

УДК 621.762.5; 621.318.1

ГРНТИ 53.39; 45.09.29

На правах рукописи



**ЖУКОВ АНТОН СЕРГЕЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ  
СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ  
ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
СИСТЕМЫ Fe-Cr-Ni(-Co)  
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НА ИХ ОСНОВЕ  
ЭЛЕМЕНТОВ НАВИГАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

Специальность: 2.6.17. Материаловедение  
(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2025

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И. В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Научный руководитель: доктор технических наук **Кузнецов Павел Алексеевич**

Официальные оппоненты:

**Беляев Игорь Васильевич** доктор технических наук, профессор, Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, профессор кафедры «Технология машиностроения» Института машиностроения и автомобильного транспорта

**Гусаров Андрей Владимирович** доктор физико-математических наук, Московский государственный технологический университет «Станкин», профессор кафедры высокоэффективных технологий и обработки Института производственных технологий и инжиниринга

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет МИСИС»**, Москва

Защита состоится **«28» мая 2025 г. в 11.00** на заседании диссертационного совета 75.1.018.01, созданного на базе Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И. В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», по адресу: 191015, г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, дом 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте:

<http://dissovet.cris-m-prometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=47>

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 75.1.018.01  
доктор технических наук, профессор

Е. И. Хлусова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Детали из прецизионных магнитотвердых и магнитомягких сплавов играют существенную роль в устройствах и системах: служат источником или усилителем основного сигнала, определяя точность и надежность, являются экранирующими элементами. В настоящее время постоянные магниты для гирокоординаторов изготавливаются литьем, а элементы экранирующих корпусов – вытачиванием из заготовок, полученных ковкой. Однако сложно применить традиционные технологии для изготовления деталей сложной геометрии с высокой степенью точности, образуется большое количество отходов при малосерийном производстве уникальных изделий. Литейные (раковины, трещины) и прочие дефекты, засоры существенно снижают как механические, так и магнитные свойства. Согласно данным АО «Спецмагнит», потребность в кольцевых магнитах для гирокоординаторов оценивается в 10 000 штук в год. Традиционное литье не позволяет поддерживать такой темп производства. Применение аддитивной технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) позволит минимизировать механообработку, оптимизировать производственный цикл и сократить сроки производства новых деталей и изделий в 1,5-3 раза. В изделиях навигационной техники широкую нишу занимают материалы систем Fe-Cr-Co и Fe-Ni, которые обладают хорошими магнитными свойствами и сохраняют их стабильность в широкой области температур. Таким образом, основное внимание в работе обращено на детали гироскопов – кольцевые постоянные магниты из магнитотвердых сплавов и аддитивные магнитоэкранирующие корпуса – и на возможность заменить стандартную технологию изготовления на аддитивную – СЛС. Необходимо расплывением расплава получить порошки ферромагнитных сплавов, пригодные для СЛС, и исследовать технологические режимы их сплавления, обеспечивающие требуемый уровень магнитных свойств. Производство элементов конструкций гироскопов с повышенными магнитными свойствами (остаточной индукцией  $B_r$ , коэрцитивной силой по индукции  $H_{cb}$ , максимальным энергетическим произведением  $(BH)_{max}$ , магнитной проницаемостью  $\mu$ ) для АО «НПП «Исток» им. Шокина» (АО «Спецмагнит»), АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», НПО «Высокоточные комплексы» (АО «КБП»), АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро» и др. обуславливает актуальность разработки новой аддитивной технологии СЛС, которая обеспечивает бездефектность и максимальное использование материала.

**Целью диссертационной работы** является обеспечение требуемых характеристик элементов изделий навигационной техники заданной геометрической формы, изготовленных селективным лазерным сплавлением порошков прецизионных магнитотвердых и магнитомягких сплавов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Выявление факторов, оказывающих влияние на магнитные и механические

свойства прецизионных сплавов 80НХС, 25Х15КА, ЮНДК, изготовленных методом селективного лазерного сплавления:

- 1.1. Гранулометрического состава на текучесть и насыпную плотность порошков.
- 1.2. Мощности и скорости сканирования лазерным лучом, определяющих пористость исследуемых сплавов 80НХС, 25Х15КА, ЮНДК.
- 1.3. Структурных особенностей прецизионных аддитивных материалов после селективного лазерного сплавления.
2. Установление зависимости магнитных и механических свойств аддитивных ферромагнитных материалов от режимов сплавления.
3. Создание установки для струйного измельчения порошков магнитотвердых сплавов.
4. Разработка технологии, изготовление и испытание аддитивных кольцевых постоянных магнитов из сплава 25Х15КА и аддитивных магнитоэкранирующих корпусов из сплава 80НХС для гироскопов.

**Объектом исследования** являлись:

- магнитомягкий сплав 80НХС системы Fe-Ni и магнитотвердые сплавы 25Х15К и ЮНДК систем Fe-Cr-Co и Al-Ni-Cu-Co-Fe, соответственно;
- технически-чистое железо марки ПЖРВ для оптимизации технологии сплавления несферических порошков, к которым относятся, в т.ч., порошки некоторых магнитных сплавов;
- аустенитные стали 12Х18Н10Т и 316L для выявления закономерностей между технологическими параметрами построения, получаемой структурой и свойствами образцов;
- элементы изделий навигационной техники, изготовленные методом СЛС из порошков сплавов 80НХС и 25Х15КА.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Влияние фракционного состава порошка на текучесть и насыпную плотность, а также пористость исследуемого металлического материала после селективного лазерного сплавления.
2. Влияние режимов сплавления на магнитные и механические свойства ферромагнитных материалов, полученных с использованием аддитивных технологий.
3. Режимы термической обработки магнитомягкого сплава 80НХС и термомагнитной обработки магнитотвердого сплава 25Х15КА.
4. Результаты испытаний элементов изделий навигационной техники заданной геометрической формы из прецизионных сплавов 80НХС и 25Х15КА.

**Научная новизна работы:**

1. Получены экспериментальные зависимости пористости прецизионных сплавов 80НХС, 25Х15К и ЮНДК, изготовленных селективным лазерным сплавлением, от

гранулометрического состава сплавляемых порошков соответствующих марок и параметров энергозатрат. Показано, что в интервале энергозатрат 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 энергозатрат сужается и составляет от 0,30 до 0,35 Вт·с/мм.

2. Предложен метод повышения коэффициента использования порошка прецизионного сплава 25X15K 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 25X15K 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, 25X15КА 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/см<sup>2</sup> вместо 7,85 Дж/см<sup>2</sup>) 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  $1,2 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ , 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.

**Личный вклад автора** в получении научных результатов, изложенных в работе: постановка задач; разработка планов и проведение экспериментов; статистическая обработка полученных экспериментальных данных; анализ и интерпретация полученных структур, результатов измерения механических и магнитных свойств; внедрение результатов работы в производственную деятельность АО «Спецмагнит» и АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены 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 «SAMSTech-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 «NOLAMP16», 2017 г., г. Ольборг (Дания); конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», 2017 г., Москва, и на других российских и международных конференциях.

**Публикации.** 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, 3 патента.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, 6 приложений. Текст изложен на 210 страницах машинописного текста, содержит 103 рисунка, 23 таблицы, список литературы включает 164 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность исследуемой темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, описаны научная новизна и практическая ценность, приводятся основные положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

В **первой главе** приведен обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы по теме диссертации. Обозначена проблема создания элементов навигационных систем, описаны основные принципы работы динамически настраиваемых гироскопов. Указаны преимущества аддитивных технологий по сравнению с традиционными, перечислены особенности аддитивной технологии селективного лазерного сплавления (СЛС). Перечислены основные методы получения порошков для аддитивных технологий, их особенности, преимущества и недостатки. На основании проведенного обзора сформулированы задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** приведена номенклатура рассматриваемых материалов: порошки аустенитных нержавеющей сталей в качестве модельного материала; несферический порошок ПЖРВ; порошки ферромагнитных материалов – магнитомягкого сплава 80НХС, магнитотвердых сплавов 25Х15К и ЮНДК. Порошки ферромагнитных сплавов, отсутствующие в свободной продаже, были изготовлены в НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» распылением расплава на установке HERMIGA 75/3VI

(Великобритания). Изготовление образцов из металлических порошков проводилось методом СЛС с использованием установок EOSINT M270 (Германия) и Russian SLM FACTORY (Россия). Также в главе даны характеристики использованного измерительного и технологического оборудования, предложен комплекс исследований и испытаний как исходного порошкового сырья, так и аддитивных образцов, изготовленных из них технологией СЛС.

**Третья глава** посвящена исследованиям металлических порошковых материалов (рисунок 1) и процесса их сплавления. Подобраны оптимальные параметры процесса распыления расплава исходя из максимального выхода годной фракции (таблица 1) и изготовлены партии порошков прецизионных сплавов 80НХС, 25Х15К, ЮНДК. Установлено, что все изготовленные порошки и порошки сторонних производителей по химическому составу соответствуют своим маркам, указанным в соответствующих ГОСТ.

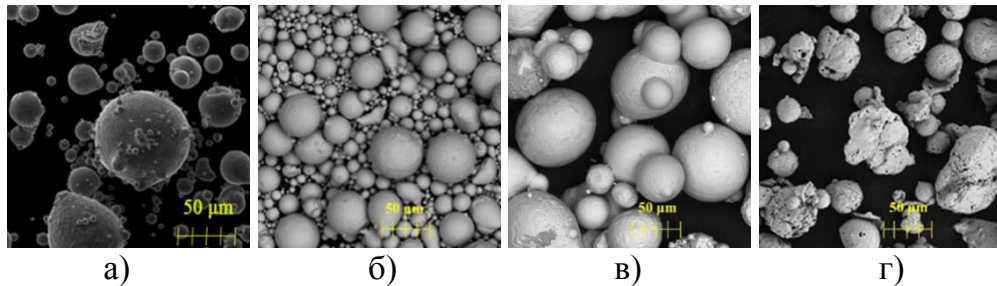


Рисунок 1 – Изображения порошков 80НХС – а); 25Х15К – б); ЮНДК – в); ПЖРВ – г)

Таблица 1 – Оптимальные параметры процесса распыления прецизионных сплавов

Сплав	$T_{нг}, ^\circ C$	$O_2, ppm$	$P_{камера}, бар$	$P_{расп.}, бар$	$T_{расп.}, ^\circ C$	$t_{перегр.}, мин$	выход годного, %
25Х15К	1000	340	0,25	50	1600	10	75
ЮНДК	1000	300	0,25	50	1530	10	75
80НХС	1000	160	0,25	50	1580	10	93

\* $T_{нг}$  – температура напуска газа в камеру с индукционной печью;  $O_2$  – содержание кислорода в распыляющем газе;  $P_{кам.}$  – давление в камере с индукционной печью;  $P_{расп.}$  – давление распыляющего газа на форсунке;  $T_{расп.}$  – температура расплава, при которой проходил процесс распыления;  $t_{расп.}$  – время распыления;  $t_{перегр.}$  – время перегрева расплава.

Анализ результатов определения гранулометрического состава порошков показал: изготовленные по режиму распыления расплава для максимального выхода годного порошки магнитотвердых сплавов представляют собой полидисперсные смеси, где 90 % частиц имеют размер не больше 52,8 мкм (25Х15К) и 60,3 мкм (ЮНДК); порошки магнитомягкого сплава 80НХС несколько крупнее при тех же режимах получения, чем порошки магнитотвердых сплавов, но их выход годного намного выше и составляет 93 %. Для порошков магнитотвердых сплавов был достигнут выход годной для СЛС фракции менее 80 мкм до 75 %, и его невозможно было увеличить ввиду ограничения технологических возможностей установки HERMIGA 75/3IV (невозможно повысить давление распыляющего газа на форсунке выше максимального). Пути преодоления этого



ограничения представлены в пятой главе.

Установлено (рисунок 2а), что принципиальной зависимости между текучестью и насыпной плотностью порошков не прослеживается, что может быть связано с тем, что плотности исследуемых материалов различаются. Из полученных данных видно, что даже порошки различного фракционного состава, принадлежащие одной марке стали 12Х18Н10Т, имеют различное время истечения из воронки. При изменении насыпной плотности от 4,5 до 5 г/см<sup>3</sup> время истечения порошка через воронку Холла может варьироваться от 17 до 27 с. Исключение составляет порошок ПЖРВ, у которого насыпная плотность существенно меньше, чем у всех остальных порошков (3,36 г/см<sup>3</sup>), а время истечения через воронку Холла больше всех остальных и составляет 34,1 с, что можно объяснить высокой пористостью частиц порошка, большим объемом навески и сильно разветвленной поверхностью. При фактическом нормировании насыпной плотности порошков на время истечения навески в 50 г получается достаточно удовлетворительная зависимость удельного расхода от времени истечения (рисунок 2б). Даже несферический порошок ПЖРВ практически укладывается в эту зависимость. Также можно утверждать, что связи между текучестью и гранулометрическим составом не выявляется. Например, самые мелкие порошки 25Х15К и ЮНДК обладают практически такой же текучестью, что и самый крупный порошок стали 12Х18Н10Т. Таким образом, текучесть и насыпная плотность, а также скорость истечения порошка являются универсальными постоянными для данной конкретной марки и данного гранулометрического состава и могут определять его качество при входном контроле.

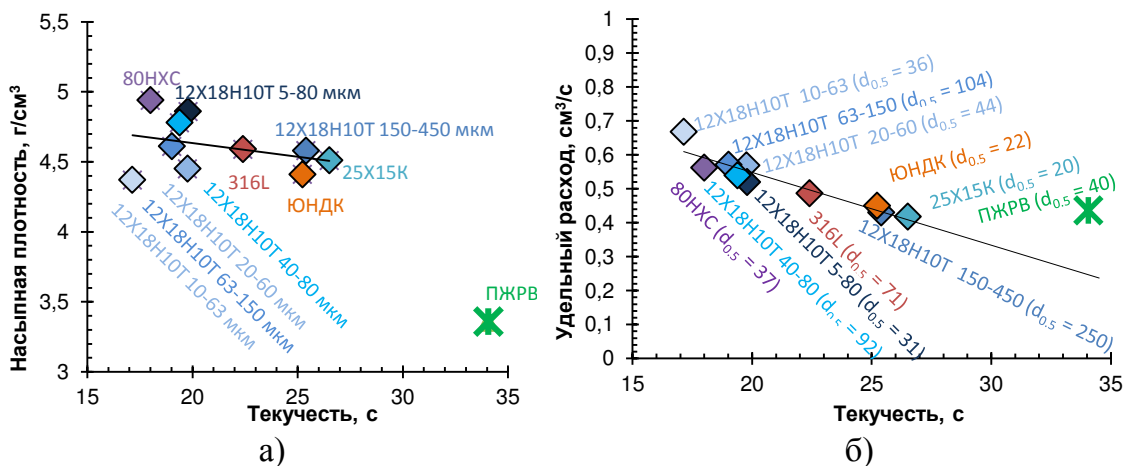


Рисунок 2 – Зависимость насыпной плотности – а) и удельного расхода – б) порошков от текучести

Для анализа влияния параметров работы установок СЛС на структуру и свойства использовалось понятие «энерговложение», вычисляемое как отношение мощности лазера к скорости сканирования. Оптимальные технологические параметры работы установок определялись по пористости получаемых образцов. Как показали эксперименты, построение при энерговложении менее 0,14 Вт·с/мм невозможно, т.к. исследуемые материалы не сплавляются. Построения при энерговложении более

0,38 Вт·с/мм также невозможно, т.к. происходит слишком сильный перегрев материала в области, превышающей температуру плавления исследуемых марок сталей и сплавов. Низкая пористость обеспечивает наилучшие механические и магнитные свойства. Зависимость пересчитанных значений пористости от энерговложения представлена на рисунке 3.

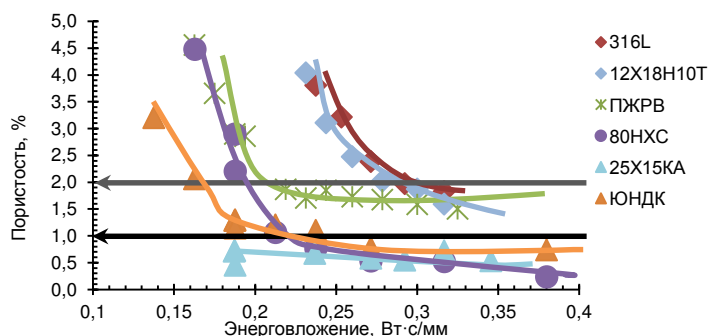


Рисунок 3 – Зависимость значений пористости от энерговложения

Показано, что существует группа порошков (прецизионные сплавы 80НХС, 25X15К и ЮНДК), для которых представляется возможным достичь значений пористости в 1 % и менее по сравнению с классическими монолитными материалами в интервале энерговложений  $0,23 \div 0,37$  Вт·с/мм, при этом для другой группы порошков (ПЖРВ, аустенитные стали 12X18H10T и 316L) не представляется возможным достичь значений пористости менее 1 %, а интервал энерговложений сужается до  $0,30 \div 0,35$  Вт·с/мм. Можно предположить, что при увеличении энерговложения более 0,4 Вт·с/мм можно было бы достичь значений пористости менее 1 % для всех порошков, однако, такое увеличение энерговложения приведет к сильному перегреву или даже закипанию расплава, а также опасно для используемого оборудования. Таким образом, можно заключить, что чем шире диапазон фракционного состава сплавляемого порошка в пределах ограничений технологии СЛС, тем меньше пористость конечного изделия, что можно объяснить упаковкой порошка в слое.

**Четвертая глава** посвящена изучению структуры, механических и магнитных свойств образцов аддитивных сталей и прецизионных сплавов и их сравнению с аналогичными материалами, полученными традиционными технологиямиковки или литья. 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.

Для аддитивных нержавеющей сталей **12X18H10T** и **316L** при увеличении энерговложения от 0,22 Вт·с/мм предел текучести и временное сопротивление монотонно увеличиваются, и при достижении значения  $0,27 \div 0,29$  Вт·с/мм практически не изменяются, а значение пористости в исследуемом диапазоне, согласно данным из главы 3, изменяется с 4 % до 1,5 %, т.е. уменьшается практически в 3 раза. Удлинение и

ударная вязкость при этом линейно увеличиваются практически в 3 раза, так как они должны быть наиболее чувствительны к наличию пор, а твердость практически не меняется. Наглядно показана анизотропия механических свойств в зависимости от направления выращивания образцов (рисунок 4). При этом значения твердости, предела текучести и временного сопротивления СЛС образцов превышают значения, указанные в ГОСТ 5949-75 для монолитных образцов аналогичного химического состава, а КСУ намного меньше: не более 217 Дж/см<sup>2</sup> для стали 316L и не более 199 Дж/см<sup>2</sup> для 12X18H10T.

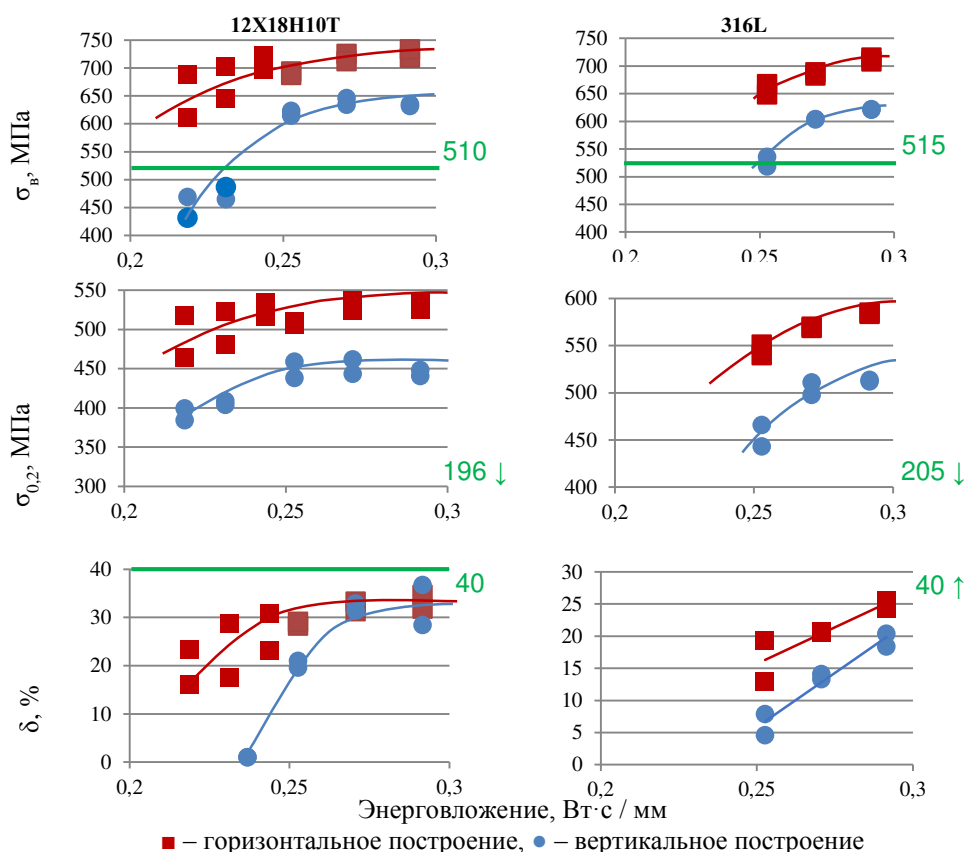


Рисунок 4 – Зависимости механических свойств СЛС сталей от энергозатрат и направления построения

В структурах аддитивных сталей основными составляющими отмечены частично перекрывающиеся капли – полусферы, или микрованны расплава, образованные послойным проплавлением частиц порошка, наносимого на выращиваемую поверхность, и последующей кристаллизацией расплава. Присутствуют характерные каплевидные границы размером 100 x 100 мкм, через которые проходят очень мелкие субзерна. При уменьшении энергозатрат структура образцов претерпевает изменения: при энергозатрате 0,29 Вт·с/мм структура микрованн расплава представляет собой турбулентные завихрения, которые сосредоточены внутри области каплевидной формы, а снижение энергозатрат до 0,25 Вт·с/мм приводит к исчезновению турбулентной составляющей, при этом видно, как через каплевидные границы проходят зерна. Аналогичная сталь, полученная ковкой, обладает крупнозеренной структурой;

практически равноосные зерна имеют размер  $20\div 30$  мкм. При большем увеличении внутри областей каплевидной формы выявлена сетчато-столбчатая структура в виде параллельно уложенных дендритных осей первого порядка с характерными размерами около  $0,5\div 0,8$  мкм. Наблюдаемая структура связана с большими скоростями охлаждения тонкого слоя жидкого металла на поверхности слоя-предшественника. Столбчатая структура формируется механизмом эпитаксии на этапе кристаллизации в микроразделах расплава. На полированной поверхности нетравленных шлифов СЛС сталей обнаружены не только поры, но и включения, анализ спектров которых показывает, что они представляют собой сложные оксиды хрома, марганца и кремния.

Эксперименты показали, что сплавление высокопористого и **несферического порошка ПЖРВ** возможно. Ударная вязкость СЛС образцов ПЖРВ незначительно растет при увеличении энергозатрат, при этом численные значения остаются низкими во всем диапазоне построения и существенно меньше, чем в аналогах, полученных традиционными металлургическими технологиями, – не более  $15 \text{ Дж/см}^2$ . При этом механические свойства СЛС ПЖРВ повышенные: предел текучести составил 720 МПа, а наибольшее значение сопротивления деформации достигло 1050 МПа, что превышает аналогичные показатели монолитного материала аналогичного химического состава. Структура аддитивного материала ПЖРВ представляет собой частично перекрывающиеся капли – полусферы. При больших увеличениях наблюдаются очень мелкие субзерна, несмотря на сильную несферичность и высокую пористость исходного порошка ПЖРВ. В целом структура представляет собой мелкозернистый феррит с размером зерна порядка  $5\div 20$  мкм, что объяснимо быстрым охлаждением сплавляемого участка после отвода лазерного луча. В пределах одних участков были обнаружены равноосные рекристаллизованные зерна размером до 20 мкм, в других – одинаково ориентированные неравноосные кристаллиты с соотношением осей  $\sim 1:3$ . Кристаллиты образуют группы в форме дугообразных слоев шириной по фронту до 80 мкм. После проведения измерений в исходном состоянии, СЛС образцы ПЖРВ подвергались ТО при температуре рекристаллизации  $1125 \text{ }^\circ\text{C}$ , при этом максимальная магнитная проницаемость составила 871 Гс/Э и значительно уступает требованиям к аналогам из ГОСТ 11036-75, а коэрцитивная сила намного выше аналогов (582 А/м), что может быть объяснено мелкозернистым строением СЛС образцов, поскольку коэрцитивная сила обратно пропорциональна размеру зерна ( $H_c \sim 1/d$ ).

Для СЛС **магнитомягкого сплава 80НХС** были уточнены технологические режимы, установленные в главе 3: энергозатраты должны составлять  $0,32 \text{ Вт}\cdot\text{с/мм}$ , а при других режимах в образцах отмечено присутствие крупных включений. Получены следующие механические свойства СЛС материала 80НХС в состоянии без ТО: предел прочности 540 МПа, предел текучести 145 МПа, относительное удлинение 40 %, что превышает значения, указанные в ГОСТ для кованных образцов 80НХС, при этом ударная

вязкость ( $220 \text{ Дж/см}^2$ ) практически в 1,3 раза меньше. Результаты измерений магнитных характеристик колец из сплава 80НХС, построенных методом СЛС и выточенных из кованных заготовок (прутков), представлены на рисунке 5 для различных режимов ТО.

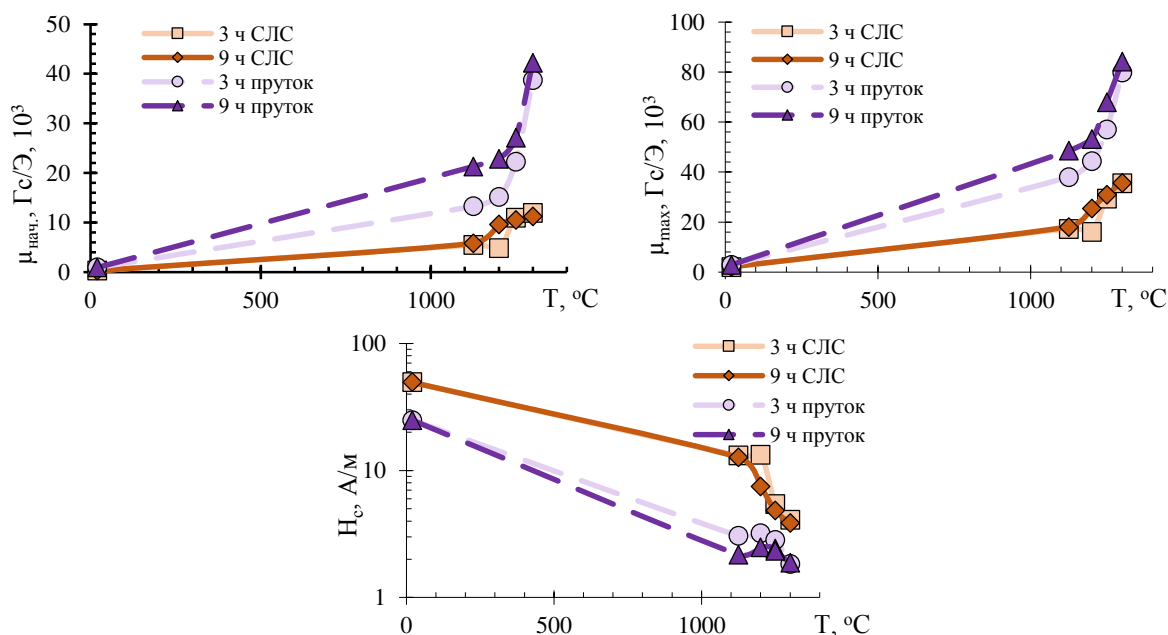


Рисунок 5 – Изменение магнитной проницаемости и коэрцитивной силы образцов из сплава 80НХС в зависимости от режима ТО

Исходя из проведенного исследования, определен оптимальный режим ТО для получения максимальных магнитных характеристик: выдержка 9 ч при температуре  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ . При этом значения, определяемые ГОСТ 11036-75, достигаются только для выточенных колец, но полученные характеристики СЛС сплава 80НХС удовлетворяют требованиям, предъявляемым АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» к материалам экранирующих корпусов гироскопов: максимальная магнитная проницаемость  $\mu_{max}$  составила  $35710 \text{ Гс/Э}$ , индукция  $B_s$   $0,63 \text{ Тл}$ , коэрцитивная сила  $H_c$   $3,1 \text{ А/м}$ . Различия магнитных свойств СЛС и выточенных из кованных заготовок образцов свидетельствуют о том, что в них по-разному протекают процессы релаксации напряжений и рекристаллизации в процессе ТО (рисунок 6). Если структуры материалов в исходном состоянии приблизительно одинаковы, то после проведения ТО начинают сильно различаться. В выточенных образцах после отжига длительностью 9 ч при разных температурах зерно увеличивается до  $1200 \text{ мкм}$ . В СЛС материале после ТО при температуре  $1125 \text{ }^\circ\text{C}$  формируется разнотернистая структура:  $\sim 20 \%$  зерен размером  $200 \text{ мкм}$  имеют вытянутую вдоль направления построения образца форму, остальные рекристаллизованные зерна размером от  $20$  до  $80 \text{ мкм}$  имеют извилистые границы; повышение температуры до  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  приводит к выравниванию разнотернистости аустенита, средний размер зерен составляет уже  $300 \text{ мкм}$ . EBSD анализ ковального металла в исходном состоянии выявил деформационную дисперсную микроструктуру со средним размером фрагмента около  $3 \text{ мкм}$ . Таким образом, зерна размером до  $250 \text{ мкм}$ ,

наблюдаемые на оптических изображениях, имеют дисперсную субструктуру деформационного происхождения. Накопленная при деформационной обработке деформация способствует протеканию статической рекристаллизации и значительному росту зерна при ТО. Согласно расчетам, эффективный диаметр окружности (ЭДО) для аддитивного образца в исходном состоянии составляет  $\sim 9$  мкм, а после ТО  $1300^\circ\text{C}$  в течение 9 ч –  $\sim 282$  мкм.

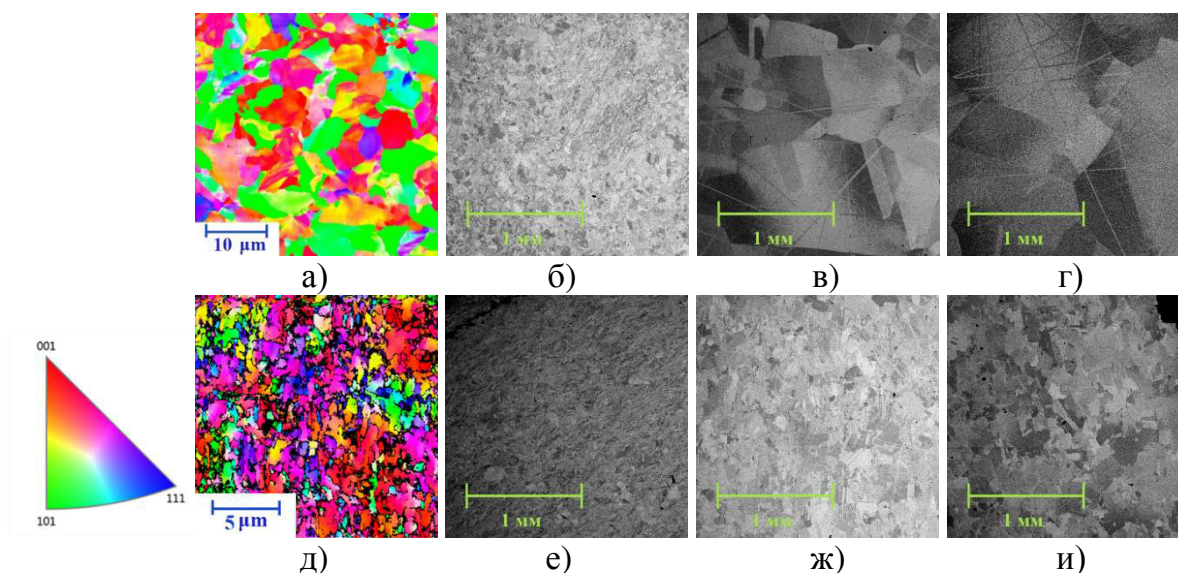


Рисунок 6 – EBSD анализ ковального – а) и СЛС – д) сплава 80НХС в исходном состоянии, а также микроструктура выточенных – б, в, г) и СЛС – е, ж, и) образцов: без ТО – б, е), ТО  $1125^\circ\text{C}$  в течение 3 ч – в, ж), ТО  $1300^\circ\text{C}$  в течение 9 ч – г, и)

Мелкозернистое строение аддитивного сплава 80НХС определяет повышенные значения коэрцитивной силы, которая возрастает обратно-пропорционально размеру зерна, и, соответственно, пониженные значения остальных магнитных характеристик.

Для магнитотвердого сплава **25X15K(A)** диапазон сплавления был ограничен энергозложением от 0,24 до 0,29 Вт·с/мм согласно результатам измерения пористости. Результаты механических испытаний показали, что в отличие от других аддитивных материалов, происходит рост не только прочностных, но и пластических свойств СЛС образцов 25X15K по сравнению с классическими литейными по ГОСТ 24897-81. Так, ударная вязкость составила  $65 \text{ Дж/см}^2$ , предел прочности 212 МПа, относительное удлинение 19 %, твердость НВ 482. Аддитивные образцы прошли ТМО на АО «Спецмагнит» по режиму, определенному ГОСТ 24897-81, за исключением гомогенизационного отжига, поскольку сама технология СЛС ввиду скоротечности актов нагрева и охлаждения заменила эту операцию (рисунок 7а). После проведения ТМО к обозначению сплава 25X15K в конце добавляют символ *A*, обозначающий магнитную анизотропию. По результатам измерения магнитных характеристик (рисунок 7б, в, г) установлено, что при энергозложении  $0,27 \text{ Вт·с/мм}$  магнитная индукция  $B_r$  и максимальное энергетическое произведение  $(BH)_{max}$  достигают значений, установленных ГОСТ, а коэрцитивная сила по индукции  $H_{cb}$  существенно превышают требования ГОСТ.

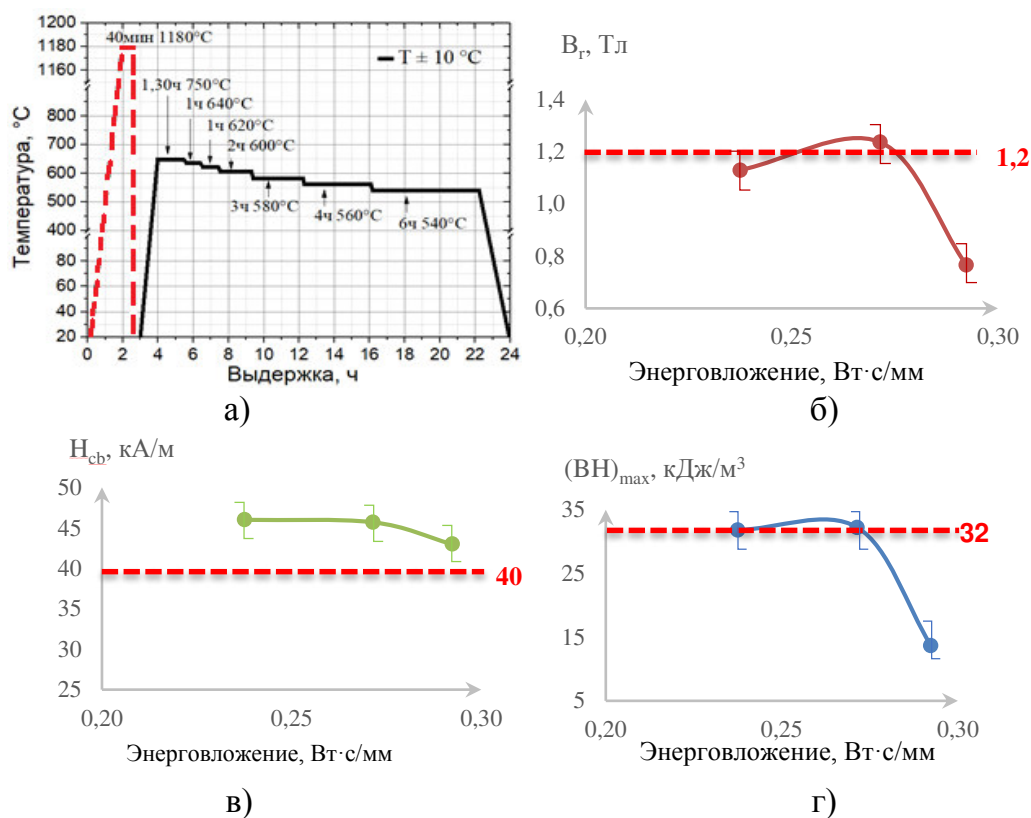


Рисунок 7 – Уточненный режим ТМО сплава 25X15КА – а) и усредненные магнитные свойства СЛС образцов из сплава 25X15КА в зависимости от энергозложения – б, в, г). Пунктирной линией показаны требования ГОСТ

Структурные исследования показали, что основными составляющими аддитивного сплава 25X15КА являются частично перекрывающиеся капли – полусферы. EBSD анализ (рисунок 8) показал, что ЭДО для аддитивного образца составляет 1,6 мкм, для литого – 17,3 мкм. Таким образом, была подтверждена мелкозернистая структура СЛС-сплава 25X15КА. Ввиду наличия особой структуры СЛС образцов 25X15КА наблюдаются повышенные значения  $H_{cb}$ , а, следовательно, и  $(BH)_{max}$ .

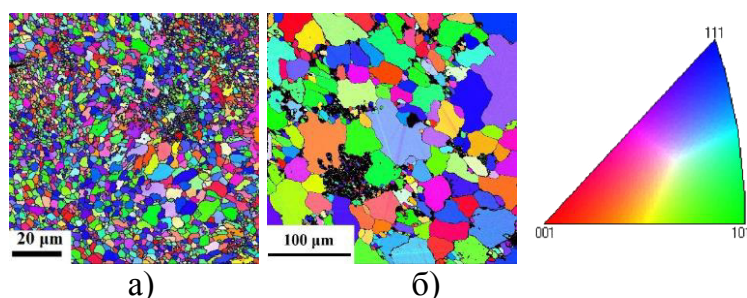


Рисунок 8 – EBSD анализ аддитивного – а) и литого – б) образцов сплава 25X15КА

Методом ПЭМ (рисунок 9) в аддитивном и литом сплавах 25X15К обнаружены включения, которые отличались формой и размерами (в аддитивном они значительно более мелкие) и объемной долей. Химический состав таких включений отличается от основной матрицы металла. Средний эквивалентный диаметр внутризеренных частиц в аддитивном сплаве 25X15КА составил 40 нм, объемная доля включений –  $4,46 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ . Включения в литом образце той же марки обладают другой формой и размерами от 48 до 219 нм. Суммарная объемная плотность таких частиц –  $1,04 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ .

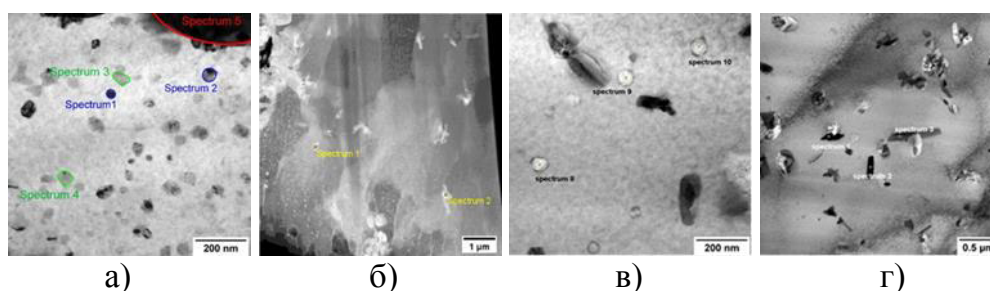


Рисунок 9 – Частицы различной морфологии и размеров в структуре аддитивного – а, б) и литого – в, г) образцов сплава 25X15КА

В целом установлено, что с помощью аддитивных технологий возможно сформировать монолитный магнит из сплава 25X15КА с механическими и магнитными свойствами, не уступающими материалу, полученному по традиционной литейной технологии, а по  $H_{cb}$  – значительно выше, при этом можно не проводить гомогенизационный отжиг, т.е. имеется существенная экономия времени производства изделия по сравнению с литьем.

Неравномерное распределение температур в процессе СЛС (резкий градиент температур в ванне расплава и зоне термического влияния) вызывало расширение и сжатие, появились большие остаточные напряжения, что привело к трещинообразованию структурно-чувствительного магнитотвердого сплава ЮНДК (рисунок 10а), поэтому типичные подходы к подбору режимов СЛС для этого сплава не применимы и требовали уточнения всех доступных технологических параметров.

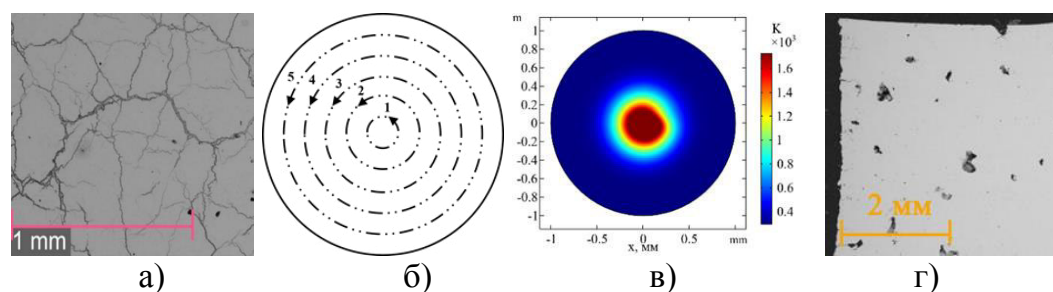


Рисунок 10 – Трещины в СЛС образцах ЮНДК – а); схематичное представление и результаты моделирования кольцевой траектории сканирования к центру – б, в); а также микроструктура образца, полученного при таком сканировании – г)

Был проведен эксперимент с изменением способа сканирования поверхности порошка (ширина блоков сканирования 5; 2,5; 1 мм) и количеством сканирований (одинарное либо двойное). Изменением стратегии сканирования удалось уменьшить скорость охлаждения образцов, но недостаточно для того, чтобы полностью исключить образование трещин. Была предложена модель СЛС-образца с траекторией прохода лазерного луча кольцевой закраской (рисунок 10б, в) – с движением от центра образа и к центру. В структуре образцов с кольцевыми траекториями сканирования присутствует мелкая сетка трещин в радиальном направлении на глубину около 300 мкм от поверхности, но отсутствуют крупные трещины в объеме образца (рисунок 10г). Однако, данные образцы отличаются наличием большого количества пор, которые точно также



привели к снижению механических и магнитных свойств, в связи с чем для образцов с кольцевой траекторией сканирования опробованы двойное (с шагом 76 мкм и 38 мкм) и тройное (с шагом 75 мкм, 50 мкм и 25 мкм) сканирование. При многократном кольцевом сканировании многократный переплав металла в одном слое способствовал возникновению еще большего уровня термических напряжений, что привело к образованию сетки радиальных трещин по всему объему, большой шероховатости поверхности и большому числу крупных пор. Таким образом, возможности технологического оборудования не позволили изготовить магнит из порошка ЮНДК.

Для всех аддитивных материалов при прохождении лазером порошкового слоя было отмечено наличие треков от разлетающихся частиц (рисунок 11а), которые взаимодействовали с остаточным кислородом камеры построения, а затем конденсировались как на порошковый слой, так и на элементы установки СЛС в виде “гари” (рисунок 11б, в). После изучения “гари” можно предположить, что ее крупные частицы представляют собой структуру “ядро-оболочка”, где ядро металлическое, а оболочка оксидная, и являются разлетевшимися брызгами, видимыми на треках, которые окислились в процессе полета. По этой причине в крупных частицах соотношение элементов довольно близко к стехиометрическому составу исходных порошков. В мелких частицах “гари” (менее 2 мкм) химический состав совершенно не совпадает с исходным порошком, а механизм их образования подлежит уточнению.

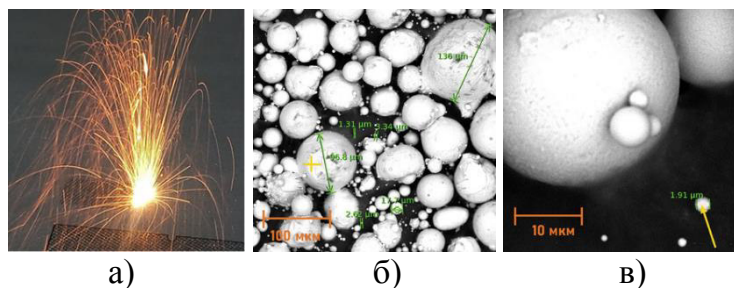


Рисунок 11 – Разлет частиц из зоны воздействия лазера – а) и СЭМ изображения “гари” 25X15К – б, в)

Проведенные исследования позволили приступить к разработке технологии СЛС ферромагнитных материалов системы Fe-Cr-Ni(-Co) для получения на их основе элементов навигационной техники.

**В пятой главе** представлена технология изготовления деталей гироскопов из магнитомягкого сплава 80НХС и магнитов кольцевой формы из магнитотвердого сплава 25X15КА с минимальными допусками на механическую обработку методом СЛС в интересах АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» и АО «Спецмагнит», соответственно. Поскольку эксперименты по сплавлению порошка ПЖРВ показали, что несферический порошок возможно использовать в технологии СЛС, для преодоления ограничения по выходу годного порошков магнитотвердых сплавов была доработана технологическая цепочка их получения: сферический порошок фракции >80 мкм доизмельчался сухим

струйным методом. Для его реализации была разработана и изготовлена специальная установка – струйная мельница. Доизмельчение проводилось в среде защитного газа азота, при этом основным технологическим параметром являлось давление на форсунке. Установлено, что струйное измельчение порошка сплава ЮНДК необходимо проводить при давлении на форсунке 0,5 МПа, а сплава 25Х15К – при давлении на форсунке 1 МПа. Полученные измельчением порошки были смешаны с помощью вибропривода в пропорциях от 1 к 1 до 1 к 4 со сферическими порошками соответствующих марок фракции <80 мкм. Исходя из этого, была обеспечена возможность полезного использования практически всего исходного материала и был повышен процент годного до 96 %. На способ получения смесей порошковых магнитотвердых сплавов 25Х15К получен патент на изобретение, который был успешно реализован по договору передачи исключительного права в АО «Спецмагнит».

По чертежам, представленным АО «Спецмагнит», выполнены 3D-модели, по которым при энергозатрате 0,27 Вт·с/мм изготовлены в размер постоянные магниты – рисунок 12. Полученные изделия подверглись ТМО с исключением операции гомогенизационного отжига. На процесс изготовления СЛС постоянных магнитов разработана и передана АО «Спецмагнит» технологическая инструкция.

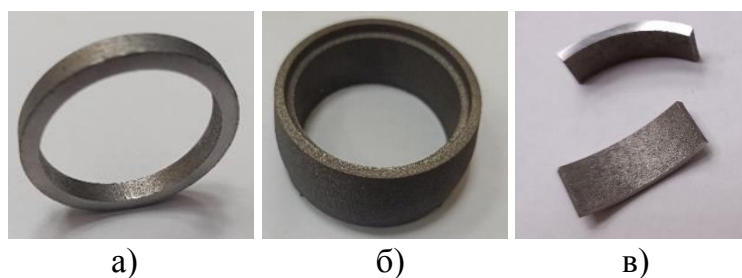


Рисунок 12 – Аддитивные магниты – изделие шифр «Пума» – а), изделие КМ1.155.01.01.333 – б), изделие Ее7.770.926 – в)

Согласно методике, применяемой АО «Спецмагнит», для контроля качества кольцевых магнитов строятся синусоидальные кривые распределения магнитной индукции и оцениваются коэффициенты их искажения  $K_2$  и  $K_3$ . Технические требования на литой кольцевой магнит предполагают значение  $H_{cb}$  не менее 41 кА/м, значения индукции на полюсах  $B_{II}$  не менее 25 мТл, а распределение магнитной индукции в контрольной системе должно иметь синусоидальную форму и коэффициенты  $K_2$  и  $K_3$  распределения должны быть не более 25 %. Для аддитивного кольцевого СЛС магнита из сплава 25Х15КА удалось достичь следующих значений:  $H_{cb} = 46,5$  кА/м,  $B_{II} = 31$  мТл,  $K_2 = 2,85$  %,  $K_3 = 22,36$  %, что полностью соответствует требованиям ГОСТ 24897-81 и АО «Спецмагнит». Металлографические исследования травленных кусков, отколотых от кольцевого СЛС магнита «Пума», показали, что в состоянии после намагничивания и после термического размагничивания структура практически не различается, что косвенно подтверждает устойчивость структуры СЛС магнита к термическим

воздействиям. Таким образом, кольцевые магниты из сплава 25X15КА, изготовленные по технологии СЛС, прошли успешные испытания на АО «Спецмагнит». На способ получения бездефектных кольцевых постоянных магнитов марки 25X15КА селективным лазерным сплавлением получен патент на изобретение.

При выбранных в главе 4 для магнитомягкого сплава 80НХС параметрах сплавления и термообработки (9 ч при температуре 1300 °С) были изготовлены согласно 3D-моделям и термообработаны опытные экземпляры камер, имитирующих работу защитного магнитного экрана гироскопа. Построенные детали были соединены лазерной сваркой. Далее они были установлены в имитатор корпуса гироскопа (рисунок 13) вместо подобных деталей, выточенных из кованных заготовок.



Рисунок 13 – Имитаторы корпуса в сборе

Согласно выполненным измерениям,  $K_{экр.}$  составил порядка 82, что считается достаточным. Что касается магнитных свойств, максимальная магнитная проницаемость  $\mu_{max}$  составила 33201 Гс/Э, индукция  $B_r$  – 0,63 Тл, коэрцитивная сила  $H_c$  – 2,5 А/м, что полностью соответствует требованиям АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Испытания на вакуумную плотность показали значение натекания  $1,2 \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>·Па/с, что даже превосходит предъявляемые требования. На способ получения магнитных экранов из сплава 80НХС селективным лазерным сплавлением получен патент на изобретение. Таким образом, исследования показали реальную возможность изготовления деталей гироскопов из магнитомягкого сплава 80НХС методом СЛС, что подтверждается актом внедрения.

**В Приложениях А-Б** представлена эскизная конструкторская документация. **В Приложении В** представлен акт изготовления струйной мельницы. **В Приложении Г** находится копия Заключения АО «Спецмагнит» о пригодности к использованию аддитивного кольцевого магнита из сплава 25X15КА. **В Приложениях Д-Е** находятся копии актов внедрения результатов диссертационной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально подобраны параметры процесса распыления расплава на установке HERMIGA 75/3IV и получены сферические порошки магнитомягкого сплава 80НХС с выходом фракции <80 мкм на уровне 93 %, магнитотвердых сплавов на уровне до 75 %, который был увеличен с использованием созданной установки струйного измельчения, на которой из сферических порошков дисперсностью более 80 мкм

получены порошки осколочной формы дисперсностью менее 80 мкм, пригодные для СЛС. Установлено, что при смешивании осколочного порошка со сферическим в пропорциях от 1:1 до 1:4 можно добиться наилучшего уплотнения порошка и наименьшей пористости. Данный способ получения смесей порошковых магнитотвердых сплавов 25X15K защищен патентом на изобретение № 2751498, который реализован по договору передачи исключительного права в АО «Спецмагнит».

2. Показано, что параметры текучести, насыпной плотности и скорости истечения являются универсальными постоянными для каждой конкретной марки порошка с данным гранулометрическим составом и могут определять его качество при входном контроле, поскольку они являются мерой состояния поверхности частиц порошка и их морфологии.

3. В диапазоне энергозатрат от 0,14 до 0,38 Вт·с/мм сплавлены порошки всех исследуемых марок, в т.ч. несферические порошки.

4. В структурах аддитивных материалов основными составляющими обозначены частично перекрывающиеся капли – полусферы, образованные послойным проплавлением частиц порошка, наносимого на выращиваемую поверхность, и последующей кристаллизацией расплава. Отмечено мелкозернистое строение всех СЛС материалов, которое положительно сказывается на магнитных свойствах магнитотвердых материалов и отрицательно – магнитомягких.

5. Установлено, что для всех исследуемых и модельных сплавов прочностные свойства значительно выше, чем у сплавов аналогичного химического состава, полученных традиционными металлургическими технологиями. Так, для сплава 25X15КА временное сопротивление составляет 212 МПа вместо 196 МПа, для 12X18Н10Т – 733 МПа вместо 510 МПа, для 316L – 716 МПа вместо 515 МПа, для ПЖРВ – 660 МПа вместо 360 МПа. Пластические свойства аддитивных материалов, наоборот, в несколько раз меньше.

6. Экспериментально подобран режим ТО, позволяющий укрупнить размер зерна сплава 80НХС, полученного селективным лазерным сплавлением, для достижения требуемого уровня магнитных свойств. Для сплава 25X15КА уточнен режим термомагнитной обработки (исключена операция гомогенизирующего отжига), позволяющий сохранить высокий уровень магнитных свойств и сократить количество технологических операций.

7. 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. Структура полученных кольцевым сканированием образцов отличается отсутствием трещин в объеме образца, но содержит крупные поры.

8. Для всех аддитивных материалов отмечено наличие треков от разлетающихся частиц. Крупные разлетающиеся частицы расплавленного металла представляют собой

структуру “ядро-оболочка”, где ядро металлическое, а оболочка оксидная. В этих частицах соотношение элементов довольно близко к стехиометрическому составу исходных порошков. Химический состав мелких частиц совершенно не совпадает с исходным порошком (для стали 12Х18Н10Т – отсутствие никеля, для сплава 25Х15К – пониженное в 1,5 раза содержание хрома и железа, для сплава 80НХС – пониженное в 2,5 раза содержание никеля), содержание кислорода превышает 25 вес. %, а их доля мала.

9. Методом ПЭМ в аддитивном и литом сплаве 25Х15К обнаружены крупные и мелкие включения. Средний эквивалентный диаметр внутризеренных частиц в аддитивном сплаве 25Х15КА составил 40 нм, объемная доля включений –  $4,46 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ . Включения в литом образце той же марки обладают другой формой и размерами от 48 до 219 нм. Суммарная объемная плотность таких частиц  $-1,04 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ .

10. Изготовлена опытная партия бездефектных кольцевых магнитов шифр «Пума» с требуемым уровнем магнитных свойств. Разработка и освоение нового аддитивного технологического процесса изготовления кольцевых магнитов из сплава 25Х15КА подтверждаются актом внедрения в производственную деятельность АО «Спецмагнит» и патентом на изобретение № 2800905, дата приоритета 17 октября 2022 г.

11. Изготовлена опытная партия экранирующих корпусов гироскопов из магнитомягкого сплава 80НХС. Разработка и освоение нового аддитивного технологического процесса изготовления экранирующих корпусов гироскопов из магнитомягкого сплава 80НХС подтверждаются актом внедрения в производственную деятельность АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» и патентом на изобретение № 2822540, дата приоритета 7 августа 2023 г.

В целом, установлено, что с помощью аддитивных технологий возможно сформировать магниты с механическими и магнитными свойствами, не уступающими материалу, полученному по традиционной литейной технологии или вытачиванием из прутка. Превышение показателей твердости, временного сопротивления и предела текучести образцов, полученных СЛС, над аналогичными показателями традиционных образцов идентичного химического состава поможет улучшить тактико-технические характеристики элементов гироскопов, изготавливаемых из магнитотвердых и магнитомягких сплавов аддитивными технологиями.

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Zhukov, A.** Effect of alloying on the 316L and 321 steels samples obtained by selective laser melting / **A. Zhukov, A. Deev, P. Kuznetsov** // **Physics Procedia**. - 2017. - Vol. 89. - pp. 172-178.

2. **Zhukov, A.S.** Columnar fine grained structure and chemical composition features of austenitic stainless steels 316L and 321 produced by the laser beam powder bed fusion / **P.A. Kuznetsov, M.V. Staritsyn, A.S. Zhukov** // **Journal of Physics: Conference Series**. - 2018. - Vol. 1134. - № 012031.

3. **Жуков, А.С.** Десублимация как причина упрочнения материала в процессе селективного лазерного сплавления / **А.С. Жуков**, Б.К. Барахтин, П.А. Кузнецов // **Фундаментальные проблемы современного материаловедения**. - 2018. - Т. 15. № 2. - С. 169-175.

4. **Жуков, А.С.** Факторы повышения прочности металлов, полученных селективным лазерным сплавлением порошков / Б.К. Барахтин, **А.С. Жуков**, В.В. Бобырь, И.В. Шакиров, П.А. Кузнецов // **Вопросы материаловедения**. - 2018. - Т. 3. № 95. - С. 68-75.

**Zhukov, A.S.** Strength Improvement of Metals Produced by Selective Laser Melting of Powders / В.К. Barakhtin, **A.S. Zhukov**, V.V. Bobyr, I.V. Shakirov, P.A. Kuznetsov // **Inorganic Materials: Applied Research**. - 2019. - Vol. 10 № 6. - pp. 1390-1393.

5. **Жуков, А.С.** Получение порошков сплава 25Х15КА для синтеза постоянных магнитов методом селективного лазерного сплавления / И.С. Гавриков, Б.Д. Чернышев, А.В. Камынин, **А.С. Жуков**, Д.Л. Чернышев, П.А. Кузнецов // **Металловедение и термическая обработка металлов**. - 2020. - Т. 782 № 8. - С. 15-21.

**Zhukov, A.S.** Fabrication of Powders of Alloy 25Kh15KA for Synthesizing Permanent Magnets by Selective Laser Melting / I.S. Gavrikov, B.D. Chernyshev, A.V. Kamynin, **A.S. Zhukov**, D.L. Chernyshev, P.A. Kuznetsov // **Metal Science and Heat Treatment**. - 2020. - Vol. 62 Issue 7. - pp. 502-507.

6. **Жуков, А.С.** Структура и магнитные свойства материала системы Fe-Cr-Co, изготовленного методом селективного лазерного плавления / Б.К. Барахтин, **А.С. Жуков**, А.В. Камынин, И.С. Гавриков, Д.М. Анисимов, Д.С. Созинов, М.Л. Федосеев // **Вопросы материаловедения**. - 2020. - Т. 2. № 102. - С. 125-130.

7. **Zhukov, A.S.** Comparison of sequential and circular scanning thermal fields and their influence on microstructure of Alnico alloy produced by laser powder bed fusion / P.A. Kuznetsov, I.V. Shakirov, A.A. Mozhayko, **A.S. Zhukov**, V.V. Bobyr // **Journal of Physics: Conference Series**. - 2021. - Vol. 1967. - № 012064.

8. **Жуков, А.С.** Структурно-механическое состояние сплава ЮНДК35, полученного методом селективного лазерного сплавления / **А.С. Жуков**, И.В. Шакиров, А.В. Олисов, Б.К. Барахтин, С.Н. Перевислов // **Металлург**. - 2021. - Т. 10. - С. 72-77.

**Zhukov, A.S.** Structural and Mechanical State of AlNiCo35 Alloy Produced by Selective Laser Melting / **A.S. Zhukov**, I.V. Shakirov, A.V. Olisov, B.K. Barakhtin, S.N. Perevislov // **Metallurgist**. - 2022. - Vol. 65 Issue 9-10. - pp. 1149-1156.

9. **Жуков, А.С.** Строение и магнитные параметры аддитивного сплава системы Fe-Cr-Co / **А.С. Жуков**, Д.С. Созинов, Э.А. Ушанова, И.С. Гавриков // **Динамика систем, механизмов и машин**. - 2021. - Т. 9 № 2. - С. 3-9.

**Zhukov, A.S.** The structure and magnetic parameters of the Fe-Cr-Co additive alloy / **A.S. Zhukov**, D.S. Sozinov, E.A. Ushanova, I.S. Gavrikov // **Journal of Physics: Conference Series**. - 2022. - Vol. 2182. - № 012084.

10. **Zhukov, A.** Modeling of LPBF Scanning Strategy and its Correlation with the Metallic 316 L, 321, and Alnico Magnets Samples Structure / P. Kuznetsov, A. Mozhayko, I. Shakirov, V. Bobyr, M. Staritsyn, **A. Zhukov**. - Rieka: IntechOpen, 2022. - 25 pp.

11. **Жуков, А.С.** Синтез постоянных магнитов 25X15K и исследование их свойств в условиях эксплуатации в магнитных и термических полях / **А.С. Жуков, В.В. Бобырь, И.В. Шакиров, А.В. Олисов, Б.К. Барахтин, В.А. Сеин** // **Металловедение и термическая обработка металлов.** - 2023. - Т. 5 № 815. - С. 36-41.

**Zhukov, A.S.** Synthesis of 25Kh15K Permanent Magnets and Study of Their Properties in Service in Magnetic and Thermal Fields / **A.S. Zhukov, V.V. Bobyr, I.V. Shakirov, A.V. Olisov, B.K. Barakhtin, V.A. Sein** // **Metal Science and Heat Treatment.** - 2023. - Vol. 65 Issue 5-6. - pp. 298-303.

12. **Жуков, А.С.** Исследование структуры и магнитных свойств аддитивного магнитомягкого сплава 80НХС / **А.С. Жуков, С.А. Маннинен, М.А. Тит, А.В. Олисов, Т.В. Князюк, П.А. Кузнецов** // **Физика металлов и металловедение.** - 2023. - Т. 124 № 4. - С. 353-359.

**Zhukov, A.** A Study of the Structure and Magnetic Properties of the Soft Magnetic 80 Chromium Permalloy Manufactured by Additive Technology / **A.S. Zhukov, S.A. Manninen, M.A. Tit, A.V. Olisov, T.V. Knyazyuk, P.A. Kuznetsov** // **Physics of Metals and Metallography.** - 2023. - Vol. 124 Issue 4. - pp. 334-340.

13. **Жуков, А.С.** Изготовление изделий из ферромагнитных материалов на основе сплавов систем Fe-Cr-Ni (-Co) с помощью аддитивных технологий / **А.С. Жуков** // **Электронная техника. Серия 1 "СВЧ-техника".** - 2023. - Т. 3 № 559. - С. 6-16.

14. **Жуков, А.С.** Влияние гранулометрического состава порошков сталей и прецизионных сплавов и режимов их сплавления методом СЛС на пористость / **А.С. Жуков, П.А. Кузнецов** // **Вопросы материаловедения.** - 2024. - Т. 1 № 117. - С. 117-126.

15. **Патент РФ № 2751498** Способ получения порошковых магнитотвердых сплавов на основе системы Fe-Cr-Co / **А.С. Жуков, П.А. Кузнецов, Е.А. Самоделкин, 14.07.2021, бюл. № 20.**

16. **Патент РФ № 2800905** Способ получения бездефектных кольцевых постоянных магнитов марки 25X15K селективным лазерным сплавлением / **А.С. Жуков, В.В. Бобырь, В.А. Сеин, И.В. Шакиров, Д.М. Абашев, В.Н. Климов, А.Н. Скворцова, Е.Ю. Геращенко, 31.07.2023, бюл. № 22.**

17. **Патент РФ № 2822540** Способ получения магнитных экранов из сплава 80НХС селективным лазерным сплавлением / **А.С. Жуков, С.А. Маннинен, М.А. Тит, П.А. Кузнецов, А.А. Можайко, Л.В. Мухамедзянова, А.В. Хорев, 08.07.2024, бюл. № 19.**