

На правах рукописи



Брыкин Вениамин Андреевич

**Влияние параметров селективной лазерной плавки на структуру
и физико-механические свойства изделий из металлопорошковой
композиции AlSi10Mg**

Научная специальность

2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2024

Работа выполнена на кафедре 904 «Инженерная графика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: кандидат технических наук
Рипецкий Андрей Владимирович

Официальные оппоненты: **Трушников Дмитрий Николаевич**
доктор технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет», профессор

Колчанов Дмитрий Сергеевич
кандидат технических наук,
ООО «Южный завод тяжелого
станкостроения»,
ведущий инженер-технолог

Ведущая организация: АНОО ВО «Сколковский институт
науки и технологий»

Защита состоится «12» декабря 2024г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д.3., ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvortsovasv@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета) и на сайте <https://mai.ru/upload/>

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета



Скворцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Аддитивное производство с начала 21-го века образовало уникальный интенсивно развивающийся технологичный сегмент в машиностроении. Внимание к этой области производства также поддерживается практическими результатами и расширяющимся списком технологических возможностей, которые предоставляют аддитивные технологии. Такими возможностями стали в частности: высокий коэффициент использования материала, возможность создания изделий уникальных геометрически и технологически сложных форм, а также высокая эффективность технологии на этапах проведения опытных работ. Актуальный мировой уровень развития аддитивного производства показывает, что заготовки, полученные из различных металлопорошковых композиций, в том числе и методом селективной лазерной плавки (СЛП), используются в качестве полностью функциональных изделий. В свою очередь управление параметрами технологии (в т.ч. и значением энергозатрат при синтезе) позволяет достигать высоких физико-механических свойств для решения прикладных задач машиностроения.

Учитывая описанные преимущества, стратегия развития аддитивных технологий в России к 2030 году предполагает значительный рост номенклатуры оборудования и материалов для синтеза изделий. В настоящее время для каждого 3D-принтера, работающего по технологии СЛП с выбранной порошковой композицией, необходим уникальный набор технологических параметров. Процесс поиска допустимых значений этих параметров представляет собой длительный цикл работ, проводимых инженером-технологом на этапе технологической подготовки производства. При смене порошкового материала или при запуске новой установки весь этап опытно-конструкторских и технологических работ аддитивного производства затягивается на недели. В связи с изложенным, перспективным направлением исследований является усовершенствование процесса технологической подготовки аддитивного производства методом селективной лазерной плавки с использованием инструментов поддержки принятия технологических решений.

В выполненных при участии автора исследованиях технологических процессов и материалов аддитивного производства, проводимых в рамках реализации этапов государственного задания 2020-2023 гг. [FSFF-2023-0004], была выявлена и обоснована необходимость разработки методики и компьютерных программ для автоматизации подбора параметров селективного лазерного плавления с учётом свойств металлопорошковых композиций и получаемых заготовок.

Таким образом, устранение недостатков существующей технологии (и процесса её подготовки) за счёт разработки программных инструментов, позволяющих обеспечить эффективный технологический процесс селективной лазерной плавки с учетом существующих ограничений, связанных с технологией, оборудованием и материалами, является актуальной задачей.

Цель диссертационной работы состоит в разработке методики автоматизированного подбора параметров технологии селективной лазерной плавки металлопорошковых композиций для достижения требуемых структуры и физико-механических свойств изделий.

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

1. Провести анализ существующих методов технологической подготовки и опытных технологических работ (ОТР) аддитивного производства изделий;

2. Провести типизацию и декомпозицию проводимых опытных работ с учетом требований, предъявляемых к процессу выращивания, сформировать алгоритм поиска оптимальных параметров аддитивного производства изделий с учетом технологических ограничений и требований к качеству процесса/изделия;

3. Исследовать влияние технологических параметров процесса селективной лазерной плавки на пористость и физико-механические характеристики образцов и готовых изделий;

4. Разработать программные инструменты экспресс-анализа результатов опытных технологических работ аддитивного производства и оптимизации набора технологических параметров с целью достижения требуемых характеристик изделия и снижения времени, затрачиваемого на цикл опытных работ;

5. Применить результаты исследований при создании новых методических решений, которые обеспечили бы усовершенствование технологического процесса селективной лазерной плавки, сокращение сроков опытных работ по поиску оптимальных параметров процесса с точки зрения структуры и физико-механических свойств получаемого изделия.

Научная новизна.

1. Установлены закономерности влияния определяющих параметров энергоклада (мощности лазерного излучения, скорости сканирования и толщины слоя насыпаемого порошка) на механические свойства и морфологию микроструктуры объектов, синтезируемых методом СЛП порошка сплава RS-300-45. Показано, что увеличение высоты слоя с 30 до 90 мкм при синтезе изделий на отечественной установке Addsol D50 приводит к трёхкратному росту величины зерен α -Al в процессе кристаллизации, что определяет увеличение относительного удлинения при разрыве в 3,2 раза.

2. Разработана программа экспресс-анализа влияния выбранных параметров технологического процесса СЛП на формирование единичного трека порошкового материала, позволяющая определять эффективные наборы параметров линейного энергоклада в соответствии с критериями качества трека. Для российской установки Addsol D50 и порошка сплава AlSi10Mg установлен диапазон параметров (мощность лазерного излучения [220:400] Вт и скорость сканирования [200:1400] мм/с), гарантирующий синтез непрерывных единичных треков.

3. Разработана программа экспресс-анализа и автоматизации исследования объемных объектов, выращенных с помощью технологии СЛП. Инструмент позволяет определить наборы оптимальных технологических параметров, обеспечивающих процесс выращивания объектов с требуемыми уровнем пористости и морфологией структуры. Для российской установки Addsol D50 и порошка сплава AlSi10Mg установлены параметры [325 Вт; 900 мм/с; 30 мкм], позволяющие достичь относительной плотности образцов в 99,5% и однородной дендритно-ячеистой структуры со средним размером зерен α -Al – 1-1,5 мкм.

4. Установлено, что при фиксированном диаметре лазерного пятна уменьшение параметра скорости сканирования с одновременным увеличением параметра мощности лазерной экспозиции и толщины слоя с 30 до 90 мкм способно увеличить ширину приграничной зоны ванны расплава до 11 мкм, что нарушает мелко-ячеистую структуру сплава и снижает прочностные характеристики образцов и изделий (вплоть до 15% по сравнению с наиболее эффективными параметрами).

Теоретическая и практическая значимость.

1. Предложено научно-методическое обеспечение подготовки технологического процесса аддитивного производства методом СЛП с учетом структуры и физико-механических свойств синтезируемых изделий, включающее программные компоненты и методику экспериментов.

2. Разработаны программы экспресс-анализа и методика для исследования и поиска оптимальных параметров энергоклада с учетом требований к пористости, структуре и свойствам изделий, что позволило сократить сроки этого этапа опытных работ на 53,5% для отечественной установки Addsol D50 и порошка сплава AlSi10Mg.

3. Для исследованного материала порошка сплава AlSi10Mg и отечественной установки Addsol D50 определены параметры процесса СЛП [325 Вт; 900 мм/с; 30 мкм], позволяющие достичь пористости – 0,3%, предела прочности на разрыв – 341,5 МПа и относительного удлинения – 2,65%.

4. Полученные результаты используются в опытных технологических работах аддитивного производства в АО «Лазерные системы», что подтверждено соответствующим актом.

Методология и методы исследования.

Методология и методы исследования определены, исходя из формулирования задач исследования: анализ научно-технической литературы, проведение экспериментов, анализ хода процесса селективной лазерной плавки металлопорошковых композиций, исследование образцов и систематизация полученных результатов.

Математическая задача формирования технологических параметров процесса аддитивного производства в условиях конструктивно-технологических ограничений представлена как задача многокритериальной дискретной оптимизации.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Методика проведения опытных технологических работ по поиску оптимальных параметров процесса селективной лазерной плавки с учетом требований к конечному изделию и ограничений, накладываемых особенностями технологического процесса, оборудованием и свойствами материала.

2. Результаты исследования физико-механических свойств и морфологии микроструктуры образцов из порошка RS-300-45 сплава AlSi10Mg.

3. Разработанные программы экспресс-анализа и автоматизации исследования процесса формирования объемных объектов и единичных треков, полученных СЛП.

4. Рациональные наборы параметров технологического процесса СЛП, полученные для отечественной установки Addsol D50 и металлопорошковой композиции RS-300-45.

Степень достоверности результатов

Все результаты получены на поверенном оборудовании с использованием лицензионного программного обеспечения. Стандартные испытания и исследования проводились в соответствии с требованиями научно-технической документации, действующей на территории Российской Федерации (ГОСТ и ISO). Достоверность разработанных методик и моделей обеспечивается надежностью аппарата анализа соответствующих технологических процессов и подтверждается сравнением эффективности предложенных инструментов с уже используемыми на предприятиях и участках аддитивного производства.

Личный вклад автора состоит в его непосредственном и активном участии в формировании цели и задач исследования, в проведении экспериментальных исследований, анализе, обработке и систематизации полученных результатов,

создании программных комплексов экспресс-анализа, формулировке рекомендаций и выводов по диссертации, а также написании публикаций.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 14 научно-технических конференциях (НТК): XVI конференция пользователей CADFEM/ANSYS – 2019, (АО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс», 2019 г.), Sino-Russian Youth Forum and Exchange Camp on Innovation and Entrepreneurship ASRTU-GHMUA, (г. Гуанчжоу, КНР, 2019 г.), 3D КонЦентрАТ (г. Воронеж, 2019-2021 гг.), XIX-XXI Международная НТК «Авиация и космонавтика» (г. Москва, 2020-2022 г.), XLVI-XLVIII Международная молодёжная НТК «Гагаринские чтения» (МАИ, 2020-2022 г.), Международная НТК «Космические системы» (МАИ, 2021 г.), XIV Всероссийская научно-техническая студенческая школа-семинар «Аэрокосмическая декада» (г. Алушта, 2021 г.), НТК им. Е.В. Арменского (МИЭМ НИУ ВШЭ, г. Москва, 2023 г.), а также на ежегодных научно-технических советах кафедры 904 «Инженерная графика» МАИ.

По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, из них 4 – в ведущих рецензируемых изданиях из перечня, рекомендованного ВАК Минобрнауки РФ, 2 – в журналах, индексируемых в международной системе цитирования Scopus. Имеется 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, библиографического списка (108 работ отечественных и зарубежных авторов) и трёх приложений. Общий объем диссертации – 195 страниц, включая 18 таблиц и 92 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении сформулированы цель и задачи работы, обоснована актуальность диссертационного исследования, научная новизна, достоверность и обоснованность результатов, а также теоретическая и практическая значимость работы. Кратко охарактеризованы методы теоретического и экспериментального исследований.

Первая глава посвящена анализу проблем технологического проектирования аддитивного производства из металлопорошковых композиций. Рассмотрены актуальные технологии производства изделий из сплавов – точное литьё, порошковая металлургия и селективная лазерная плавка. Показано, что основной причиной низких значений механических свойств СЛП-образцов является их высокая пористость, что может значительно нивелировать все преимущества по реализации сложной геометрии, которые предоставляет

процесс селективной плавки металлопорошковых композиций. Показана важность тщательного подбора и оптимизации параметров процесса плавки в ходе опытных технологических работ и подготовке управляющей программы.

Разобран типовой процесс технологической подготовки аддитивного производства на примере установки селективной лазерной плавки EOS M270 как в зарубежных программных пакетах, так и с помощью отечественных инструментов. Для сравнительного анализа различных методик технологической подготовки предложены сравнительные критерии, такие как: функционал программных комплексов, возможности анализа корректности действий технолога, оптимизация управляющих программ, требования к квалификации пользователя и другие.

Установлено, что перспективным направлением совершенствования существующих программных комплексов является формирование подходов к экспресс-анализу результатов опытных работ, быстрой оценке качества решения технологических задач и сопутствующего снижению требований к квалификации специалиста, производящего анализ и оптимизацию параметров техпроцесса.

Приведены предпосылки создания системы экспресс-анализа процедур технологической подготовки аддитивного производства. Проведена декомпозиция и определено место задачи подбора параметров в общем цикле опытных технологических работ (ОТР) для аддитивного производства наукоёмких изделий. Внедрение средств экспресс-анализа позволит обеспечить решение задач ОТР с минимальными временными затратами и в то же время с достаточной надёжностью для обеспечения качества дальнейшего аддитивного производства. Декомпозирован процесс поиска набора оптимальных параметров процесса СЛП, выделено место и состав исследовательской задачи в общем объёме ОТР.

На основе анализа литературных данных поставлена цель работы – разработка методики автоматизированного подбора параметров технологии селективной лазерной плавки металлопорошковых композиций для достижения требуемых структуры и физико-механических свойств изделий. Сформулированы задачи исследования. Задача минимизации сроков поискового этапа опытных технологических работ аддитивного производства в условиях конструктивно-технологических ограничений и заданных требований к качеству синтезируемых изделий поставлена как задача многокритериальной дискретной оптимизации.

Вторая глава посвящена описанию объектов и методов исследования, включая методы изготовления образцов и методики проведения экспериментов, а также характеристик использованных материалов и оборудования для аддитивного производства.

В качестве металлопорошковой композиции (МПК) для исследования был взят порошок сплава AlSi10Mg марки RS-300-45 производства компании «Российский алюминий» (ОК РУСАЛ, г. Москва, Россия). RS-300-45 представляет собой серийно выпускаемый алюминиевый сплав с хорошими литейными свойствами. Сплав, как и другие силумины, отличается хорошей жидкотекучестью и низкой литейной усадкой (0,8-1%), что обеспечивает высокую технологичность при СЛП. Широкое применение этого сплава в различных областях современного наукоёмкого машиностроения также подчеркивает актуальность выбора данного материала для решения задач настоящего исследования.

Материал поставляется в виде сферического порошка с размером частиц от 20 до 63 мкм. Химический состав (Таблица 1) и морфология гранул контролируются поставщиком материала.

Таблица 1 – Химический состав материала AlSi10Mg

Марка сплава	Содержание элементов, мас. %										
	Si	Al	Fe	Mn	Ni	Cu	Mg	Zn	Pb	Ti	Sn
AlSi10Mg	11,00	87,1	0,55	0,45	0,05	0,05	0,45	0,1	0,05	0,15	0,05

Изготовление образцов (единичных треков и объёмных образцов-кубов) проводили на установке селективной лазерной плавки Addsol D50 (ООО «Титан-Авангард», Россия), управляющую программу для которой разрабатывали в программном комплексе «ПКТПП» (МАИ, Россия). В качестве инертной среды для обеспечения процесса плавки использовали газ аргон, очищенный методом каталитического гидрирования, соответствующий ГОСТ 10157-2016 (объёмная доля кислорода не более 0,0007%). Исследование образцов единичных треков выполняли на оптическом микроскопе с функцией автофокусировки Saike Digital SK2700HDMI-AF (Shenzhen Saike Digital Technology Development Co., Ltd, КНР).

Изучение микроструктуры полученных образцов осуществляли на поперечных шлифах образцов-кубов после травления посредством погружения в реагент Келлера на 15 секунд. Шлифы изготавливали на оборудовании фирмы Struers (Дания). Исследование механических свойств проводили на универсальной электромеханической машине Instron 5969 (Illinois Tool Works Inc., США). Образцы для испытаний на растяжение по ГОСТ 1497-84 изготавливали и испытывали в количестве 3 шт. для каждого набора исследуемых параметров. Исследование внутренней структуры и пористости синтезированных образцов объёмных объектов проводили с использованием компьютерного томографа Nordson DAGE NT500 XD7600NT Ruby (Nordson DAGE Inc., Великобритания). Обработку результатов томографии выполняли в свободно распространяемом программном обеспечении myVGL 3.5 (Volume

Graphics GmbH, Германия). Также микроструктуру образцов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TFS Quattro S (Thermo Fisher Scientific Inc., США). Исследование химического состава структурных составляющих проводили с помощью системы энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) Bruker QUANTAX (Bruker Corporation, США).

На рисунке 1 приведена полная схема опытных работ по оптимизации параметров технологического процесса селективной лазерной плавки: от исследования единичных треков с нанесением металлического порошкового материала до исследования процесса формирования объемных объектов.

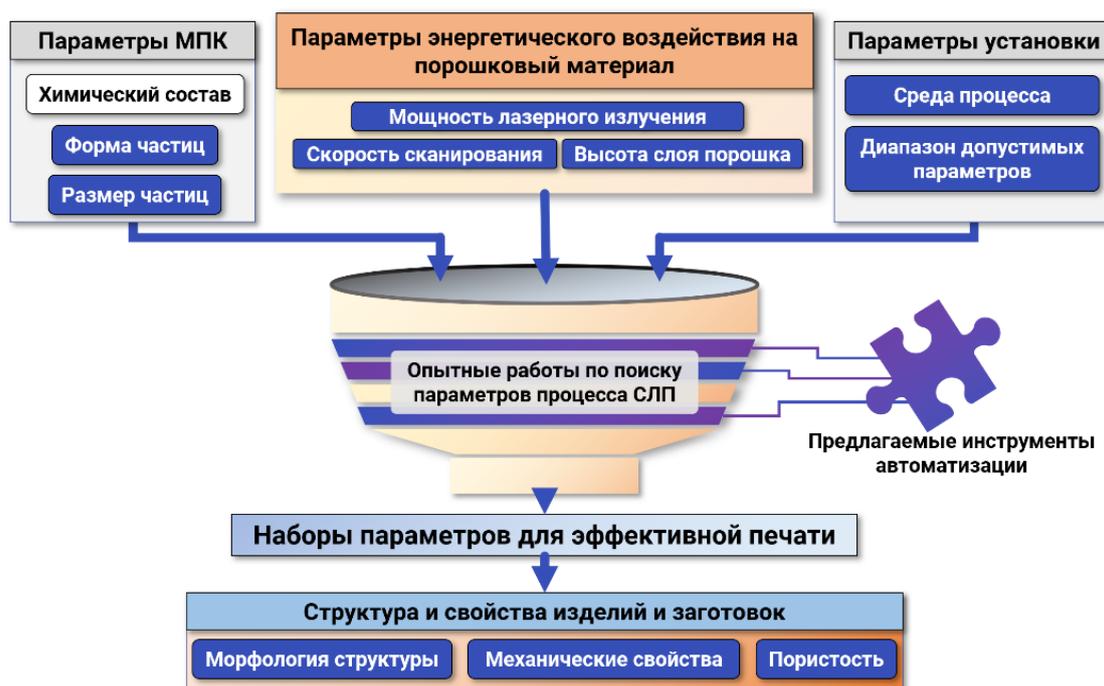


Рисунок 1 – Схема ОТР по поиску оптимальных параметров процесса СЛП

В качестве основных этапов проводимого исследования были реализованы мероприятия по входному контролю МПК, исследованию единичных треков и эксперименты по синтезу и анализу объемных образцов-кубов.

Входной контроль представляет собой анализ партий порошка (исходной и просеянной через сита с ячейками 30 и 60 мкм). Обрабатываются СЭМ-снимки партий МПК, делается вывод о распределении гранул по размерам.

Методом СЛП порошка AlSi10Mg было изготовлено 99 образцов единичных треков, а также 120 объемных образцов-кубов. Единичные треки исследовались на предмет их непрерывности с целью уточнения рационального диапазона параметров для плавки порошка в общем наборе параметров, допустимых для конкретной установки и партии материала. Изготовление объемных образцов-кубов было проведено по уже уточненным (по результатам первого этапа эксперимента) диапазонам технологических параметров.

Программы экспресс-анализа, необходимые для решения поставленной

исследовательской и оптимизационной задачи, были подготовлены в среде разработки Microsoft Visual Studio. Программный код написан на языке Python. Для реализации программного компонента для визуализации данных использовалась библиотека Scikit-image (skimage), Matplotlib и Seaborn.

Третья глава посвящена проведению исследований по поиску эффективных параметров процесса СЛП, обеспечивающих требуемые физико-механические свойства.

Выполнен входной контроль исходной металлопорошковой композиции RS-300-45. Исследована партия исходной смеси порошка непосредственно из упаковки производителя, а также партии, просеянные через сита с размером ячейки 30 и 60 мкм. На рисунке 2 представлены микроструктуры во вторичных электронах просеянных порошков.

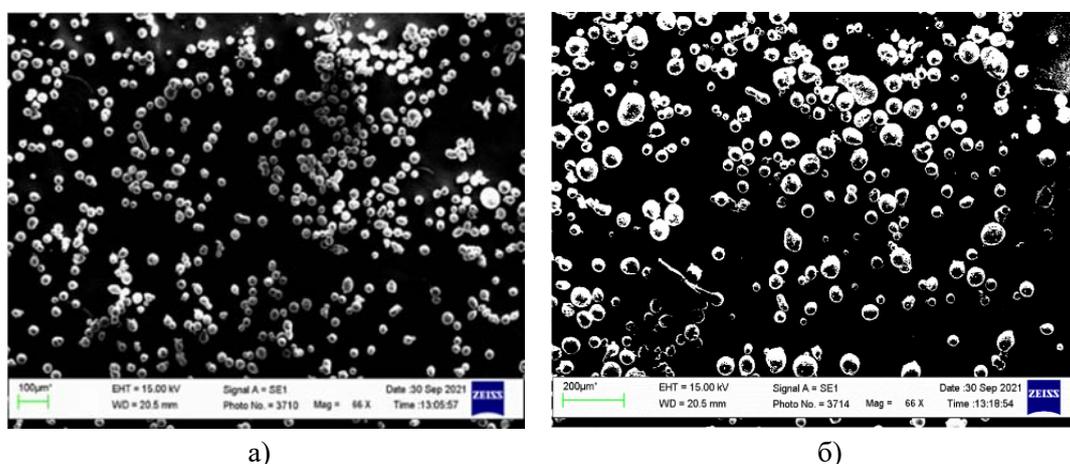


Рисунок 2 – СЭМ-фотографии просевов порошка RS-300-45 через сито с размером ячейки: 30 мкм (а); 60 мкм (б).

С помощью разработанного программного компонента экспресс-анализа входного контроля порошка (см. глава 4) обработаны СЭМ-снимки порошкового материала и построена гистограмма распределения гранул по размерам.

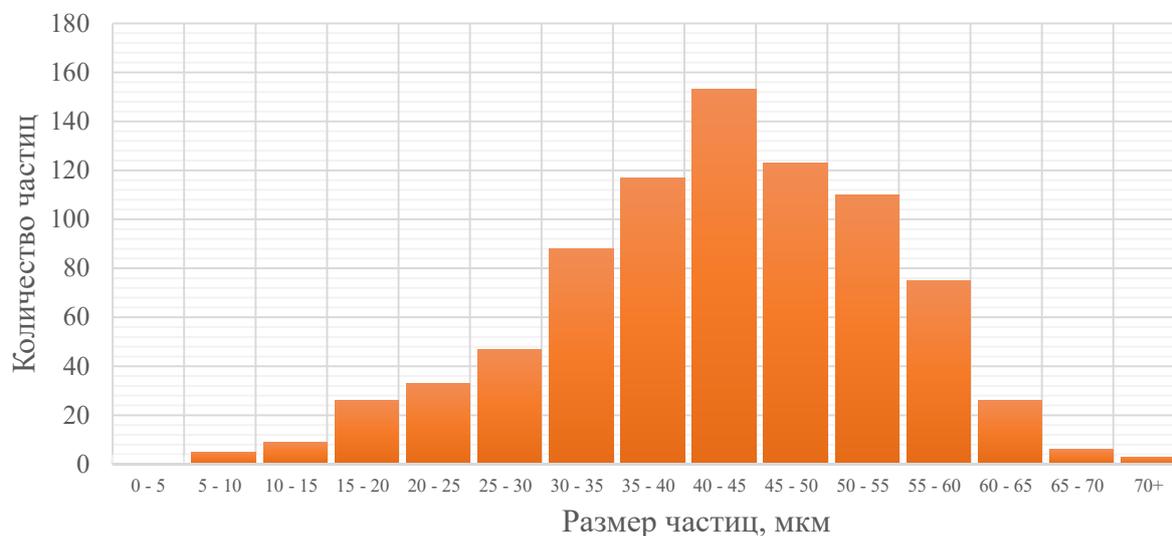


Рисунок 3 – Гистограммы распределения частиц порошка по размерам в исходной смеси

Для исследуемого материала гранулы характеризуются нормальным одномодальным распределением для каждой из партий. Мода размера частиц порошка в исходной смеси составила **26,4 мкм**, при просеве через сито с ячейкой 30 мкм – **25,2 мкм**, а при просеве через сито 60 мкм – **35,3 мкм**.

50-й процентиль (D_{50}) для всей выборки составил 43,4 мкм. Это соответствует паспортному значению 45 ± 2 мкм. Незначительное увеличение моды (на 10 мкм) при сравнении фракций 0-30 и 0-60 мкм в совокупности с нормальным распределением размеров частиц свидетельствуют о соответствии фракционного состава используемого порошкового материала RS-300-45 паспорту, предоставленному производителем – большинство частиц порошка попадает в интервал размеров от 20 до 63 мкм. Полученные данные позволяют исключить потенциальное негативное влияние исходного материала на результаты исследования и использовать его для проведения серии экспериментов по поиску эффективных параметров СЛП.

Ключевыми интегральными характеристиками процесса СЛП являются линейный (1) и объёмный энергозатрат (2). Они объединяют сразу ряд важных технологических параметров, влияющих на пористость, морфологию микроструктуры и, как следствие, механические свойства изделий и образцов:

$$E_l = \frac{P}{V}, \text{ Дж/мм} \quad (1)$$

$$E_v = \frac{P}{dVt}, \text{ Дж/мм}^3 \quad (2)$$

Где:

- P – мощность лазерного излучения;
- V – скорость сканирования (движения лазерного пятна);
- t – высота (толщина) насыпного слоя порошка;
- d – диаметр лазерного пятна;

Для поиска рациональных значений мощности P и скорости сканирования V было проведено исследование единичных треков сплавленного порошка. При изготовлении треков отмеченные параметры P и V варьировали во всем диапазоне допустимых значений для установки и порошкового материала, а остальные параметры техпроцесса (высота слоя, диаметр лазерного пятна и другие, не относящиеся к энергозатрату при СЛП) оставляли неизменными. Мощность лазерного излучения изменяли в диапазоне от 40 до 400 Вт, а скорость сканирования – от 200 до 2000 мм/с, что составляет 90% коридора параметров, возможных на установке Addsol D50.

Управляющую программу готовили в программном обеспечении ПК ТПП (МАИ). В ней проводили компоновку образцов на платформе построения и выбор технологических параметров печати. От трека к треку шаг изменения

мощности лазерного излучения составлял 36 Вт, а шаг изменения скорости – 225 мм/с. Печать проводили в инертной среде аргона. Содержание кислорода во время выращивания треков не превышало 0,8%.

Изготовлены единичные треки и изучена их макроструктура при 30-кратном увеличении с привлечением методов оптической микроскопии. Получен массив JPG-изображений, исследованный в разработанном программном компоненте экспресс-анализа единичных треков (см. глава 4). Результат обработки позволил отделить сегментированные (нестабильные) треки, обусловленные недостаточным энерговыделением при синтезе порошка (Рисунок 4 – а, б), от стабильных непрерывных треков (Рисунок 4 – в, г).

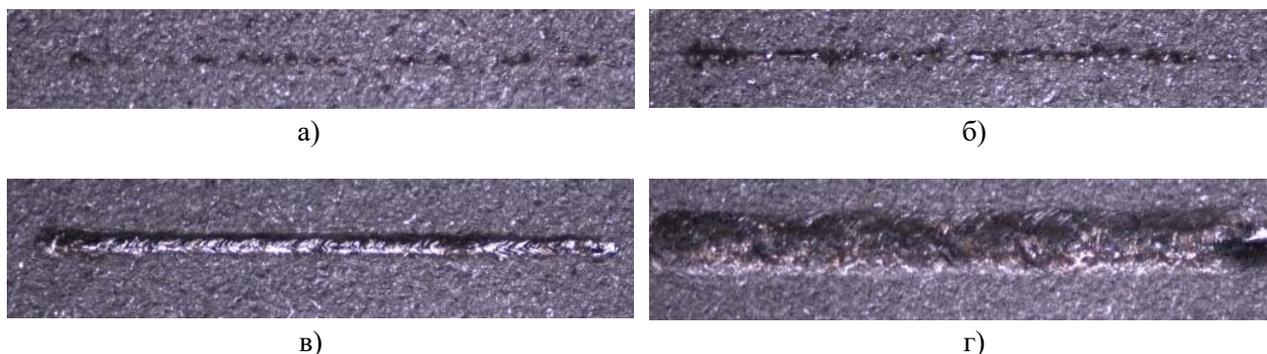


Рисунок 4 – Примеры единичных треков, полученных в ходе эксперимента:
а) минимальное сплавление с подложкой; б) нестабильный сегментированный трек;
в) стабильный непрерывный трек; г) непрерывный трек с широкой нестабильной ванной расплава

В рамках данного эксперимента достаточно определить непрерывность или прерывистость сплавления частиц металлопорошковой композиции при синтезе трека, а его геометрические характеристики (ширина и длина трека, глубина проплавления в платформу) в расчёт не берутся.

Так, по критерию непрерывности единичного трека установлено, что диапазон технологических параметров может быть сокращён с [40:400] (для мощности излучения, Вт) и [200:2000] (для скорости сканирования, мм/с) до [220:400] и [200:1400] соответственно. Это позволяет вдвое сократить либо количество образцов в дальнейших экспериментах, либо уменьшить шаг варьирования параметров при сохранении количества образцов, что увеличит точность определения диапазона оптимальных параметров процесса СЛП.

Эксперимент с изготовлением объёмных образцов-кубов размером в 5 мм проводили уже в уточненном диапазоне параметров: мощность варьировали от 220 до 400 Вт (с шагом в 25 Вт), а скорость сканирования – от 200 до 1400 мм/с (с шагом 170 мм/с). Дополнительно изменяли и параметр высоты слоя t , увеличение которого в перспективе способно дать прирост производительности процесса СЛП. Было изготовлено 60 образцов-кубов при различных сочетаниях

мощности P , скорости V и высоты слоя t . С целью экономии машинного времени, расходуемого инертного газа и порошкового материала было предложено размещение (компоновка) образцов друг над другом с печатью промежуточного поддерживающего материала высотой 1 мм между ними. Для организации параллельного проведения исследований на поперечных шлифах и с привлечением методов компьютерной томографии изготавливали по 2 образца для каждого набора параметров. Таким образом, было получено 120 образцов. Установлено, что предложенная компоновка платформы установки Addsol D50 (образцы друг над другом) позволяет сократить время печати образцов в 3 раза (с 30 до 10 часов) по сравнению с последовательной печатью одного набора по 30 образцов. Также предложенное размещение образцов позволяет исследовать по 2 образца за один снимок рентгеновской компьютерной томографии. С учетом экономии времени на установку образца и калибровку оборудования происходит сокращение времени анализа результатов эксперимента до 30-50 минут (в 2-2,5 раза) на один образец-куб.

С целью дополнительной экономии времени, затрачиваемого на этот этап, были исследованы наиболее представительные образцы (20 из изготовленных 60) с энерговыделением в диапазоне от 32 до 486 Дж/мм³, что составляет 92,5% интервала изготовленных образцов.

Данные, полученные с помощью томографии, были проанализированы в разработанном программном компоненте экспресс-анализа объёмных образцов (см. глава 4). Исследованные образцы обладают относительной плотностью от 88,6% до 99,5%.

Анализ данных из открытых источников позволяет заключить, что относительная плотность образцов не ниже 97% обеспечивает высокую воспроизводимость результатов по физико-механическим характеристикам (для предела прочности – не ниже 285 МПа). Из всего объёма образцов и соответствующих параметров (P , V и t) выделен ряд наборов параметров технологического процесса СЛП, соответствующих образцам с пористостью не выше 3%. Соответствующие образцы изготовлены с различной толщиной слоя – 30 мкм и более. Таким образом, при реализации СЛП возможно использование параметров, обеспечивающих баланс между более высокой скоростью синтеза (за счёт увеличения высоты слоя) и удовлетворительными механическими характеристиками, детальное исследование которых представлено в главе 4.

Четвертая глава посвящена разработке и исследованию эффективности инструментов экспресс-анализа экспериментов в опытных технологических работах в сравнении с традиционными способами поиска подбора оптимальных параметров, а также формированию проектных рекомендаций и границ применимости предложенных инструментов.

Предложен инструмент автоматизации входного контроля порошкового материала методом экспресс-анализа снимков, полученных с помощью СЭМ. Используя методы бинаризации и маркировки изображений (Рисунок 5), становится возможным рассчитать размер частиц и агломератов порошкового материала, а также построить диаграммы распределения частиц по размерам. Таким образом, задача экспресс-анализа соответствия характеристик порошкового материала заявленным производителем решается с помощью применения ряда способов обработки и анализа изображений внутри единого программного компонента.

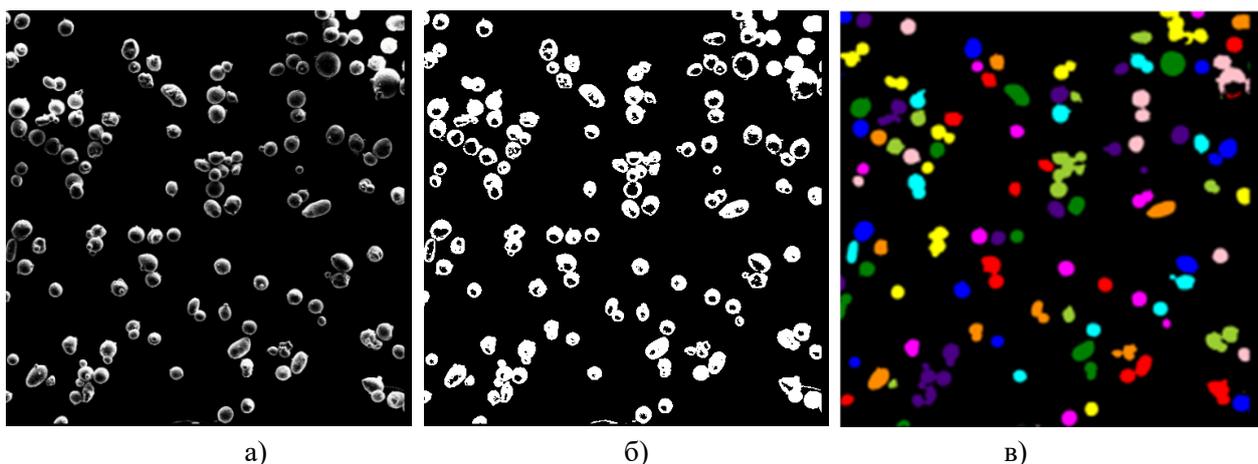


Рисунок 5 – Пример обработки фрагмента СЭМ-снимка порошкового материала:
а) оригинальное изображение; б) изображение, бинаризованное с помощью пороговой обработки;
в) маркировка частиц и агломератов порошка сплава AlSi10Mg

Автоматизация исследования изображений решает задачу анализа распределения частиц по размерам и определению сферичности (эксцентриситета) гранул с помощью СЭМ-снимков партий порошка. Этот метод хоть и уступает в скорости и количестве исследуемых гранул методу дифракции лазерного излучения, однако позволяет учесть агломераты и частицы неправильной формы.

Для автоматизации анализа результатов следующего этапа экспериментов разработана программа экспресс-анализа единичных треков, позволяющая обработать и систематизировать изображения треков, полученные с привлечением методов оптической микроскопии. Метод экспресс-анализа позволяет оперативно определить эффективную область параметров линейного энерговклада без необходимости тщательного рассмотрения большого количества фотографий треков вручную.

Предложена программа для автоматизации анализа пористости образцов методом экспресс-анализа данных, полученных методом РКТ (Рисунок 6).

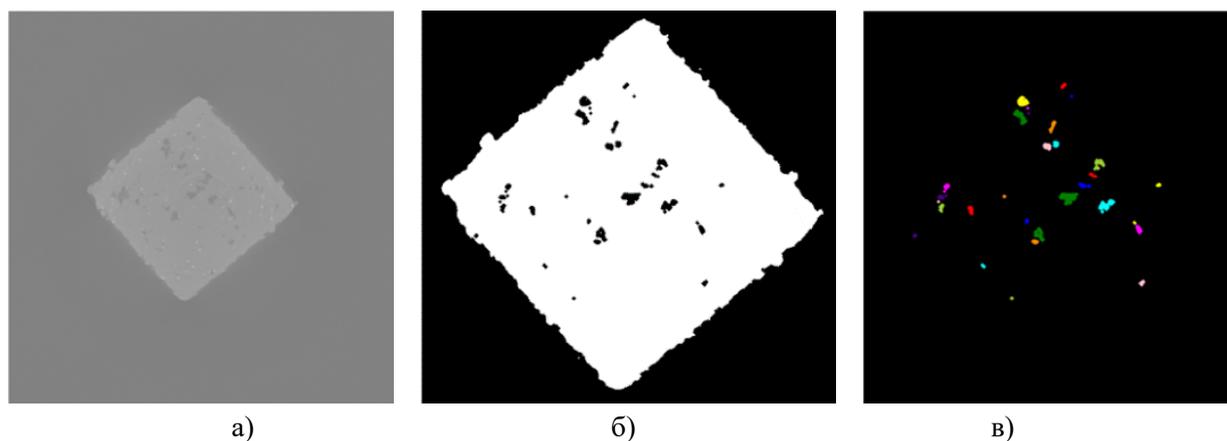


Рисунок 6 – Пример обработки снимка РКТ в разработанной программе экспресс-анализа:
а) оригинальное изображение; б) изображение после пороговой обработки;
в) маркировка площадей пор на изображении.

С помощью методов бинаризации, пороговой обработки и маркировки пор на изображении становится возможным рассчитать объём пор (пустот) по отношению к объёму областей сплошности. Задача экспресс-расчёта пористости объёмных образцов решается внутри единого программного компонента, принимающего на вход данные томографа в формате «.raw».

Отобранные посредством отмеченных программных компонентов образцы прошли дополнительный этап исследования – изучение микроструктуры на поперечных шлифах. Также методом СЛП по аналогичным режимам изготовлены и испытаны образцы на растяжение (в соответствии с ГОСТ 1497-84). Характеристики, определенные по кривым растяжения, представлены в таблице 3.

Анализ результатов испытаний показывает, что для образцов с относительной плотностью не ниже 97%, полученных по установленным режимам СЛП, средние значения предела прочности и предела текучести составляют не менее 283 и 203 МПа соответственно.

Изучение морфологии микроструктуры выращенных образцов выявляет относительно мелкую ячеистую структуру с размером ячейки, зависящим от параметров энергоклада в процессе лазерной экспозиции порошка (Рисунок 7). Темные элементы на СЭМ-изображениях соответствуют зёрнам твердого раствора на основе алюминия (α -Al), а окаймляющие их светло-серые области представляют собой эвтектику (Al-Si), содержащую фазу кремния. Это подтверждается данными, полученными методом энергодисперсионной спектроскопии. Структурный компонент магния равномерно распределён по поверхности исследуемого участка, хотя и в отношении с основными составляющими (Al и Si) его относительно мало – менее 0,5%. Также несмотря на то, что для этого сплава возможно образование преципитатов интерметаллида силицида магния (Mg_2Si) при охлаждении, данные ЭДС этого не отражают.

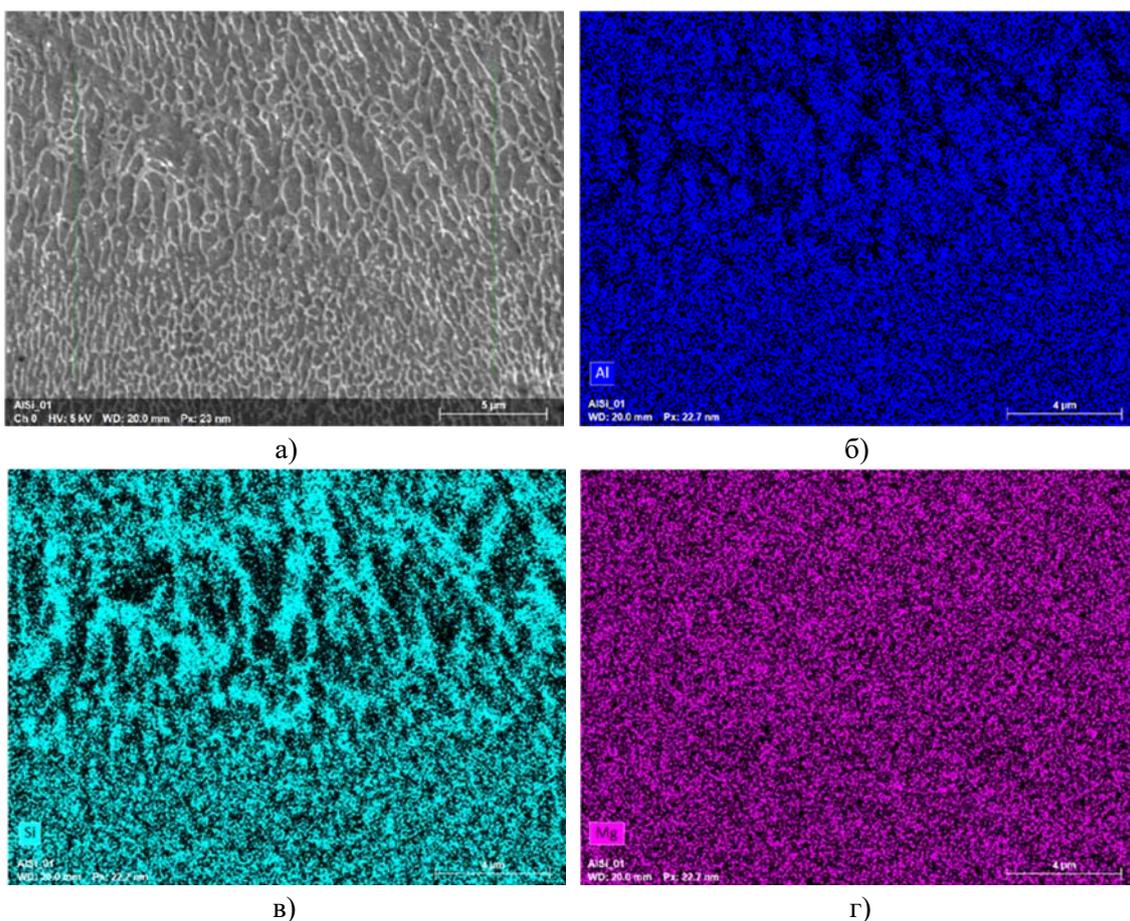


Рисунок 7 – СЭМ-снимок микроstructures участка шлифа (а), а также карты распределения по участку структурных составляющих Al (б), Si (в) и Mg (г) для образца 10.1.

На увеличении до 2000 раз хорошо отличимы границы ванн расплава (Рисунок 8, а), полученные параллельным прожигом и наслаиванием друг на друга близко расположенных треков сплавленного порошка RS-300-45.

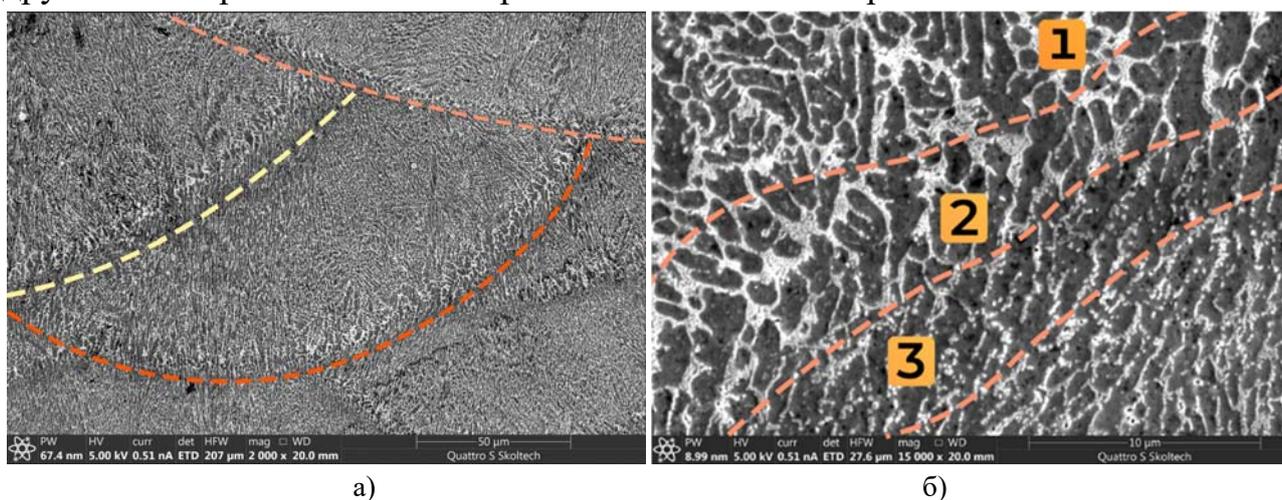


Рисунок 8 – Изображения микроstructures образца 3.1:

- (а) границы ванн расплава при увеличении в 2000 раз;
- (б) морфология ячеистой структуры в образце при увеличении в 15 000 раз.

Увеличение в 15 000 раз позволяет выделить три зоны, отличимые на снимке ванны расплава (Рисунок 8, б): тонкую ячеистую структуру (область 1), расположенную ближе к геометрическому центру ванны расплава, более рыхлую

и крупную ячеистую структуру (область 2) и саму границу ванны расплава (область 3). Зоны 1 и 2 отличаются размером зерна α -Al – для ряда параметров энерговыклада размер ячейки в центре ванны расплава не превышает 1 мкм. Ближе к границам ванны расплава структура эвтектики Al+Si распадается на отдельные субмикронные элементы, нарушая ячеистую сеть, свойственную областям 1 и 2.

Установлено, что размер области крупной ячеистой структуры с бóльшим размером зёрен α -Al (область 2) зависит параметра объёмного энерговыклада (2). Для исследуемых образцов при фиксированном диаметре лазерного пятна уменьшение параметра V с увеличением параметра P и толщины слоя с 30 до 90 мкм способно увеличить ширину приграничной зоны $W_{2,3}$ (областей 2 и 3) до 11 мкм (Таблица 2), что снижает прочностные характеристики образцов и изделий.

Таблица 2 – Влияние параметров на ширину приграничной зоны ванны расплава при СЛП

№	Вектор технологических параметров				Ширина приграничной зоны $W_{2,3}$, мкм
	P, Вт	V, мм/с	t, мкм	E, Дж/мм ³	
10.1	350	1500	30	97	1,4
10.4			90	32	4,6
6.1	350	300	30	486	6,2
6.4			90	162	11,0
3.1	325	900	30	150	4,2
3.4			90	50	7,3
13.1	375	900	30	174	2,2
13.4			90	58	7,5

Изучения СЭМ-снимков микроструктуры, показывают, что для образцов с минимальной пористостью – ниже 1% (№ 3.1 и 10.1, таблица 3) характерна сплошная однородная дендритно-ячеистая микроструктура с незначительной ориентировкой зерен в сторону центра ванны расплава. Средний размер зерен не превышает 1,5 мкм, что видно на снимках, полученных СЭМ (Рисунок 9, а, б). Такая микроструктура свидетельствует о высокой прочности изделий, изготовленных по соответствующим параметрам процесса СЛП, что подтверждается результатами испытаний на растяжение.

С другой стороны, образцы с более высокой пористостью (№ 6.3 и 3.2, таблица 3) характеризуются увеличенным размером зёрен – вплоть до 4 мкм. Также на шлифах заметна преимущественная ориентация зёрен в направлении выращивания (Рисунок 9, в, г). Образцы с такой микроструктурой обладают меньшей прочностью, но более высокой пластичностью. Увеличенная протяженность зерен и их ориентация обеспечивают более высокие значения относительного удлинения в направлении роста, что также подтверждается результатами механических испытаний.

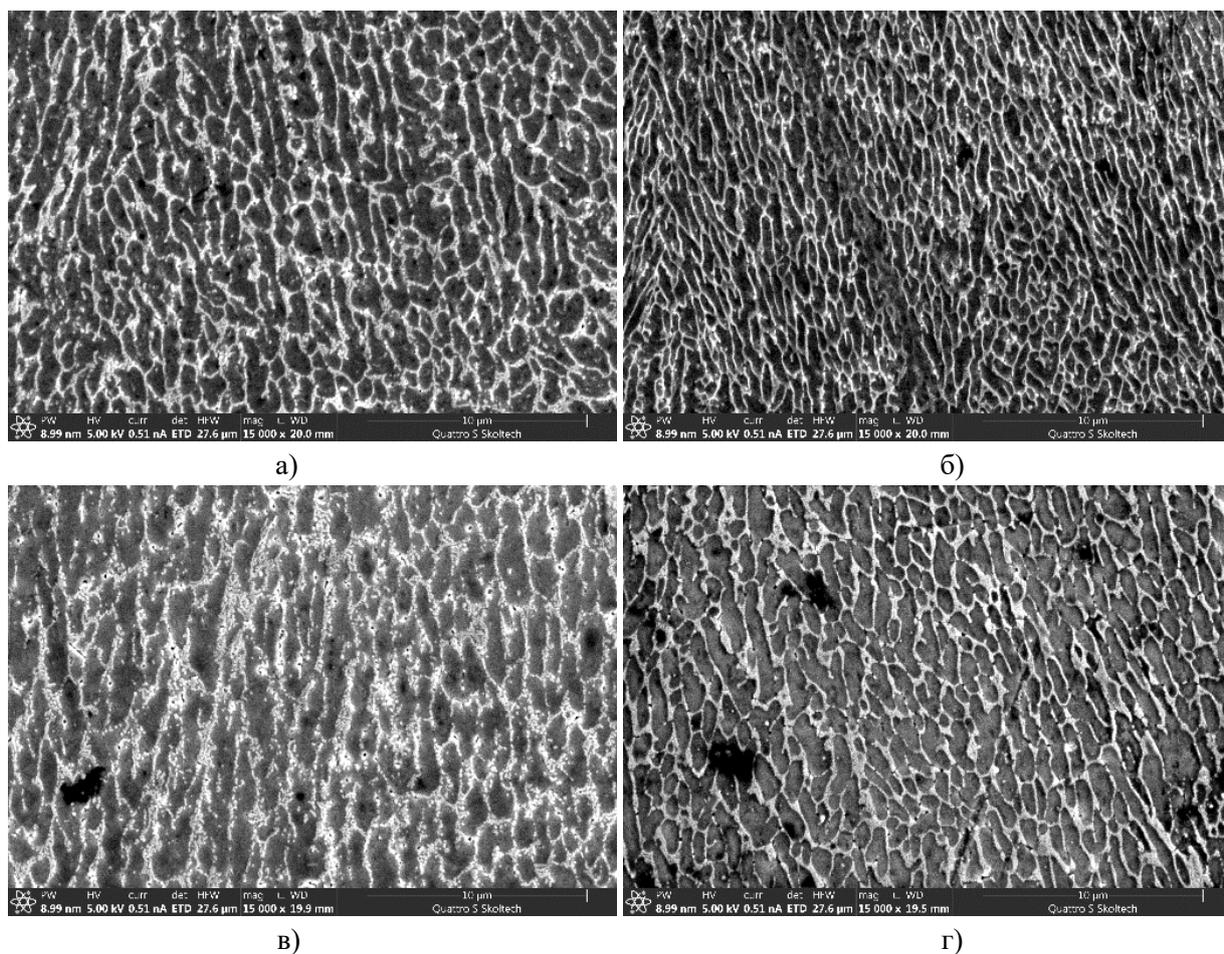


Рисунок 9 – СЭМ-снимки микроструктуры образцов из RS-300-45 с пористостью не выше 3%:
а) образец 3.1, б) образец 10.1, в) образец 6.3, г) образец 3.2

На изображениях микроструктуры образцов во вторичных электронах были проведены измерения размеров зёрен. Были рассмотрены представительные участки микроструктуры шлифов внутри ванны расплава (ближе к её центру), проведены горизонтальные (d_h) и вертикальные (d_v) замеры. Отношение $\frac{\overline{d_v}}{\overline{d_h}}$ позволяет количественно оценить ориентацию роста зёрен α -Al в направлении выращивания и соответствующую этой ориентации анизотропию механических свойств образцов. Результаты измерений были сопоставлены с соответствующими параметрами СЛП и физико-механическими свойствами (Таблица 3).

Высокий энергозатрат (образцы 6.3 и 6.4) обеспечивает более высокую температуру ванны расплава, что приводит к уменьшению температурных градиентов в процессе лазерной экспозиции порошка сплава RS-300-45 (увеличению времени охлаждения сплава) и, как следствие, способствует укрупнению зёрен. Увеличение высоты слоя до 90 мкм при синтезе приводит к протяжённости зёрен в направлении геометрического центра ванны расплава, что для рассмотренных образцов совпадает с направлением выращивания.

Таблица 3 – Влияние технологических параметров СЛП на свойства синтезированных образцов

№	Вектор технологических параметров СЛП				Пористость, %	Механические характеристики			Характеристики микроструктуры		
	P, Вт	V, мм/с	t, мкм	E, Дж/мм ³		$\bar{\sigma}_B$, МПа	$\bar{\sigma}_T$, МПа	ε , %	\bar{d}_v , мкм	\bar{d}_h , мкм	\bar{d}_v/\bar{d}_h
10.1	350	1500	30	97	0,5	336	238	1,78	1,2	0,8	1,5
3.1	325	900	30	150	0,3	341	242	2,65	0,9	1,5	0,6
8.1	350	900	30	162	1,15	320	242	2,06	0,9	1,4	0,6
6.3	350	300	70	208	2,48	297	208	4,80	2,6	1,2	2,1
3.2	325	900	50	90	2,22	297	226	5,91	2,2	1	2,2
8.2	350	900	50	97	2,99	283	219	5,44	2	0,9	2,2
6.4	350	300	90	162	2,85	292	203	6,57	3,8	2	1,9

Для выполненных в работе экспериментов по поиску эффективных векторов технологических параметров процесса СЛП использование предложенной методики позволяет существенно сократить время, затраченное на анализ и систематизацию полученных данных. Для оценки эффективности предлагаемого набора программных компонентов проведен также и анализ результатов экспериментов вручную.

Показано, что применение программных компонентов в сочетании с оптимизированной компоновкой объемных образцов-кубов способно сократить цикл опытных технологических работ по поиску эффективных параметров селективной лазерной плавки на ~24,5 часов (53,5%). Без оптимизации компоновки (только за счёт применения средств экспресс-анализа) время ОТР сокращается на 2,5 часа (10,8%). При этом исследуется 92,5% от потенциально эффективных векторов технологических параметров СЛП. Это позволяет уверенно утверждать, что при попытке ускорить процесс опытных работ и сократить программу экспериментов в соответствии с предлагаемой методикой инженером-технологом не будет пропущен эффективный набор технологических параметров процесса печати.

Автоматизация процесса подбора параметров позволяет снизить влияние человеческого фактора и риски возникновения ошибок, которые вызваны необходимостью выполнения анализа значительных объемов данных, полученных в ходе выращивания и исследования большого количества образцов. В перспективе это позволит либо расширить диапазон исследований (в случае, если возможный на конкретном оборудовании диапазон параметров это позволяет), либо уменьшить шаг изменения параметров, что увеличивает число образцов для анализа и повышает точность поиска.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В данной работе проведены теоретические и экспериментальные исследования процессов взаимодействия лазерного излучения с порошковыми материалами в рамках процесса селективной лазерной плавки. Получены результаты, описывающие физико-химические процессы синтеза изделий из металлопорошковых композиций. Изучена микроструктура и определены физико-механические свойства образцов, полученных из порошка сплава AlSi10Mg. Предложены рекомендации по совершенствованию технологического процесса производства, выраженные в практических результатах работы:

1. Проведены анализ и типизация опытных работ по поиску оптимальных параметров с учетом ограничений и критериев качества процесса СЛП. Этапы экспериментальных работ представлены в виде сужающейся воронки, каждое действие которой приближает исследователя к достижению цели – определению вектора эффективных технологических параметров процесса.

2. Проведен эксперимент по селективной лазерной плавке 99 единичных треков порошка RS-300-45 и исследованию их непрерывности с привлечением методов оптической микроскопии. Результат исследования позволил определить эффективные диапазоны параметров для синтеза непрерывных треков порошка на отечественной установке Addsol D50 – мощность лазерного излучения [220:400] Вт и скорость сканирования [200:1400] мм/с.

3. Разработан программный компонент экспресс-анализа результатов экспериментов по синтезу единичных треков сплавленного порошка. Предлагаемая методика позволяет сократить вдвое исследуемый диапазон параметров, снизив время эксперимента на 25%.

4. Исследовано влияние технологических параметров процесса лазерной плавки на ширину приграничных зон ванны расплава с крупной ячеистой структурой. Предложены параметры процесса СЛП, позволяющие снизить ширину приграничных зон в 7-8 (до 1,4 мкм), повышая прочностные характеристики образцов и изделий (для предела прочности – на 15%).

5. Установлены закономерности влияния определяющих параметров энергозатрата при СЛП на изменение предела прочности на разрыв образцов из отечественного порошка RS-300-45 от 283 до 341 МПа и относительного удлинения от 1,8% до 6,6%.

5. Разработана программа экспресс-анализа результатов томографии образцов, позволяющая определить наиболее эффективные с точки зрения сплошности структуры образцы и соответствующие им технологические параметры процесса СЛП. Экспериментально установлены наборы технологических параметров для достижения однородной мелкозернистой (до

1,5 мкм) микроструктуры и относительной плотности образцов в 99,7% и 99,5% соответственно: [325 Вт; 900 мм/с; 30 мкм] и [350 Вт; 1500 мм/с; 30 мкм].

6. Для исследованной металлопорошковой композиции RS-300-45 и отечественной установки Addsol D50 определены параметры процесса селективной лазерной плавки [325 Вт; 900 мм/с; 30 мкм], позволяющие достичь пористости – 0,3%, предела прочности на разрыв – 341 МПа и относительного удлинения – 2,65%.

Приложение содержит акт о внедрении результатов исследования для решения задач опытных технологических работ в АО «Лазерные Системы», свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, а также программный код разработанных программных компонентов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ripetskiy A.V., **Brykin. V.A.**, et al. Automation of the single-track study for L-PBF additive manufacturing processes (for AlSi10Mg powder) // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Vol. 413. – P. 04016.
2. **Brykin V.A.**, Voroshilin A.P., Ripetskiy A.V., Ukhov P.A. Introduction of rapid prototyping in solving applied problems in production // PERIÓDICO TCHÊ QUÍMICA. – 2020. 17, 35. P. 354-366
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021662544, РФ. Программа для управления процессом выборочной лазерной плавки и проверки технологических режимов аддитивного производства. / Бабайцев А.В., Рипецкий А.В., **Брыкин В.А.**, – Заявка №2021661350: Дата поступления 16 июля 2021 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30 июля 2021 г.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022661332, РФ. Программа для визуализации технологических ограничений, связанных с особенностями послойного синтеза изделий / Бабайцев А.В., Рипецкий А.В., **Брыкин В.А.**, – Заявка №2022660589: Дата поступления 09 июня 2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20 июня 2022 г.
5. Кожухова Е. А., **Брыкин В. А.** Методология определения количественных параметров надежности продукции // Компетентность. – 2022. – №. 2. – С. 32-35.
6. **Брыкин. В.А.**, Рипецкий А.В., Коробов К.С. Экспресс-анализ результатов входного контроля металлопорошковой композиции 6AlSi10Mg // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2023. – Т. 25, № 4
7. **Брыкин. В.А.**, Рипецкий А.В., Коробов К.С. Автоматизация исследования пористости, морфологии микроструктуры и механических характеристик изделий, полученных селективной лазерной плавкой порошка сплава AlSi10Mg// Вестник МАИ. – 2024. – Т. 31. – №. 2