнением результатов изменений по различным методикам и критическим подходом автора. Научные положения, выдвинутые на защиту, представляются **обоснованными**.

Результаты, сформулированные в диссертации, составляют основу разработанного нового технологического процесса получения деталей из ферромагнитных сплавов методом селективного лазерного сплавления. В частности, разработаны технологические инструкции на процессы газофазного распыления и струйного измельчения порошков рассмотренных магнитотвердых сплавов. Создана установка струйного измельчения. Разработана технологическая инструкция на процесс изготовления постоянных магнитов методом селективного лазерного сплавления. Разработан и освоен новый технологический процесс изготовления селективным лазерным сплавлением порошка экранирующих корпусов гироскопов из сплава 80НХС. Вышеперечисленные результаты определяют **практическую значимость** диссертации.

Результаты, полученные А.С. Жуковым в его диссертационной работе, вносят значительный вклад в развитие технологии трехмерной печати методом селективного лазерного сплавления. На основе полученных результатов предложены новые технологические решения для изготовления деталей из ферромагнитных сплавов. Таким образом, диссертация **содержит новые технологические решения, имеющие практическое значение для производства элементов навигационной техники**. Основные результаты опубликованы в престижных рецензируемых международных и российских журналах и доложены на конференциях высокого уровня.

Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание. Указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. 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 паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Таким образом, 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, а ее автор, Жуков Антон Сергеевич, безусловно заслуживает присвоения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор

Кафедры высокоэффективных технологий обработки

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

ГУСАРОВ Андрей Владимирович



21 апреля 2025 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (499) 973 39 61, e-mail: av.goussarov@gmail.com

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация:
01.04.21 – Лазерная физика

Адрес места работы:

127055, г. Москва, Вадковский пер., д. 3а

ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Тел.: +7 (499) 973-39-61; E-mail: av.goussarov@gmail.com

ознакомлен *т*
28.04.25

Подпись Гусарова А.В.
удостоверяю
начальник ОКД уп Кушкова Е.А.
УПРАВЛЕНИЕ
ПЕРСОНАЛОМ
« 04 20 25 г.



6