



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

БРЫКИН ВЕНИАМИН АНДРЕЕВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕЛЕКТИВНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАВКИ НА
СТРУКТУРУ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ
ИЗ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ ALSI10MG**

Специальность 2.6.5 «Порошковая металлургия и композиционные
материалы (технические науки)»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук
Рипецкий Андрей Владимирович

Москва, 2024 г.

Содержание

Введение	5
Глава 1 Состояние вопроса и постановка задач исследований	13
1.1 Обзор актуальных технологий для изготовления изделий и заготовок из металлопорошковых композиций.....	15
1.1.1 Порошковая металлургия	15
1.1.2 Литьё.....	19
1.1.3 Аддитивное производство из металлопорошковых композиций.....	21
1.1.4 Выводы из обзора.....	33
1.2 Обзор существующих систем технологической подготовки аддитивного производства.....	35
1.2.1 Технологическое проектирование аддитивного производства в зарубежных программных комплексах.....	36
1.2.2 Процесс технологической подготовки в ПК ТПП «Glicer».....	55
1.2.3 Результаты сравнительного анализа систем технологической подготовки аддитивного производства	65
1.2.4 Выводы по анализу систем технологического проектирования	69
1.3 Предпосылки автоматизации процедур технологической подготовки аддитивного производства.....	70
1.3.1 Стадии процесса технологического проектирования	72
1.3.2 Влияние различных параметров процесса аддитивного производства на качество выращиваемого изделия	80
1.4 Постановка задачи исследования.....	90
1.4.1 Вербальная постановка задачи	90
1.4.2 Математическая постановка задачи	91
1.5 Выводы по главе 1	93
Глава 2 Материалы и методы	94
2.1 Используемые материалы.....	94
2.2 Оборудование и методы	95
2.2.1 Оборудование для селективной лазерной плавки.....	95

2.2.2	Оборудование и методы анализа результатов экспериментов.....	96	
2.3	Методика экспериментальных исследований.....	98	
2.3.1	Входной контроль металлопорошковой композиции.....	98	
2.3.2	Исследование единичного трека без нанесения порошкового материала.....	101	
2.3.3	Исследование единичного трека сплавленного порошкового материала.....	102	
2.3.4	Исследование единичного слоя сплавленного порошка.....	105	
2.3.5	Исследование механизма формирования объемных объектов плавкой металлопорошковой композиции.....	106	
2.4	Методика анализа результатов экспериментов.....	107	
2.4.1	Подготовка микрошлифов из выращенных материалов.....	108	
2.4.2	Исследование микроструктуры образцов.....	109	
Глава 3 Проведение опытных технологических работ по поиску оптимальных параметров процесса СЛП.....			111
3.1	Входной контроль порошка AlSi10Mg.....	111	
3.1.1	Результаты анализа.....	111	
3.1.2	Выводы из результатов входного контроля порошка AlSi10Mg.....	117	
3.2	Исследование единичного трека сплавленного порошка AlSi10Mg.....	119	
3.2.1	Подготовка эксперимента.....	119	
3.2.2	Подготовка управляющей программы и ход эксперимента.....	119	
3.2.3	Сбор и систематизация результатов.....	122	
3.3	Исследование механизма формирования объемных образцов.....	126	
3.3.1	Подготовка эксперимента.....	126	
3.3.2	Подготовка управляющей программы и ход эксперимента.....	126	
3.3.3	Сбор и систематизация результатов.....	130	
3.4	Выводы по главе.....	134	
Глава 4 Разработка программных компонентов экспресс-анализа экспериментов в ОТР аддитивного производства.....			136
4.1	Концепция разрабатываемого комплекса программных средств.....	136	

4.2 Программный компонент экспресс-анализа результатов входного контроля металлопорошковых композиций (ПКЭА ВК МПК).....	137
4.2.1 Реализация ПКЭА ВК	138
4.2.2 Применение ПКЭА ВК для статистического анализа порошка.....	142
4.3 Программный компонент экспресс-анализа единичных треков (ПКЭА ЕТ).....	145
4.3.1 Реализация и применение ПКЭА ЕТ для анализа экспериментов	145
4.4 Программный компонент экспресс-анализа объёмных образцов (ПКЭА ОО)....	150
4.4.1 Реализация ПКЭА ОО.....	150
4.4.2 Применение ПКЭА ОО для анализа экспериментов	151
4.5 Исследование микроструктуры образцов	154
4.6 Определение зависимости между технологическими параметрами процесса СЛП и критериями качества выращенных образцов	156
4.7 Определение эффективности предлагаемой методики	162
4.8 Выводы по главе	168
Заключение	171
Библиографический список	174
Приложения	186

Введение

Актуальность темы диссертации

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. [1]. 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.

Учитывая описанные преимущества, стратегия развития аддитивных технологий в России к 2030 году предполагает обеспечение глобального технологического лидерства, что неизбежно приведёт к росту номенклатуры оборудования и материалов для синтеза изделий [2]. 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, решаемых 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. Важным аспектом такой работы является развитие в России направления по разработке и производству соответствующего оборудования и материалов.

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.

Целью диссертационной работы является разработка методики автоматизированного подбора технологических параметров процесса селективной лазерной плавки металлопорошковых композиций для совершенствования процедуры опытных технологических работ аддитивного производства.

Задачи работы

Цель диссертационной работы достигается в результате последовательного решения следующих задач:

1. провести анализ существующих методов технологической подготовки и опытных технологических работ (ОТР) аддитивного производства изделий с целью поиска недостатков процесса;

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 на характеристики протекания процесса селективной лазерной плавки металлопорошковых композиций, структуру и свойства 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 свойств изделия и снижения времени, затрачиваемого на цикл опытных работ;

5. применить результаты проведенных 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 пористости, морфологии структуры и механических свойств получаемого изделия.

Научная новизна

1. Предложено научно-методическое обеспечение подготовки технологического процесса аддитивного производства методом селективной лазерной плавки с учетом пористости и микроструктуры синтезируемого материала, включающее программные компоненты и методику экспериментов.

2. Разработана программа экспресс-анализа влияния выбранных параметров технологического процесса селективной лазерной плавки на формирование единичного трека порошкового материала, позволяющая определять эффективные наборы параметров линейного энергозатрата 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 селективной лазерной плавки. 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 зёрен твердого раствора на основе алюминия 1-2 мкм.

4. Сформулированы границы применимости и разработаны проектные рекомендации для предложенных методик экспресс-анализа. Показано, что их применение позволяет сократить сроки работ по поиску технологических параметров процесса селективной лазерной плавки на ~53,5%.

Теоретическая значимость

1. Установлены закономерности влияния определяющих параметров энергозатрата (мощности лазерного излучения, скорости сканирования и высоты слоя насыпаемого порошка) на пористость и морфологию микроструктуры синтезируемых объектов при селективной лазерной плавки порошка сплава AlSi10Mg.

2. Разработаны программы экспресс-анализа и методика для исследования и поиска оптимальных параметров энергозатрата 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 селективной лазерной плавки [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.

Область исследования соответствует п.п. 2, 5 и 6 паспорта специальности 2.6.5 «Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки)».

Объектом исследования является эффективность технологического процесса аддитивного производства изделий методом селективной лазерной плавки металлопорошковых композиций.

Предметом исследования являются параметры технологического проектирования, алгоритмы и процедуры подбора технологических параметров процесса селективной лазерной плавки металлопорошковых композиций, обеспечивающих качество процесса производства, а также свойства и микроструктура выращенных образцов и изделий.

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.

Обоснованность и достоверность разработанных методов, сформулированных в диссертационной работе, и полученных на их основе результатов обеспечивается надежностью аппарата анализа соответствующих технологических процессов и подтверждается сравнением эффективности предложенных инструментов с уже используемыми на предприятиях и участках аддитивного производства.

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

Внедрение результатов работы

Разработанные инструменты технологической подготовки применены для решения ряда задач опытных технологических работ по подбору параметров процесса выращивания методом выборочной лазерной плавки металлопорошковых композиций на установке М-350 разработки компании АО «Лазерные Системы», в частности, для автоматизации анализа результатов экспериментальных исследований.

Апробация результатов 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.

Положения, выносимые на защиту:

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

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

3. Эффективные наборы параметров технологического процесса СЛП, полученные для отечественной установки Addsol D50 и порошка сплава AlSi10Mg.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 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 работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из **108** наименований и трёх приложений. Материал диссертации изложен на **195** страницах машинописного текста, содержит **92** рисунка, **18** таблиц.

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.

В первой главе проведен анализ проблем, возникающих в ходе опытных технологических работ по подготовке аддитивного производства изделий из металлопорошковых композиций, рассмотрены альтернативные актуальные технологии производства изделий из сплавов, дан подробный обзор и анализ типового процесса технологической подготовки аддитивного производства для установок СЛП. Приведены предпосылки создания средств экспресс-анализа результатов опытных работ аддитивного производства. На основе анализа литературных данных поставлена цель работы и сформулированы задачи исследований.

Вторая глава посвящена описанию основных методов исследования, включая методы изготовления образцов и методики проведения экспериментов. Также описаны характеристики использованных материалов, оборудования для аддитивного производства и анализа результатов исследований.

В третьей главе описано проведение экспериментальной части исследования по поиску оптимальных параметров процесса СЛП. Описан процесс технологической подготовки экспериментов, печати, проведен анализ и систематизация результатов выращивания образцов. Описан и непосредственный анализ результатов экспериментов: изучения единичных треков сплавленного порошкового материала и синтеза объемных образцов-кубов.

Четвертая глава посвящена разработке и исследованию эффективности программ 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.

В заключении представлены результаты диссертационного исследования, выводы по работе и перспективы дальнейших исследований.

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

Глава 1 Состояние вопроса и постановка задач исследований

На данном этапе развития современного машиностроения применение технологии селективной лазерной плавки (СЛП) металлопорошковых композиций (МПК) решает широкий ряд задач по прототипированию и изготовлению функциональных деталей и сборочных единиц (ДСЕ) в наукоёмких областях промышленности [3, 4]. Как правило эффективность применения аддитивного производства выражается в:

- Улучшении функциональных характеристик при производстве изделий машиностроения [5];
- Увеличении эффективности цепочки поставок [6];
- Снижении количества сборочных единиц по сравнению с традиционным производством [4].

Новые материалы (металлопорошковые композиции) в совокупности с новыми подходами к проектированию деталей под изготовление методом селективной лазерной плавки позволяют обеспечить существенный выигрыш в массе и экономии материала, а также способствуют улучшению механических и эксплуатационных характеристик [7].

Несмотря на положительную динамику российского рынка аддитивных технологий, современная санкционная политика в отношении отечественного машиностроения приводит к определенному производственному дефициту [8]. С другой стороны, на рынке аддитивных технологий появляются новые игроки – увеличивается количество производителей оборудования аддитивного производства (в т.ч. и методом селективной лазерной плавки), поставщиков различных материалов. Для каждого сочетания конкретной

установки АП и каждой отдельно взятой металлопорошковой композиции необходимо решить задачу поиска параметров процесса [9]. Это в совокупности с постоянным поиском более эффективных режимов печати значительно увеличивает объём необходимых опытных технологических работ (ОТР) в области аддитивного производства методом СЛП – подбор технологических параметров процесса, пуско-наладочные работы для оборудования, а также проведение первичных экспериментов (в т.ч. и исследования микроструктуры и механических испытаний) [10].

Вопросы технологической подготовки/проектирования с подбором параметров аддитивного производства были рассмотрены в работах [11-13]. Наиболее распространён метод подбора технологических параметров процесса СЛП через последовательный набор запусков установки АП с соответствующим материалом и дальнейшее проведение экспериментов, призванных определить такие параметры технологического процесса плавки, которые обеспечили бы сварной шов, построение объёмных объектов, а также свойства микроструктуры и механические характеристики, которые всецело удовлетворяют требованиям к качеству процесса производства и требованиям к качеству изделия, изготовленного аддитивно.

Данная глава посвящена определению места аддитивных технологий и процесса селективной лазерной плавки металлопорошковых композиций в общей совокупности технологий обработки металлов, обзору процесса технологической подготовки процесса селективной лазерной плавки и выявлению предпосылок для разработки инструментов оптимизации процесса подбора технологических параметров, а также выбору направления исследования и постановке задачи.

1.1 Обзор актуальных технологий для изготовления изделий и заготовок из металлопорошковых композиций

Для детального понимания предмета исследования важно изучить место аддитивного производства изделий из металлопорошковых композиций в общей совокупности различных технологий производства изделий, заготовок и полуфабрикатов из металлических порошков.

1.1.1 Порошковая металлургия

Порошковая металлургия представляет собой метод производства изделий из металлических порошков путем прессования и последующего спекания. Этот метод стоит особняком от классических методов металлообработки и обладает рядом уникальных преимуществ [14]. В истории развития технологий обработки металлов порошковая металлургия занимает особое место. Этот метод сочетает принципы классической металлургии с передовыми достижениями в области материаловедения, предоставляя возможность создания материалов с уникальными характеристиками.

В современной промышленной практике порошковая металлургия признана как эффективный и экономичный способ изготовления металлических изделий [15, 16] с высокой степенью точности [17] и специфическими свойствами [18]. Этот метод обладает рядом уникальных преимуществ, которые отличают его от других методов металлообработки [19].

Порошковая металлургия основывается на производстве изделий из металлических порошков (металлопорошковых композиций, МПК) путем их прессования и последующего спекания [20]. Данный процесс позволяет получить изделия с предсказуемыми и повторяемыми свойствами, а также минимизировать производственные отходы.

Процесс получения изделия методами порошковой металлургии начинается с получения порошка [21]. Металлы и сплавы превращаются в

порошкообразное состояние различными методами, включая физико-механические методы (измельчение посредством механического воздействия в твердой или жидкой фазе с использованием статических и ударных нагрузок), а также химико-металлургические методы (изменение фазового состояния исходного сырья через восстановление окислов материала, электролиз или термическую диссоциацию карбонильных соединений).

Полученное сырье проходит этап смешивания и формования [20]. «Зелёные» изделия (Рисунок 1.1) формируются методом холодного прессования при давлении в диапазоне 30-1000 МПа с использованием металлических форм.



Рисунок 1.1 – Прессовки, полученные из сырья порошкового материала
(Источник: *Liberty Pressed Metals, LLC*)

В большинстве случаев применяются закрытые пресс-формы с вертикальной ориентацией инструмента. Порошковая смесь засыпается в полость матрицы, при этом объемный расход регулируется движением нижнего пуансона. В зависимости от потребностей, прессование может быть как односторонним, так и двусторонним. При прессовании порошок обжимается в полости матрицы между верхним и нижним пуансонами. Если требуются специфические детали с различными переходами, могут применяться дополнительные пуансоны. После формирования, готовый

брикет выталкивается из матрицы с помощью нижнего пуансона. Процесс формирования проходит на специализированном прессовом оборудовании, работающем на механическом, гидравлическом или пневматическом приводе. Готовая прессовка обладает требуемыми размерами и формой, а также обеспечивает необходимую прочность для последующей перегрузки и отправки в печь для проведения процесса спекания.

Спекание является одним из завершающих процессов в порошковой металлургии [22]. Прессованная заготовка нагревается в специализированной печи при температурах, которые обычно ниже температуры плавления материала (Рисунок 1.2). Это приводит к уплотнению порошковых частиц и увеличению механической прочности изделия. После спекания изделие может быть обработано механически, химически или пройти дополнительную термическую обработку.

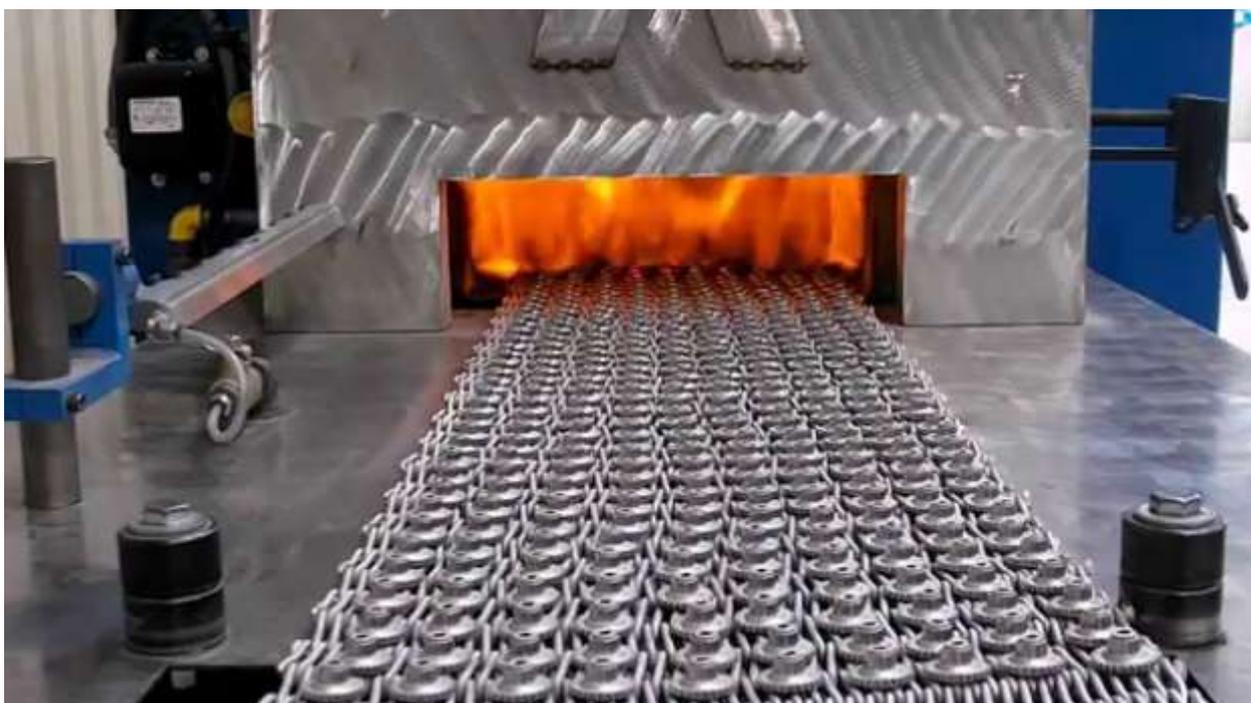


Рисунок 1.2 – Изделия, полученные прессованием МПК, отправляются на спекание
(Источник: *Comtec Mfg., Inc.*)

Преимущества порошковой металлургии заключаются в возможности производить изделия с минимальной последующей обработкой, эффективно используя материал, а также возможности создавать изделия с уникальными

свойствами, которые затруднительно или невозможно получить другими методами (в т.ч. литьём).

Производство сложной геометрии для таких изделий ограничена в основном возможностями прессования и, как следствие, технологическими возможностями производства пресс-форм.

Дополнительную сложность представляет собой контроль процесса спекания. Спекание [18] – процесс, при котором частицы порошка соединяются при температуре ниже температуры плавления материала. Это означает, что материал не полностью плавится, и в результате между частицами порошка могут оставаться микропоры. Поэтому изделия, полученные методом порошковой металлургии, могут обладать пористой структурой, что может негативно сказаться на некоторых механических свойствах, таких как прочность или устойчивость к ударным нагрузкам.

Однако пористость может быть контролируемой, и в некоторых случаях это желательно. Например, пористые материалы используются в качестве фильтров [23] или в медицине для изготовления костных имплантатов, так как они позволяют запустить процессы остеоинтеграции – вживлению изделий в организм человека, используя естественную способность тканей организма расти через имеющиеся в изделии поры [24].

Если пористость нежелательна, существуют способы ее минимизации, такие как горячее изостатическое прессование [25], которое сочетает прессование и спекание при высоких температурах, или использование дополнительных процессов после спекания, чтобы улучшить плотность материала.

В контексте изучения аддитивных технологий производства на основе металлопорошковых композиций необходимо делать акцент на значимость знаний, полученных из области порошковой металлургии. Традиционные методы и понимание физико-химических процессов, связанных с получением

и обработкой металлопорошков, служат естественной теоретической и практической базой при исследовании и внедрении инновационных подходов в области селективной лазерной плавки МПК и других аддитивных методов производства металлических изделий [26].

1.1.2 Литьё

Литье — это производственный процесс, во время которого жидкий металл заливается в полость формы, которая соответствует форме и размеру детали. Затвердевшая часть также известная как отливка, извлекается из матрицы (формы), завершая этап производства. На результат процесса вне зависимости от технологии литья влияет множество факторов, например такие как: скорость заливки, скорость охлаждения во время затвердевания, температура формы во время заливки, материал и толщина покрытия штампа, а также другие параметры [27].

Для обработки металла методом литья важна его текучесть. В расплавленном виде жидкий металл или сплав должен легко перетекать из одной формы в другую, заполняя все выемки. Чем выше текучесть материала, тем тоньше и сложнее изделия из него можно отливать. Сплавы с низкой текучестью схватываются и затвердевают раньше, чем заполняется отливная форма. Показатель текучести металла зависит от температуры и давления, например, литая сталь становится текучей для литья под давлением 7500 кг/см². Хорошие показатели текучести у чугуна, меди, свинца. Именно эти материалы используются для отлива изделий в промышленном производстве и в кузницах [27, 28].

Существуют различные методы литья металлических изделий, включая песчаное литье, центробежное литье, точное литье, литье под давлением и другие. Каждый из этих методов имеет свои особенности и применяется в зависимости от требований к качеству, форме и размерам готового изделия [29].

Песчаное литье наиболее широко применяется из-за своей относительной простоты и низкой стоимости [30]. Оно подходит для производства как крупногабаритных, так и мелких деталей, но может не обеспечивать высокую точность готовой отливки.

Центробежное литье часто используется для производства труб и других симметричных деталей. Расплавленный металл заливается во вращающуюся форму, создавая равномерные и гладкие изделия. Из-за ограничений в форме получаемых изделий, а также неточности размеров свободных поверхностей отливок [31] данной технологии будет уделено меньше внимания в настоящем исследовании.

Точное литье обеспечивает высокую точность изделий и минимизирует потребность в последующей механической обработке. Этот метод применяется в авиационной, космической промышленности и при производстве медицинского оборудования из-за возможности получения сложных геометрий и высокой поверхностной отделки. В том числе его можно использовать и для производства изделий из сплавов, которые могут быть использованы для аддитивного производства [32]. Литье под давлением идеально подходит для массового производства деталей с высокой поверхностной отделкой и тонкими стенками, таких как детали автомобильных двигателей или электронных компонентов [27].

Выбор конкретного метода литья зависит от многих факторов – требований к детали, материала, объема производства и экономической эффективности. Все методы литья продолжают развиваться, дополняясь новыми технологиями и материалами, чтобы удовлетворять растущие потребности современной промышленности.

В контексте аддитивного производства исследование технологий литья ценно с точки зрения сведений о поведении металлов в процессе перехода из жидкого состояния в твердое. Несмотря на то, что и литье, и аддитивное производство включают в себя переход материала через различные фазы,

способы обеспечения фазового перехода и уровни контроля над процессом различаются.

Технологические принципы, заложенные в методах литья, служат основой для понимания свойств и поведения металлов при их обработке. Такие данные являются ключевыми при разработке и оптимизации процессов в аддитивном производстве, особенно при селективной лазерной плавке металлопорошковых композиций. Исследование традиционных методов, таких как литьё, обогащает методологическую базу современных производственных технологий.

1.1.3 Аддитивное производство из металлопорошковых композиций

Аддитивные технологии представляют собой относительно новый подход к производству изделий, основанный на поэтапном нанесении материала для создания объекта [33]. В отличие от традиционных методов, таких как фрезерование или литьё, где материал удаляется или формуется в жидком состоянии, аддитивные технологии позволяют создавать изделия слой за слоем, начиная с пустого пространства или платформы.

В рамках данного исследования особое внимание уделяется аддитивному производству из металлопорошковых композиций. Процесс включает в себя использование металлических порошков, которые плавятся и закрепляются с помощью высокоэнергетических источников излучения, таких как лазеры или электронные лучи [34]. Эта методика позволяет производить детали с уникальной внутренней структурой и точной геометрией, которые были бы сложны или невозможны для создания с использованием других методов.

При применении аддитивного производства из МПК могут быть использованы различные виды металлопорошков, что позволяет получать изделия с самыми разными свойствами и характеристиками [35]. Это дает инженерам и дизайнерам большую степень свободы в выборе материалов и

создании деталей с учетом требований к прочности, жесткости, теплопроводности и другим характеристикам.

1.1.3.1 Описание технологий

На сегодняшний день существует довольно много разновидностей аддитивных технологий (АТ), которые позволяют работать с широким спектром материалов от полимеров до металлов и сплавов. В данной работе будет подробно разобрана «металлическая» сторона современного аддитивного производства.

Наибольший интерес для авиационной и ракетно-космической отрасли представляют АТ, позволяющие работать с металлическими материалами, в том числе с жаропрочными сплавами на основе никеля и титана. Это направление АТ можно разделить на две принципиальные разновидности по методу формирования слоя.

Первая группа АТ в литературе называется “Direct Deposition” и подразумевает под собой “прямое или непосредственное осаждение материала” [36]. Как правило, мощный лазерный луч оплавляет участок изделия, образуя локальную микроскопическую ванну жидкого расплава, в которую струей инертного транспортирующего газа (чаще всего аргона) вдувается порция металлического порошка, то есть подача материала и его плавление происходит практически одновременно. Таким образом, в результате методичного сканирования поверхности изделия лазерным лучом с одновременной инъекцией строительного порошка формируются слои создаваемого объекта [37]. На сегодняшний день среди технологий прямого лазерного осаждения лидирующее место занимают DMD — Direct Metal Deposition (компания POM, США); LENS — Laser Engineered Net Shape (Optomec, США); DM — Direct Manufacturing (Sciaky, США) и др. Прямое лазерное нанесение материала используется для создания покрытий, выращивания прототипов и формообразующей оснастки для разных видов

точного литья, изготовления и восстановления деталей и изделий сложной геометрии, в том числе поврежденных в процессе эксплуатации [38].

За второй группой АТ закрепилось название “Bed Deposition” или “Powder Bed Fusion”, которое подразумевает наличие некоторой платформы, где предварительно формируют слой строительного материала. Другими словами, в отличие от технологий прямого осаждения, в данном случае подача материала и его оплавления разделены во времени: сначала происходит формирование порошкового слоя, а затем в этом слое выборочно расплавляют порошковый материал. При этом положение плоскости неизменно, а часть строительного материала остается в слое нетронутой. Таким технологиям наиболее точно соответствует термин “селективный синтез” или “селективное спекание/сплавление” [36]. В настоящее время среди АТ группы “Bed Deposition” лидирующее место занимают селективную лазерную плавку (СЛП) и селективное электронно-лучевое сплавление (СЭЛС) [33, 36]. При реализации этих технологий становится возможным получение деталей с характеристиками, недоступными для других методов обработки, например, с криволинейными отверстиями или внутренними пустотами.

Далее будет рассмотрена подробно технология получения изделий и заготовок из порошков металлических сплавов методом селективной лазерной плавки.

1.1.3.2 Селективная лазерная плавка МПК

СЛП — процесс производства изделия путем послойного сплавления металлического порошкового материала, гранулы которого связываются между собой путём их проплавления при помощи лазерного луча, движущегося в каждом слое по определённой траектории в соответствии с выбранной стратегией обработки и согласно предварительно запрограммированной трёхмерной модели изделия в компьютерной среде [39].

Одной из основных частей в установках для СЛП является лазерная система, в которой используют CO₂, Nd:YAG, иттербий волоконный или дисковый лазеры. Углекислотные лазеры с длиной волны 9,4 – 10,6 мкм обычно используют в установках, предназначенных для работы с такими материалами, как полимеры и керамика. Твердотельные лазеры с длиной волны 0,9 – 1,1 мкм предпочтительнее для нагрева металлов и карбидов, поскольку они на 25 – 65 % лучше поглощают генерируемое лазером излучение. Лазер в установке СЛП может работать как в непрерывном, так импульсном режиме. По сравнению с непрерывным, применение импульсного режима за счет большой энергии и короткой продолжительности импульса (наносекунды) даёт возможность улучшить прочность связи между слоями и уменьшить зону термического воздействия. Характеристики наиболее часто используемых лазерных систем лежат в следующих пределах: мощность лазера — 50 – 1000 Вт, скорость сканирования — до 3 м/с, скорость позиционирования — до 7 м/с, диаметр фокусированного пятна — 35 – 400 мкм [40, 41].

Весь процесс СЛП проходит в защитной среде, предотвращающей окисление порошка. Как правило, в качестве среды используют инертные газы — азот и аргон. Некоторые установки имеют встроенный генератор азота.

Общий принцип работы всех установок СЛП (Рисунок 1.3) можно разделить на отдельные этапы.

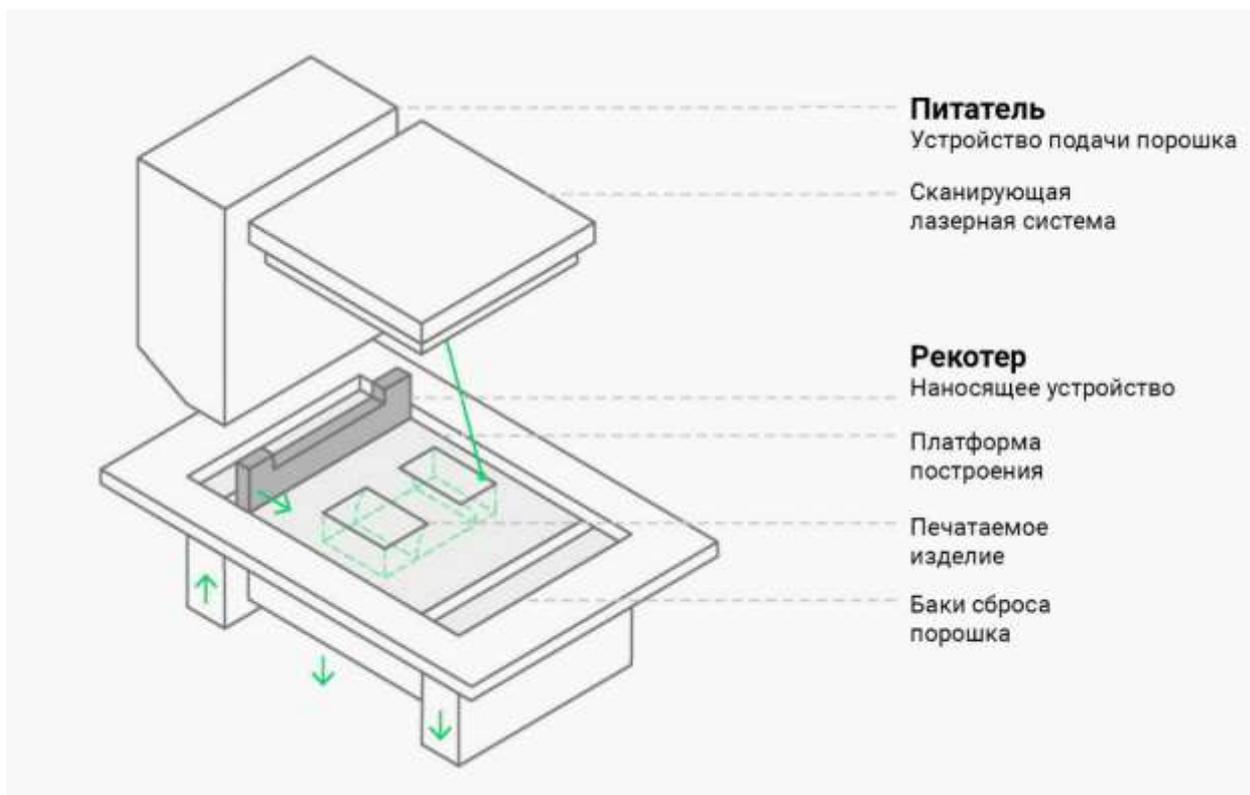


Рисунок 1.3 – Схема процесса селективной лазерной плавки

В начале процесса создается цифровая 3D модель детали — используется САПР или данные сканирования. Специальное программное («слайсер») обеспечение «разрезает» модель на тонкие слои (сечения). Высота слоя варьируется от 20 до 100 мкм. Устройство для нанесения и выравнивания снимает слой порошка с питателя и равномерно распределяет его по поверхности подложки. После чего лазерный луч избирательно плавит порошок путем сканирования поперечного сечения, сгенерированного из 3D модели. По окончании сканирования порошкового слоя платформа с изготавливаемым изделием опускается на заданную толщину, а платформа с порошком поднимается. Процесс многократно повторяется, пока деталь не будет закончена. После завершения процесса платформа с изделием поднимается, и изделие очищается от неиспользованного порошка [42, 43].

Во время селективной лазерной плавки осуществляются такие физические явления как поглощение и рассеяние лазерного излучения порошковым материалом, теплопередача, фазовые переходы, течения внутри ванны расплава, вызванные градиентами поверхностного натяжения,

испарение и выброс материала, а также различные химические реакции [43]. Эти процессы регулируются большим числом операционных параметров, которые подробно будут рассмотрены в дальнейшем.

1.1.3.3 Селективная лазерная плавка порошка AlSi10Mg

Сплав AlSi10Mg относится к группе доэвтектических алюминиевых сплавов – силуминов (сплавов с большим содержанием кремния). Силумины являются наиболее распространенными литейными алюминиевыми сплавами. Благодаря хорошим механическим свойствам в сочетании с низкой плотностью, коррозионной стойкостью и отличной литейностью, он широко используется в автомобильной промышленности, авиастроении и военных приложениях [44, 45]. Эвтектическая фаза Al + Si, присутствующая в этом сплаве, может существенно влиять на его пластичность и прочность, но также делает этот материал сложным для обработки.

Для сплавов системы Al-Si характерны низкая усадка и относительно низкая температура плавления. По этим причинам этот сплав в основном используется для литья [46]. Однако свойства сплава AlSi10Mg предоставляют широкие возможности для применения этого сплава в аддитивном производстве и в том числе по технологии селективной лазерной плавки [47]. Природа микроструктуры изделий, полученных методом СЛП активно анализируется. Также изучаются оптимальные параметры процесса для улучшения относительной плотности и свойств [48-50].

Фазовые переходы, происходящие с МПК в процессе плавки силуминов (в т.ч. AlSi10Mg) соответствуют диаграмме состояний системы «алюминий-кремний» (Рисунок 1.4). Максимальная растворимость Si в твердом (Al) составляет $1,5 \pm 0,1$ % (ат.) при эвтектической температуре 577°C . Растворимость Al в (Si) носит ретроградный характер, максимальное ее значение равно $0,016 \pm 0,003$ % (ат.) при температуре 1190°C . Эвтектическая точка расположена при содержании $12,2 \pm 0,1$ % (ат.) Si.

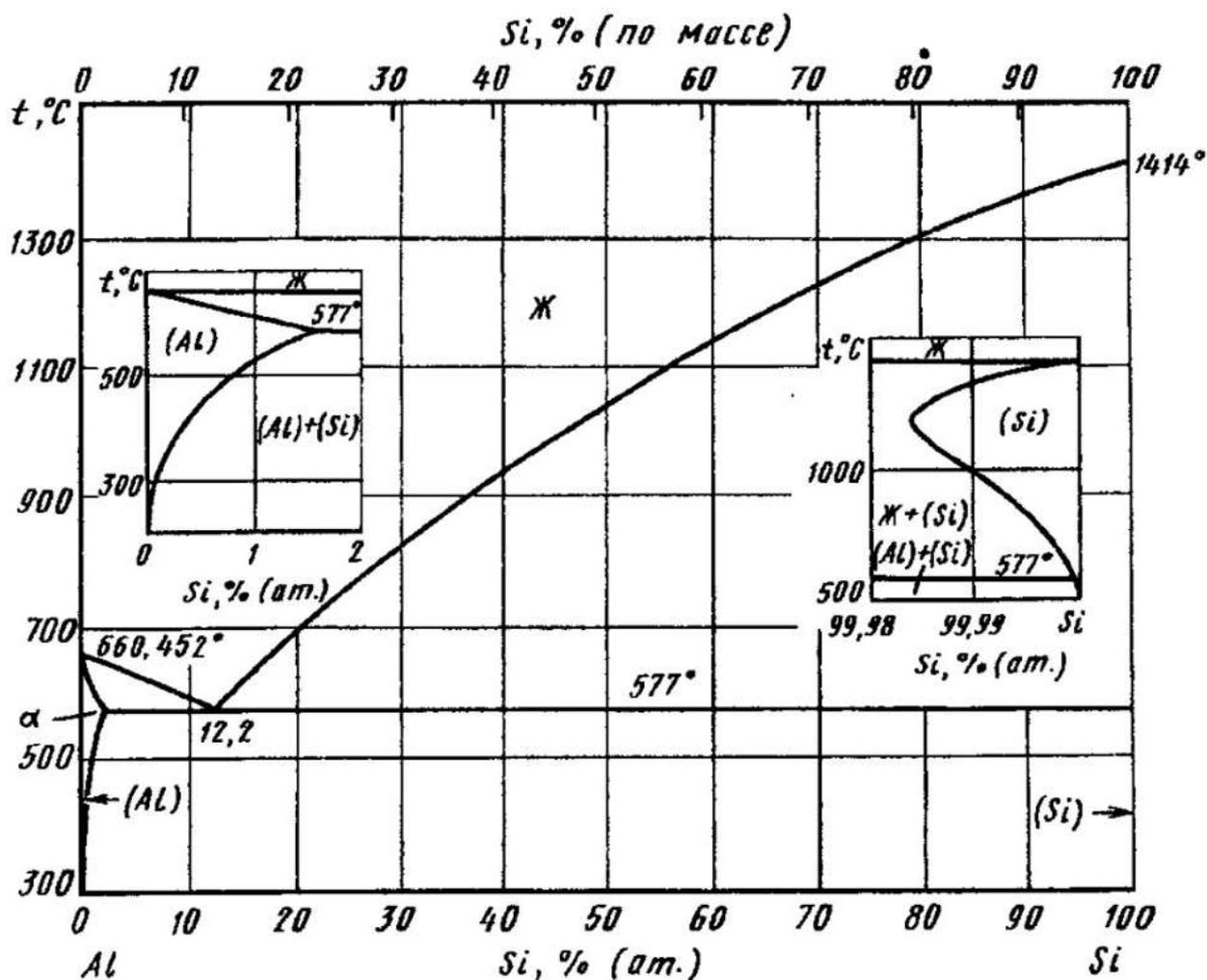


Рисунок 1.4 – Диаграмма состояния системы алюминий-кремний (Al-Si)
 Источник: *Диаграммы состояния двойных металлических систем* [51]

Далее в работе приведен обзор и сравнение применения силуминов (и в т.ч. сплава AlSi10Mg) для производства изделий по различным технологическим процессам – селективной лазерной плавке МПК, точному литью и порошковой металлургии.

1.1.3.4 Место селективной лазерной плавки МПК в современных технологических процессах

Определение места селективной лазерной плавки в общей совокупности технологий обработки металлов (в сравнении с литьем и порошковой металлургией) позволяет обозначить границы применимости конкретной технологии для решения актуальных практических задач современного машиностроения.

Различные исследования [52], 53, 54] процессов СЛП и литья показывают, с точки зрения микроструктуры путем тонкой настройки процесса плавки порошкового материала может быть достигнуто высокое качество микроструктуры изделия без трещин, пор и непроплавов материала. Так, например, микроструктура отливок из AlSi10Mg без дополнительной термообработки характеризуется относительно большими дендритными структурами фазы α -Al (Рисунок 1.5, а). После трёхэтапной термообработки (отжига на температуре 538 градусов в течение 12 часов, охлаждения/закалки и отпуска при температуре 154 градуса в течение 3-5 часов) сферические частицы кремния располагаются на границах зерна α -Al (Рисунок 1.5, б).

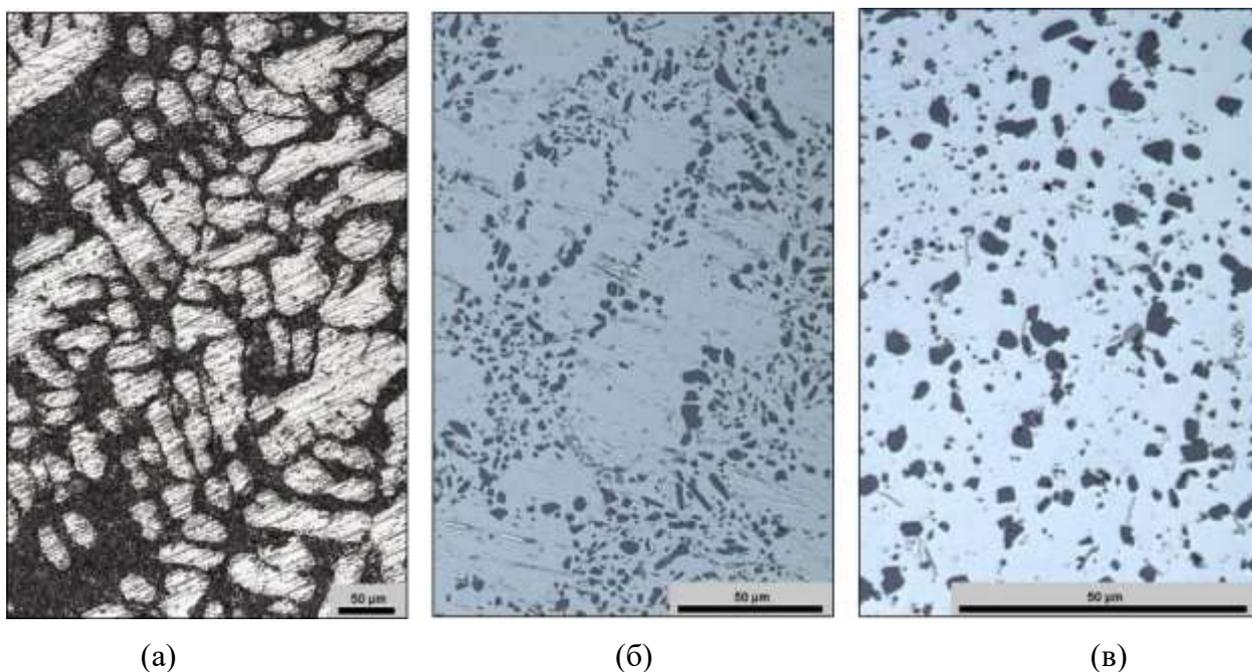


Рисунок 1.5 –Микроструктура изделий, полученных литьем без отпуска (а), отливкой и отпуском (б), выращенных аддитивно методом СЛП и подвергнутых отпуску (в) [52]

В то же время для полученных методом СЛП изделий может быть достигнута высокая плотность путем термообработки заготовки, но микроструктура при этом будет отличаться размером кристаллов кремния и их расположением относительно границ зерна – частицы кремния будут расположены на границах ячеистых структур – дендритов (Рисунок 1.5, в).

Испытания на прочность показали значительные различия между сплавом AlSi10Mg, полученным литьем, и технологией SLM [55, 56]. Благодаря тонкой микроструктуре материал SLM имеет большую твердость по сравнению с литым материалом. Однако испытания на растяжение показали, что продукт, полученный аддитивно, имеет более низкий предел прочности на растяжение по сравнению с отливкой. Механические свойства зависят также и от постобработки (Таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение отдельных механических характеристик литого AlSi10Mg в сравнении с заготовкой, полученной методом СЛП

	E, ГПа	σ_b, МПа	σ_t, МПа	Относительное удлинение, %	HV
СЛП	32	160	159	1,59	107±2
Литьё	114	193	99	6,52	67±3
СЛП + Отпуск	64	192	171	1,77	109±3
Литьё + Отпуск	104	309	242	6,89	108±6

В общем случае селективная лазерная плавка позволяет обеспечить более тонкую настройку и управление результирующей микроструктурой заготовки/изделия через оптимизацию параметров плавки – скорости сканирования, шага штриховки, мощности лазерного излучения и других [52].

Сравнение с порошковой металлургией показывает несколько иные результаты с точки зрения микроструктурных особенностей изделия или заготовки [57]. Вследствие быстрого затвердевания с высокой скоростью охлаждения в диапазоне 103–105 К/с, аддитивно изготовленные изделия и заготовки из Al-Si могут обладать сверхтонкой, но нестабильной микроструктурой.

Сама микроструктура изделий, полученных методами порошковой металлургии из материала AlSi10Mg будет отличаться от изделия, выращенного аддитивно – так, например, после порошковой металлургии сплав AlSi10Mg демонстрирует более мелкий средний размер зерна (2,5 мкм) по сравнению с выращенным аддитивно изделием (в среднем 9,8 мкм) [58]. Помимо размера частиц порошка важными факторами, приводящими к различиям в механических характеристиках, являются также и отличия в форме, расположении и размере частиц кремния в сплаве. Микроструктура, полученная после спекания спрессованного порошкового материала, однородна, включения равномерно распределены по поверхности образца-шлифа. Сами включения близки к сферической форме, а их размер составляет от долей до нескольких микрометров (Рисунок 1.6).

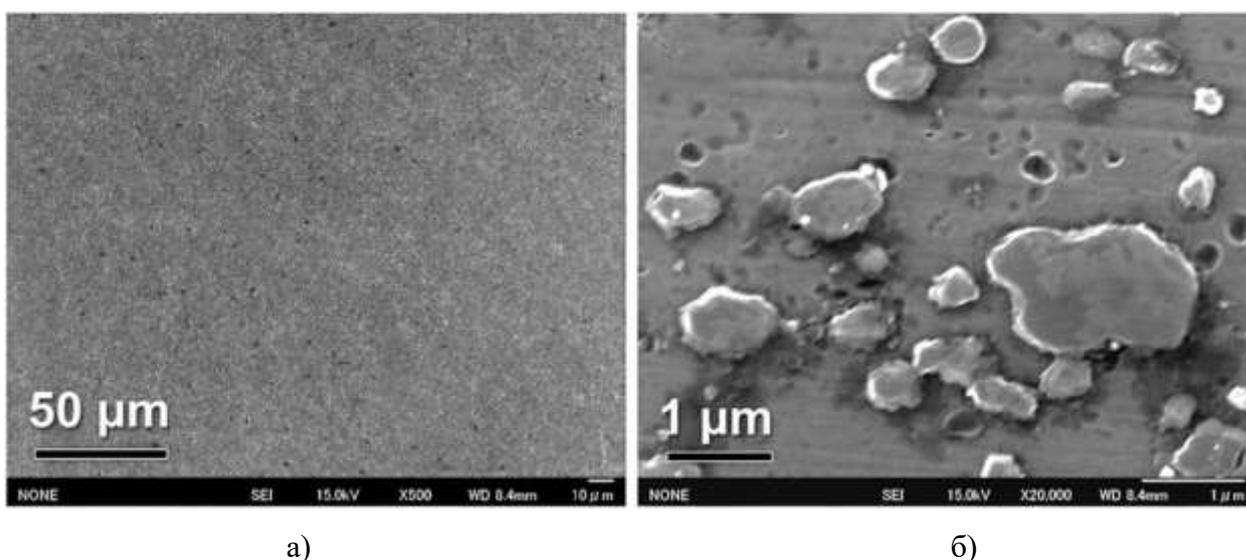
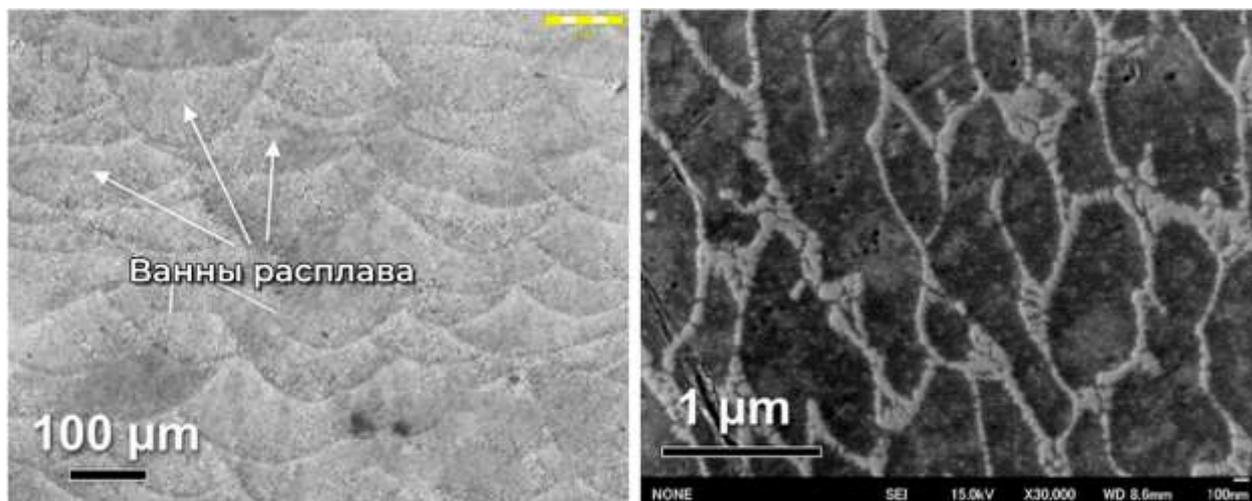


Рисунок 1.6 – SEM-снимки шлифов, подготовленных из образцов, полученных методами порошковой металлургии на 500-кратном (а) и 20 000-кратном увеличении (б)

В то же время, образцы, выращенные аддитивно из AlSi10Mg демонстрируют уже другую микроструктуру сплава. Она представлена наслоениями единичных треков (размером 100-300 мкм в зависимости от подобранных технологических параметров процесса СЛП). Границы каждого единичного трека / ванны расплава хорошо различимы (Рисунок 1.7, а).

Внутри ванн расплава видны сети дендритно-ячеистой структуры алюминия толщиной порядка 100 нм (Рисунок 1.7, б). На границах между зернами алюминия присутствуют эвтектические кристаллы кремния.



а)

б)

Рисунок 1.7 – SEM-снимки шлифов, подготовленных из образцов, полученных по технологии СЛП на 100-кратном (а) и 30 000-кратном увеличении (б)

Исследования [57] показывают, что наличие частиц Si различной формы и размеров является определяющим фактором различий в механических свойствах при сравнении изделий, полученных аддитивно и методами порошковой металлургии (Таблица 2).

Таблица 2 – Сравнение отдельных механических характеристик образца из AlSi10Mg, полученного методами прессования и спекания в печи (порошковая металлургия) в сравнении с заготовкой, полученной методом СЛП

	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{т}$, МПа	Относительное удлинение, %	HV	E, ГПа
Порошковая металлургия	190±3	123±2	25,7 ± 2,1	67±3	101
СЛП	455±12	300±3	5,2 ± 0,6	107±2	64

Исследования (52, 57) показывают, что помимо плотности (отсутствия пор и несплошностей в материале) изделий важный вклад оказывает распределения зерён и частиц добавочного элемента. В случае с AlSi10Mg – кремния.

С точки зрения этапности технологического процесса селективная лазерная плавка позволяет более тонкую настройку процесса выращивания за счёт большего количества параметров, регулируемых на этапе технологической подготовки аддитивного производства (Рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Технологические карты процессов литья, порошковой металлургии и селективной лазерной плавки металлопорошковых композиций

1.1.4 Выводы из обзора

Основываясь на изученных данных и наблюдениях, представленных в этом разделе, можно сделать выводы, помогающие определить границы применимости селективной лазерной плавки порошка AlSi10Mg в сравнении с производством силуминов с помощью точного литья или методами порошковой металлургии для решения актуальных задач.

Исследования показывают, что именно расположение частиц кремния различной формы и размеров играет решающую роль в различиях механических свойств между изделиями, полученными методами СЛП и порошковой металлургии. Так, например, у спрессованных и спеченных изделий можно наблюдать однородную микроструктуру – средний размер зерна меньше 2,5 мкм. В свою очередь для изделий, полученными методом СЛП – зерно размером 9,8 мкм, структуры $\alpha\text{-Al}$ располагаются в соответствии с паттернами лазерной штриховки (единичными треками), частицы кремния расположены вдоль границ зерна. Это означает, что по ряду механических свойств (предел текучести, твердость по Виккерсу) СЛП-изделия превосходят детали и заготовки, полученные порошковой металлургией. С другой стороны, благодаря мелкой и однородной структуре зерна, прессованные изделия значительно (более, чем в 10 раз) превосходят аддитивно изготовленные с точки зрения пластичности.

Сравнение отливок и выращенных аддитивно изделий из AlSi10Mg не позволяет в значительной степени проследить взаимосвязи между микроструктурой и механическими свойствами получаемых изделий. Несмотря на более тонкую микроструктуру изделий СЛП, отливки после соответствующей трёхэтапной термообработки показывают более высокие прочностные характеристики. Например, в то время как значение предела прочности на растяжение для литья составляет 309 МПа, для СЛП оно составляет 192 МПа.

В то же время из исследования понятно, что основной причиной низких значений механических свойств СЛП-образцов является их высокая пористость, которая существенно влияет на предел прочности, текучести, а также твердость получаемых изделий. Технологические особенности селективной лазерной плавки могут обеспечить заметное преимущество при разработке деталей, геометрию которых сложно/невозможно обеспечить формованием – литьём или методом порошковой металлургии. Однако достижение высоких механических свойств требует тщательного подбора параметров процесса СЛП в ходе опытных технологических работ (ОТР) и подготовке управляющей программы. Вопросы ОТР и технологической подготовки в целом будут рассмотрены в настоящей работе далее.

1.2 Обзор существующих систем технологической подготовки аддитивного производства

Типовой процесс технологического проектирования процесса аддитивного производства методом селективной лазерной наплавки состоит из ряда последовательных этапов, каждый из которых представляет собой отдельную технологическую задачу.

На данный момент процесс технологической подготовки для СЛП-установки EOS M270 выглядит следующим образом:

- импорт и лечение электронной модели изделия;
- размещение и компоновка изделий на платформе;
- проектирование поддерживающих структур;
- создание послойного представления об изделии;
- генерация путей лазера – штриховок, контуров;
- экспорт полученной информации о запуске в ПО принтера;
- окончательное размещение изделий для запуска;
- настройка параметров прожига;
- сохранение управляющей программы и запуск печати.

Обычно решение этих задач осуществляется средствами различных программных комплексов с операциями переноса данных по этапам до получения готовой управляющей программы для 3D-принтера [59].

Далее приведен обзор процесса технологической подготовки изделий для печати на установке EOS M 270 по технологии СЛП из порошковой нержавеющей стали PH-1 средствами зарубежных программных комплексов, а также с помощью инструментов отечественной среды технологической подготовки аддитивного производства “Glicer”.

1.2.1 Технологическое проектирование аддитивного производства в зарубежных программных комплексах

Здесь и далее в этом разделе процесс технологического проектирования показан на примере изделия «Сопло Лавалья» (Рисунок 1.9)

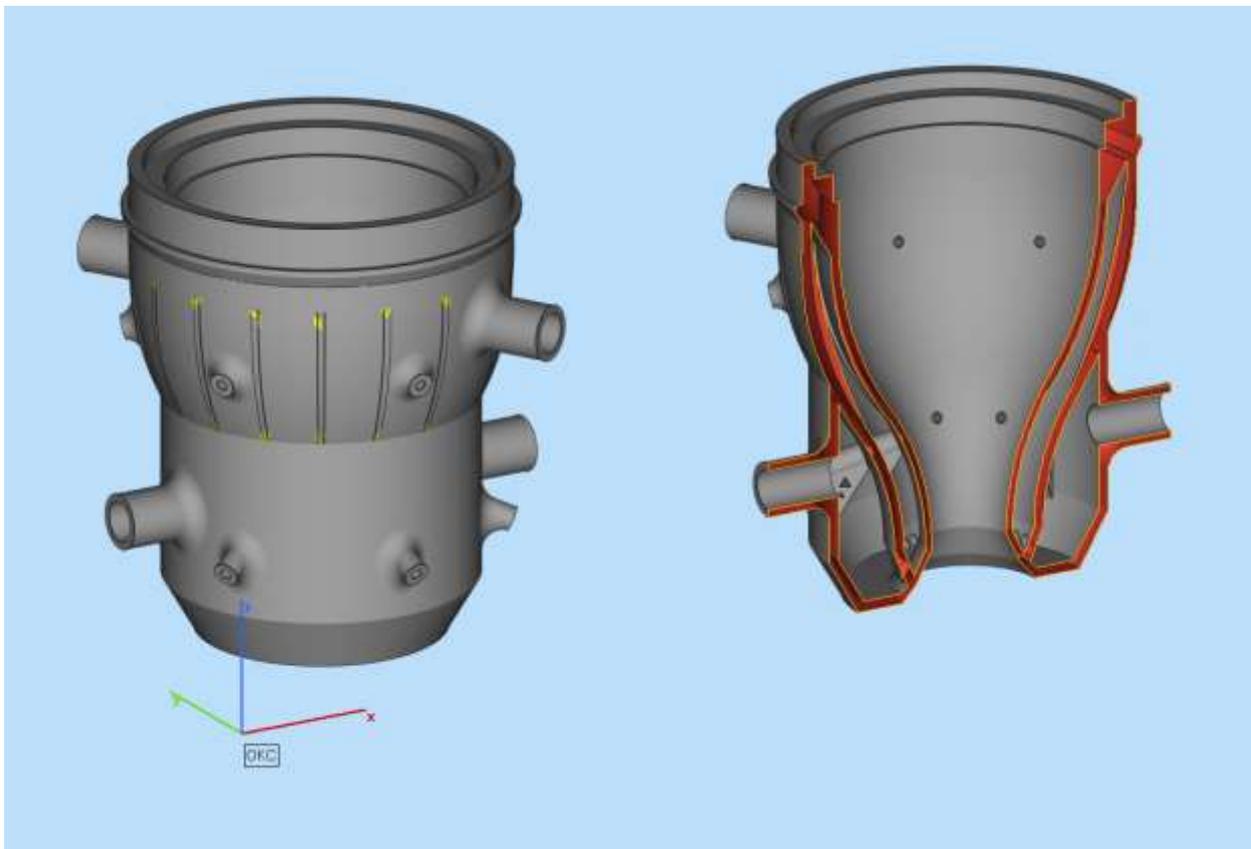


Рисунок 1.9 – Электронная модель изделия «Камера сгорания» в формате STL.

Все этапы, связанные с работой с готовой электронной моделью в формате .stl (фасетное тело) и проектирование поддерживающих структур происходит в среде **Materialise Magics**. После этого информация об *теле* изделия и его «поддержках» экспортируется в программный комплекс **EOS RP Tools** для создания послойного представления о модели и формировании контуров и штриховок – путей движения лазерного луча [60].

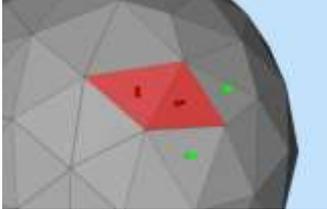
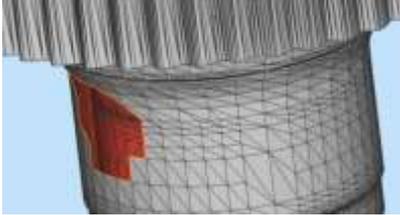
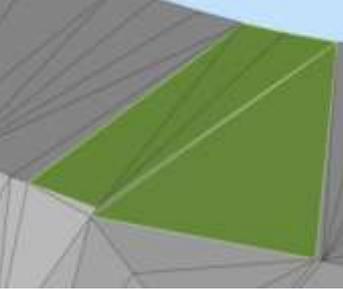
1.2.1.1 Контроль исходных данных

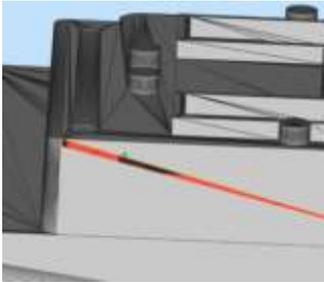
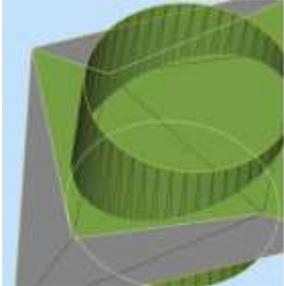
Качество исходных данных является важной проблемой развития аддитивных технологий [61]. Во многом это связано с тем, что затруднено создание единого стандарта на передачу геометрии, ориентированного

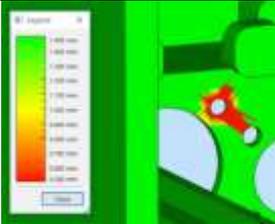
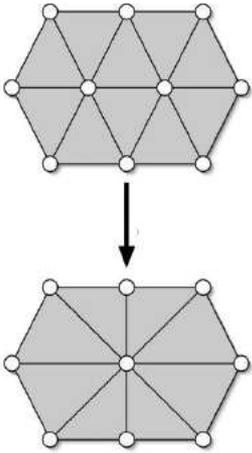
специально под требования 3D печати. Исторически сложилось ситуация, что для этой цели используются другие форматы, примерно подходящие с функциональной точки зрения. В основном это STL и проприетарные форматы компаний производителей принтеров [62]. Оба варианта не могут в полной мере отвечать требованиям, предъявляемым к геометрии для аддитивных технологий в виду большого разброса производимых конструкций деталей. Это приводит к проблемам при передаче геометрии от конструкторского департамента в технологический. Если рассматривать сложившийся стандарт передачи геометрии для 3D печати – формат STL, то следует отметить его достоинства и недостатки применительно к аддитивным технологиям [63-65]. Формат прост, стандартизован, и позволяет передавать множество треугольников и нормали к ним. Однако далеко не каждый набор треугольников представляет собой трехмерную модель. И тот факт, что треугольники должны представлять собой модель никак форматом не контролируются. Дополнительные ограничения на треугольники форматом не стандартизованы и являются в данный момент некой договоренностью между участками аддитивного комьюнити. В частности, подразумевается, что треугольники в STL файле должны представлять собой консистентную сетку без дырок и пересечений, формирующее геометрическое представление твердого тела.

Однако в силу отсутствия стандартизации и существования большого числа способов и инструментов генерации сеток, зачастую это правило нарушается. Исходя из стандарта STL можно выделить следующие ошибки представления трехмерных моделей для 3D печати (Таблица 3).

Таблица 3 – Типы ошибок в представления геометрии, пропускаемые форматом STL

Тип ошибки	Описание	Комментарий
<p>Перевернутые нормали</p> 	<p>Нарушение порядка обхода вершин в треугольниках</p>	<p>При нарушении порядка обхода вершин треугольников, из которых состоит полигональная модель изделия возникает риск некорректного формирования послойного представления и его заполнения. Такие ошибки могут привести к заполнению слоев или их частей, в то время как конструктивно в этих местах заполнение не предусмотрено.</p>
<p>Дырки в поверхностях</p> 	<p>Отсутствие части связанных треугольников большой площади</p>	<p>Отсутствие части связанных треугольников большой площади в полигональной модели, так же как и в случае с перевернутыми нормальями, создает риски правильного формирования послойного представления электронной модели изделия и его заполнения. Фактически алгоритм найдет произвольное решение по построению контура и его заполнению, что гарантированно приведет к браку детали, содержащей такую ошибку, а возможно и к браку других деталей, скомпонованных в этой же сцене печати.</p>
<p>Наложение</p> 	<p>Нарушение условия парности ребер треугольников</p>	<p>При создании изделий с сложным геометрическим обликом, а, как правило, аддитивные технологии применяются для таких случаев, в процессе конструкторских работ используются булевы операции или другие инструменты работы с геометрией/формой, что приводит при трансляции в полигональную модель к появлению лишних полигонов и разрывов между ними. Такие ошибки могут привести, как минимум, к увеличению машинного времени, а как максимум к поломке оборудования.</p>

		<p>Еще один пример – это построение некорректного контура полигональной модели из-за наличия большого количества граней треугольников, чем это необходимо для корректного описания геометрической формы.</p>
<p>Несшитые грани</p> 	<p>Отсутствие части связанных треугольников маленькой площади</p>	<p>Когда два или более треугольника не связаны друг с другом, они образуют некорректные контуры и формируют разрывы. Такие ошибки нарушают целостность, как электронной модели изделия, так и его конструктивного облика. Такие ошибки сложно выявить визуально, поэтому необходимы адекватные инструменты по их поиску и своевременному исправлению.</p>
<p>Шум на поверхностях</p> 	<p>Наличие лишних несвязанных треугольников близко к хорошей поверхности</p>	<p>Для успешной печати изделия, его полигональная модель должна быть группой связанных треугольников, образующих целостный объект, сохраненный в файл. В случае перекрытия оболочек или их разделения могут образоваться некорректные области с перевернутыми или пересекающимися треугольниками.</p>
<p>Пересечение треугольников</p> 	<p>Наличие пересекающихся треугольников</p>	<p>Распространенная проблема – это разрезание треугольников при их пересечении. Когда треугольники в полигональной сетке пересекаются, необходимо контролировать целостность модели из-за риска получить в послойном представлении ошибочные контуры, и, соответственно, их некорректное заполнение.</p>
<p>Тонкостенные элементы</p>	<p>Наличие рядом треугольников с разнонаправленными нормальными</p>	<p>Крайне важно контролировать наличие и геометрию тонких стенок (ребер) в электронной модели. В процессе конструирования можно ошибочно назначить толщину</p>

		<p>тонких стенок и при генерации полигональной сетки могут возникнуть проблемы как с структурой и целостностью сетки, так и несовпадение параметров сетки с возможностями установки аддитивного производства.</p>
<p>Минимизация числа треугольников</p> 	<p>Построение триангуляции адекватной требуемой точности</p>	<p>Очень важной задачей является правильный выбор размерности полигональной сетки для каждого проекта. С одной стороны, адекватное количество полигонов необходимо чтобы уменьшить необходимые ресурсы для обработки модели, с другой стороны необходимо построить модель, адекватную конструктивному облику и разрешающей способности установки аддитивного производства. Так же от плотности сетки зависит успешность множества технологических операций по подготовке к 3D-печати, и, как следствие, появление или отсутствие брака.</p>
<p>Масштаб</p>	<p>Стандарт STL не содержит данных о масштабе</p>	<p>Масштабирование полигональной модели изделия является важным инструментом в аддитивном производстве. Формат файлов STL не содержат информацию о единицах измерения расстояния/масштаба. В связи с этим важными являются адекватные инструменты работы с масштабом полигональных моделей.</p>

Основным выводом по представленным типам ошибок является то, что ошибки в сетках разноплановы и все они могут влиять на результат печати. , что затрудняет создание единого инструмента по их тестированию и лечению.

Важно понимать какие программные средства могут быть использованы для выявления и лечения каждого типа ошибки [66] и к каким последствиям они могут привести (

Таблица 4).

Таблица 4 – Анализ методов выявления и устранения ошибок 3D модели.

Тип ошибки	Последствия в печати	Метод выявления	Метод устранения
Перевернутые нормали	Ошибки в контурах на этапе слайсинга, ошибки сканирования	Анализ парности ребер	Лечение сетки, лечение контуров
Дырки в поверхностях	Ошибки в контурах на этапе слайсинга, ошибки сканирования	Анализ парности ребер	Лечение сетки, лечение контуров
Наложение	Ошибки в контурах на этапе слайсинга, ошибки сканирования	Анализ парности ребер	Фильтр контуров
Не сшитые грани	Ошибки в контурах на этапе слайсинга, ошибки сканирования	Анализ парности ребер	Лечение контуров
Шум на поверхностях	Ошибки в контурах на этапе слайсинга, ошибки сканирования	Анализ парности ребер	Фильтр контуров
Обрезанные или пересечение треугольников	Ошибки в контурах на этапе слайсинга, ошибки сканирования	Анализ пересечений треугольников	Лечение модели
Тонкостенные элементы	Артефакты в геометрии готового изделия	Анализ взаимного расположения поверхностей	Лечение модели
Минимизация числа треугольников	Ошибки в расчетах, перерасход ресурсов	Проверка на достаточность ресурсов	Нормализация треугольников
Масштаб	Стандарт STL не содержит данных о масштабе		

Из анализа ошибок следует, что их выявление и лечение применительно к их использованию в аддитивным технологиях можно осуществлять как на этапе подготовки геометрии (на уровне сеток) так и на этапе слайсинга (на уровне контуров) [67-69].

1.2.1.2 Импорт и лечение электронной модели

Первая операция – импорт электронной модели изделия и проверка фасетного тела на наличие ошибок в геометрии. В Materialise Magics данные операции осуществляются при помощи загрузки STL-файла с помощью *Мастера исправлений Magics* (Рисунок 1.10). Мастер исправлений позволяет отыскать и устранить большинство ошибок геометрии изделия, которые в ином случае могли бы привести к созданию некорректного послойного представления.

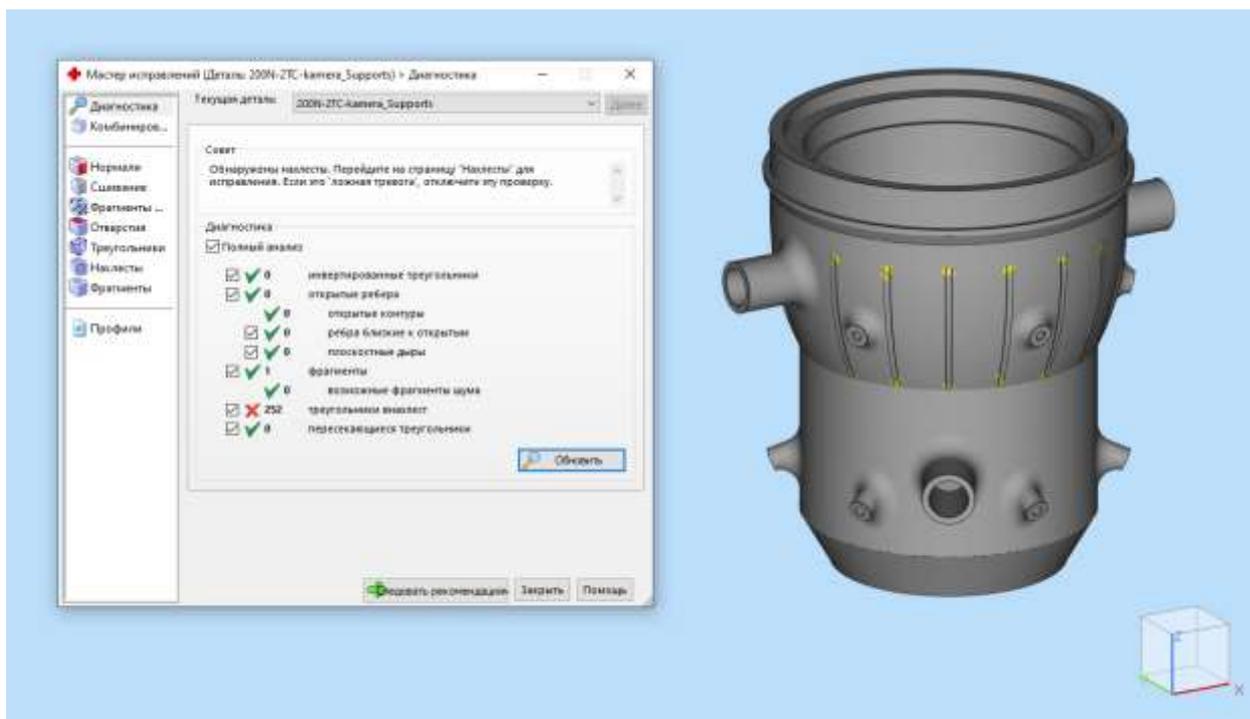


Рисунок 1.10 – Импорт и лечение электронной модели в Materialise Magics.

Инструменты Magics позволяют обнаружить и исправить следующие виды ошибок:

- некорректные нормали полигонов;
- щели и отверстия в полигональной сетке;

- наличие множественных оболочек в одном фасетном теле;
- наложение и пересечение полигонов сетки.

1.2.1.3 Размещение и компоновка изделий на виртуальной платформе

Электронная модель, прошедшая процедуру лечения, размещается на виртуальной платформе в Magics (Рисунок 1.11). Параметры виртуальной платформы соответствует параметром платформы установки EOS M 270 и загружаются из библиотеки оборудования Materialise.

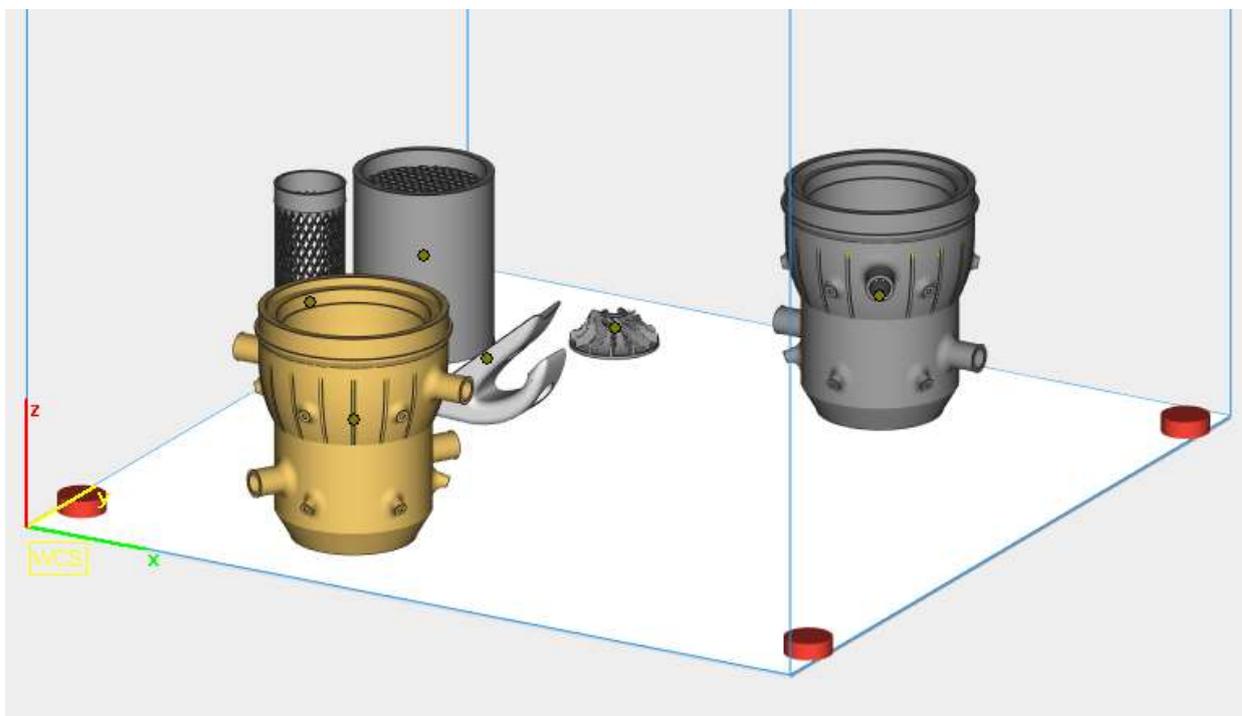


Рисунок 1.11 – Создание компоновочного решения в виртуальной камере установки DMLS.

1.2.1.4 Проектирование поддерживающих структур

Для выбранного компоновочного решения с помощью инструментов Magics проектируются поддерживающие структуры. Для каждого изделия данный процесс – отдельная и, чаще всего, трудоемкая технологическая задача. Это особенно верно при попытке уменьшить машинное время или расход материала при печати DMLS за счёт оптимизации поддерживающих структур и их параметров.

Для тестового изделия были подготовлены два варианта поддерживающих структур (Рисунок 1.12, а, б):

- а) Для одного изделия поддержки были созданы с помощью полуавтоматического определения зон, требующих поддержек и построением поддерживающих структур по стандартным настройкам;
- б) Для второго изделия с целью сокращения машинного времени при сохранении прочностных характеристик были тщательно подобраны поверхности, требующие поддержек, а также проведена тонкая настройка параметров поддерживающих структур.

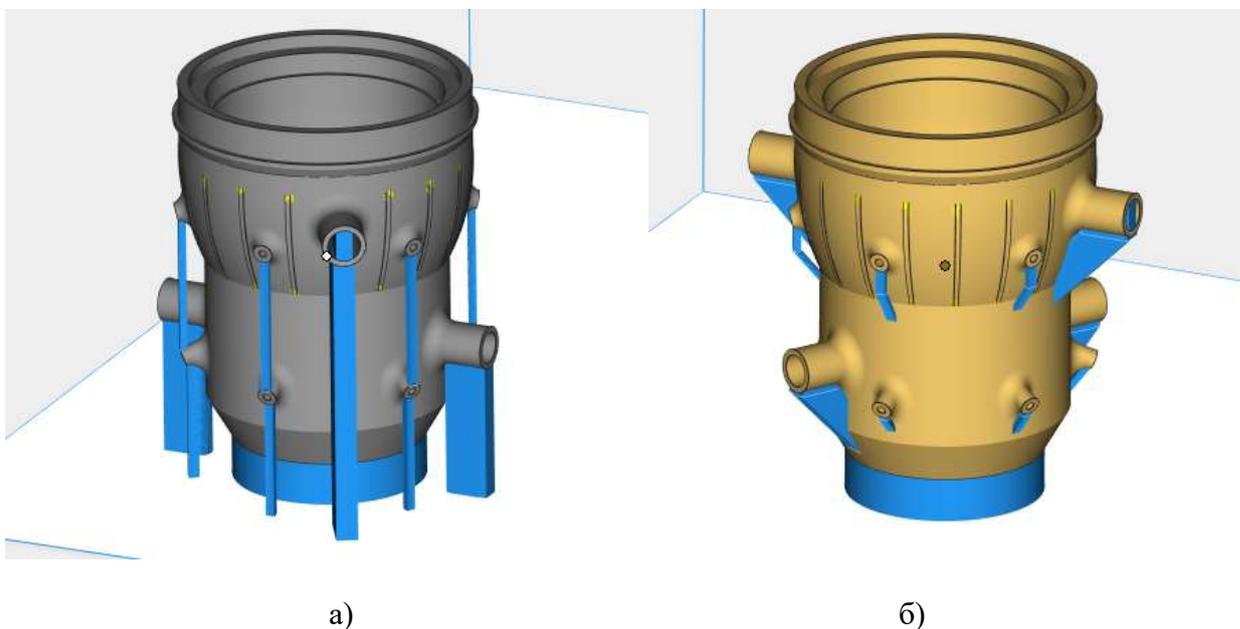


Рисунок 1.12 – Варианты поддерживающих структур тестового изделия, созданные: а) полуавтоматическими операциями, б) тонкой настройкой.

Помимо тестовых изделий за дополнительное время готовятся поддерживающие структуры и для других изделий в запуске (Рисунок 1.13)

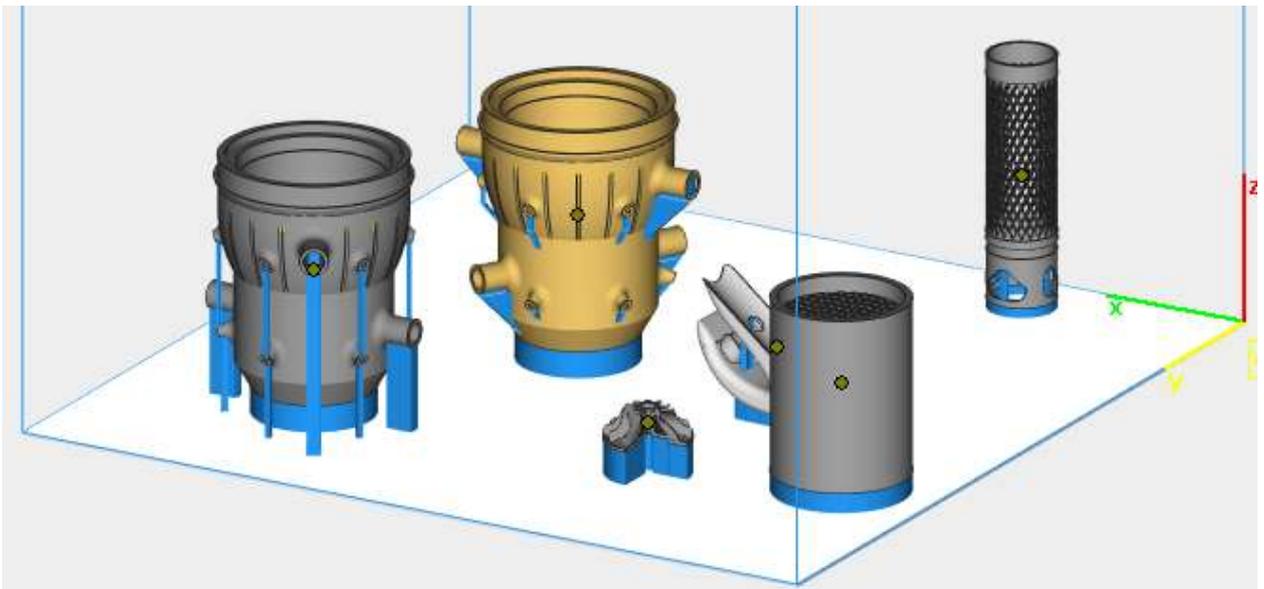


Рисунок 1.13 - Подготовленные stl-файлы изделий тестового запуска.

Компоновочные решения с поддержками подготавливаются к экспорту в следующий этап ТПП:

- контуры поддержек экспортируются в формат **.cli**;
- тело изделия экспортируется в формат **.stl** с сохранением координат.

Подготовленная информация об изделии транслируется в программу ТПП EOS RP-Tools для дальнейшей работы со слоями. Трансляция информации может занимать в среднем до 10-15 минут [70].

1.2.1.5 Создание послойного представления и генерация путей движения лазерного луча

Дальнейшая работа с информацией об изделии происходит в среде EOS RP-Tools.

Взаимодействие с программой происходит через встроенное в «Проводника Windows» меню (Рисунок 1.14), с помощью которого для сохраненного ранее STL файла создается послойное представление с сохранением координат модели изделия в системе координат камеры принтера.

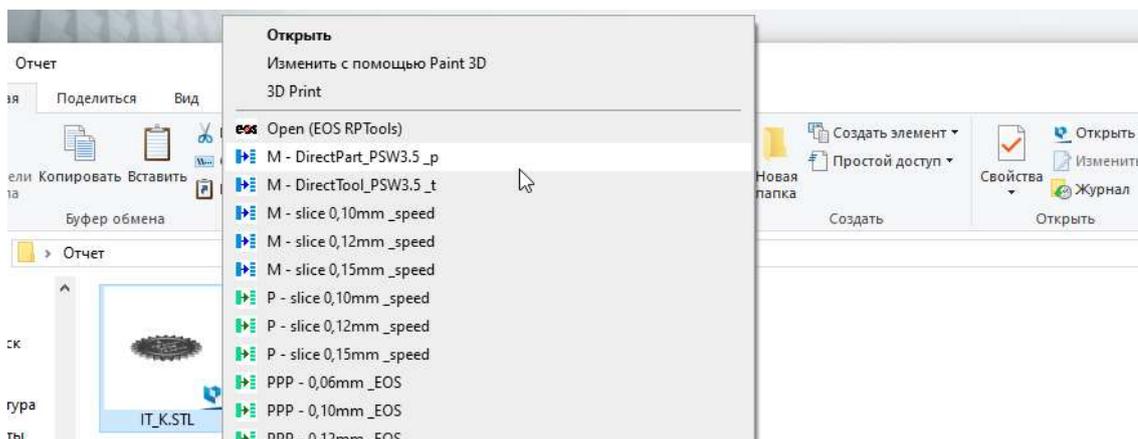


Рисунок 1.14 – Интегрированное меню RP-Tools.

Программой предусмотрен выбор одного из предустановленных закрытых профилей с настройками послойного представления. Однако более тонкая настройка параметров послойного представления может быть выполнена лишь на более поздних этапах и только при наличии приобретаемой отдельно лицензии редактора параметров послойного представления.

Для дальнейшей трансляции информации о слоях также предусмотрен экспорт файла в формате «.sli» (Рисунок 1.15). В данный файл сохраняются как пути штриховок лазерного луча, так и параметры прожига (мощность лазера и скорость движения пятна).

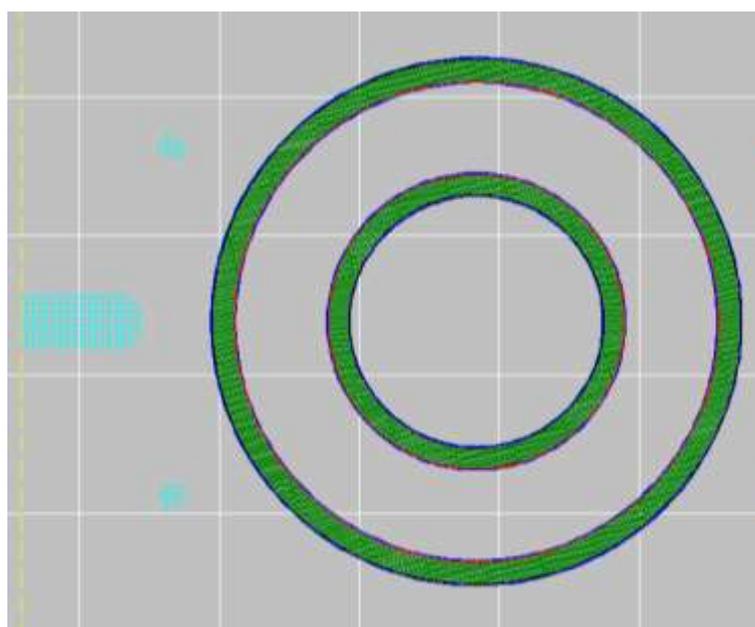


Рисунок 1.15 – Представление слоя в EOS RP-Tools.

1.2.1.6 Докомпоновка запуска и настройка параметров экспозиции слоя

Информация о теле изделия и подержках экспортируется в ПО **EOS Process Software (PSW)**. Интерфейс представляет собой двухмерный срез плоскости платформы установки (Рисунок 1.16), на который проецируется информация о штриховках всех изделий и подержек конкретного слоя.

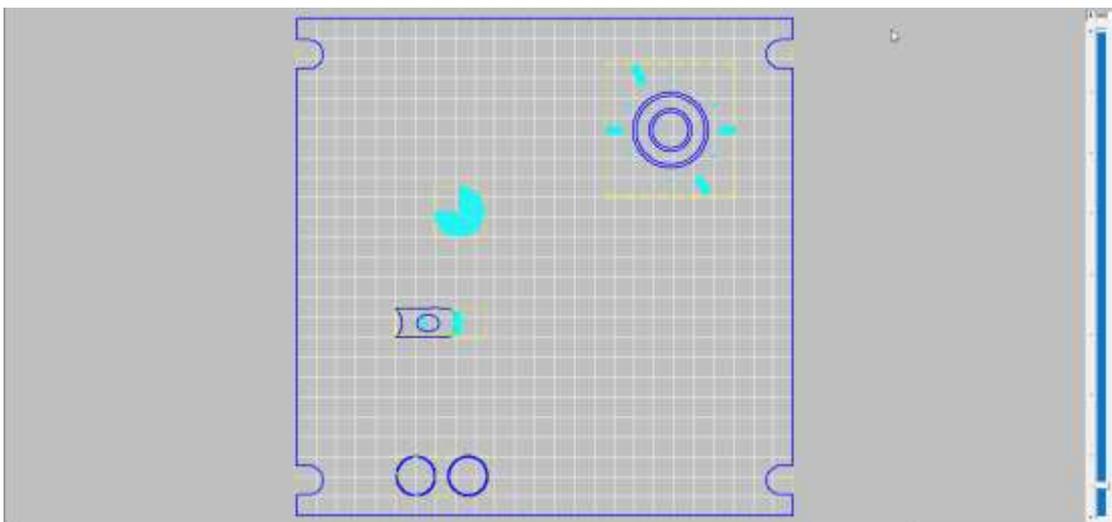


Рисунок 1.16 – Интерфейс EOS Process Software.

В среде **PSW** происходит:

- окончательное размещение изделий с подержками на платформе;
- настройка параметров прожига (**Exposure settings**).

Exposure settings (параметры прожига/экспозиции/сканирования) – ряд параметров, включающих паттерн штриховки изделия, а также мощность и скорость прохода лазера, которые определяют характер экспозиции печатаемого изделия.

Для установки **EOS M 270** конкретные наборы параметров прожига сохранен в профилях по умолчанию:

1. **M_DirectPart** – стандартные настройки для прожига изделий.
2. **M_DirectTool** – настройки, позволяющие печатать Skin (*оболочку*) и Core (*ядро*) изделия с отличающимися параметрами. Это можно использовать,

например, для ускорения процесса пропуском слоев при печати ядра изделия.

При наличии лицензии на редактор параметров экспозиции возможно провести более тонкую настройку процесса печати изделий.

По умолчанию параметры прожига являются закрытыми. Редактор параметров (Exposure editor, лицензия №40000) не открывает пользователю настройки уже имеющихся профилей, но позволяет создать **собственные** на их основе (Рисунок 1.17).

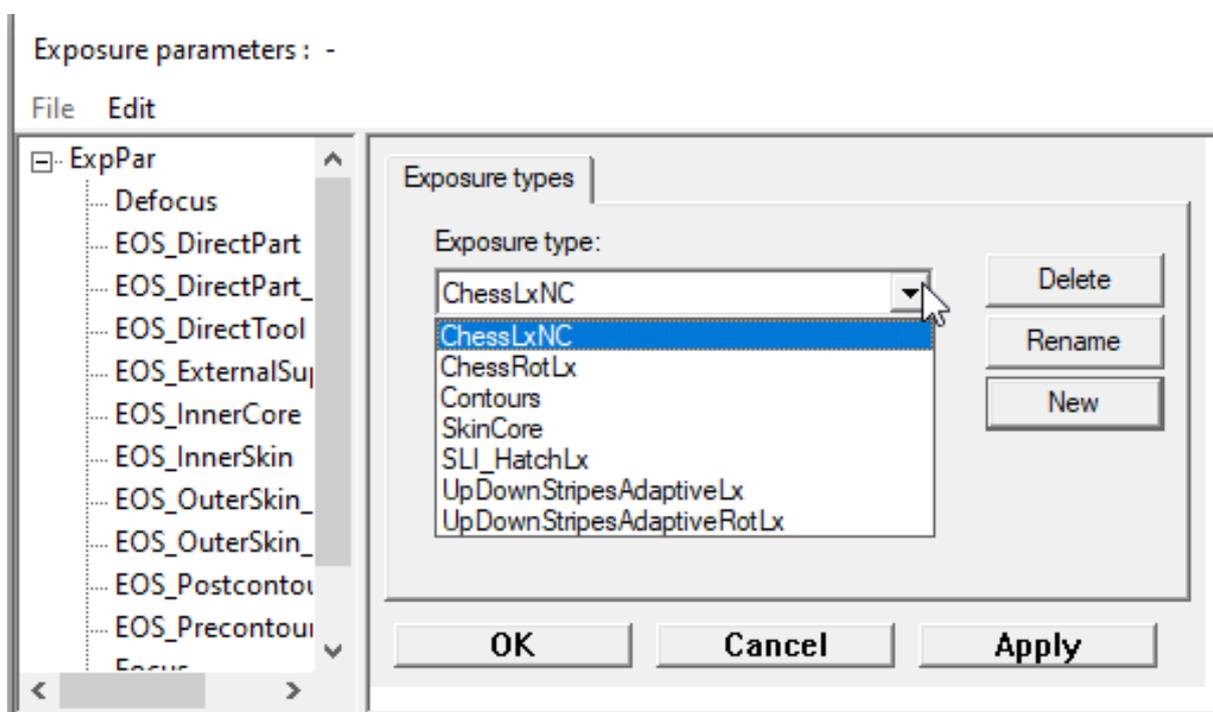


Рисунок 1.17 – Редактор параметров прожига.

В данной главе все доступные профили продемонстрированы на примере изделия «Крепёж» (Рисунок 1.18).

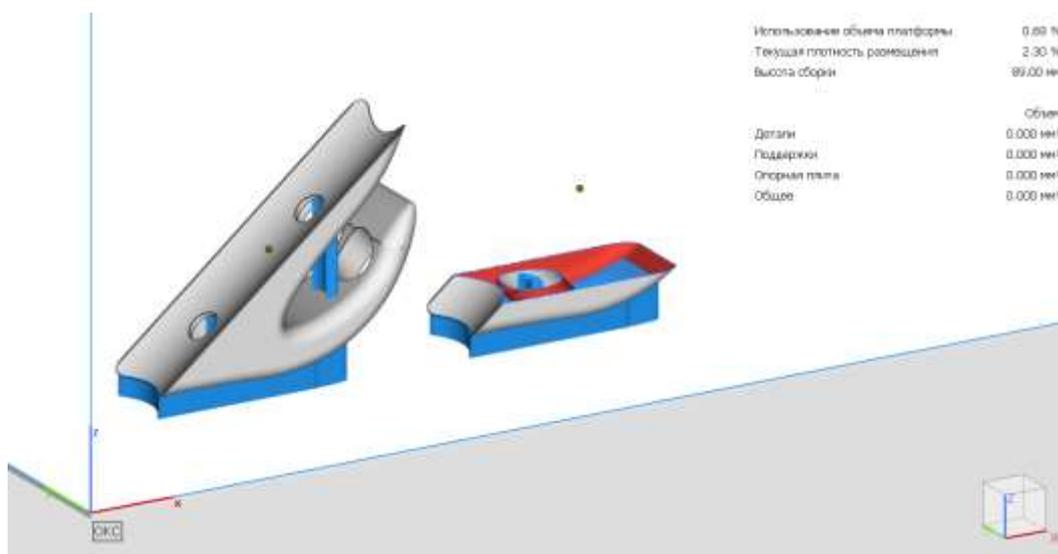


Рисунок 1.18 – Изделие в виртуальной камере принтера с поддержками и тестовое сечение (справа).

По умолчанию доступны следующие настройки для создания собственного профиля:

1. **ChessLxNC** и **ChessRotLx** – «шахматный» прожиг слоя (Рисунок 1.19);

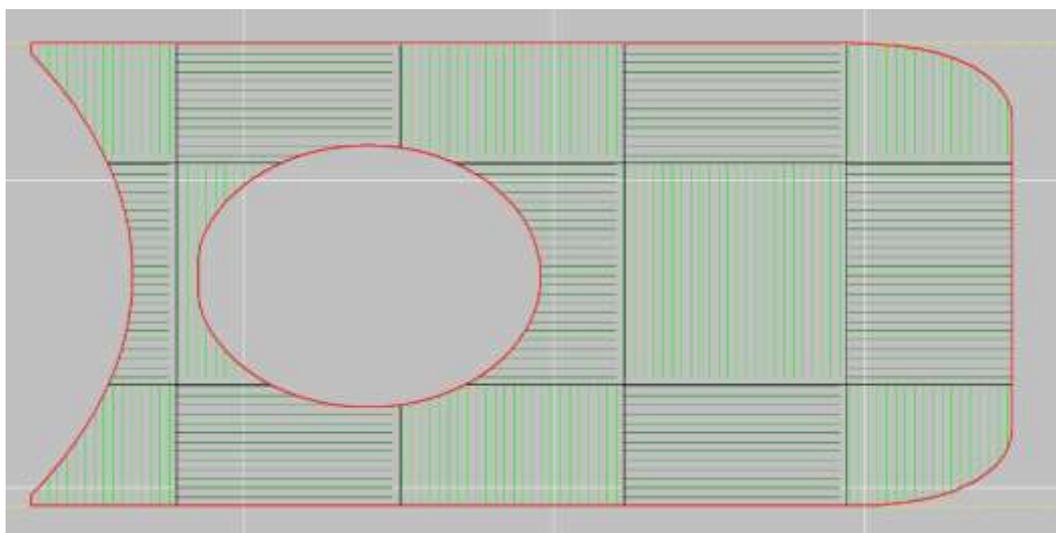


Рисунок 1.19 – Шахматная штриховка слоя.

«Шахматная» штриховка – вид экспозиции слоя с заполнением по **секторам** (англ. *squares*, квадраты). Сектора заполняются линейными проходами лазера горизонтально и вертикально по очереди в шахматном порядке. Между секторами в слое располагаются **щели** (англ. *gaps*, щели/зазоры). Зазоры представляют собой вертикальные и горизонтальные

траектории прохода лазерного луча, разделяющие собой сектора (черные линии на рисунке выше).

Такая настройка параметров прожига используется в стандартных профилях для работы с РН-1, в частности, для уменьшения времени прожига на засветку ядра изделия (Рисунок 1.20). Так, например, Skin изделия будет сканироваться параллельными полосами в рамках каждого слоя, а Core – шахматной штриховкой с пропуском каждого второго слоя.

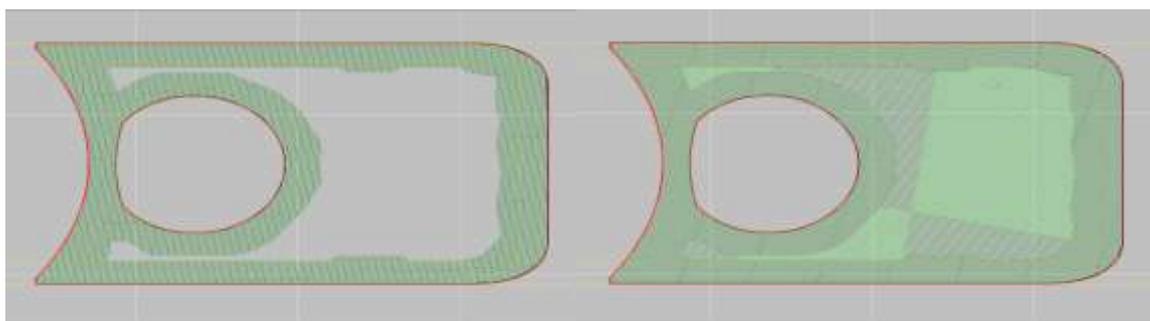


Рисунок 1.20 – Два последовательных слоя с применением шахматной штриховки.

Физические и геометрические параметры этой штриховки возможно изменить с помощью редактора параметров (Рисунок 1.21). Описание параметров приведено в таблице 2.1.

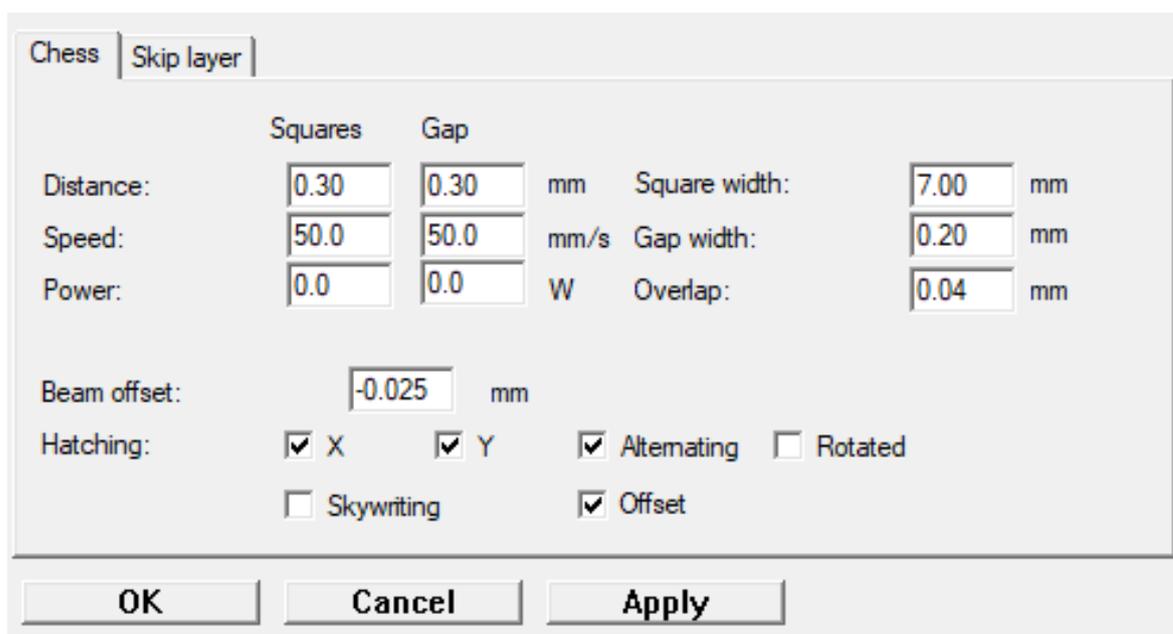


Рисунок 1.21 – Интерфейс редактора параметров прожига (Exposure settings editor).

Таблица 5 Описание параметров настройки профиля экспозиции.

Параметр	Описание	default	min	max
Distance, расстояние [мм]	Расстояние между линиями штриховки для «квадратов» и «зазоров»	0.3	0	999
Speed, скорость [мм/с]	Скорость прожига (прохода лазера) для «квадратов» и «зазоров»	50	50	7000
Power, мощность [W]	Мощность лазера для прожига «квадратов» и «зазоров»	0	0	195
Beam Offset, смещение луча [мм]	Смещение лазерного луча внутрь номинального контура сечения	-0,025	-0,5	10
Square width, ширина сектора [мм]	Определяет габариты каждого сектора	7	0	100
Gap width, ширина щели, [мм]	Определяет ширину «зазоров»	0,5	-1	20
Overlap, наложение [мм]	Определяет ширину пересечения «квадратов» и «зазоров»	0,03	0	2
Hatching (X,Y), штриховка X и Y	Включает/отключает штриховку по осям X и Y	вкл	выкл	вкл
Alternating	Изменяет направление штриховки с горизонтального на вертикальный от слоя к слою (если отключено, сканирует в обоих направлениях на каждом слое)	вкл	выкл	вкл
Rotated	Поворачивает горизонтальные и вертикальные линии штриховки на 45°	выкл	выкл	вкл
Skywriting	Включает фазу ускорения и замедления для лазерного фокуса за пределом зоны экспозиции при выключенном лазере.	выкл	выкл	вкл
Offset	Смещает сектора по осям X и Y таким образом, что на каждом следующем слое пересечение двух линий «зазоров» находится там, где находился центр сектора на предыдущем слое	выкл	выкл	вкл

1. **Contours** – экспозиция контуров слоя (Рисунок 1.22)



Рисунок 1.22 – Прожиг линии контуров в слое изделия.

Прожиг контуров - вид экспозиции слоя с прожигом линий номинального контура по сечению детали. Не используется отдельно, а лишь в совокупности с другими режимами прожига для дополнительного спекания частиц МПК по контуру изделия.

2. **UpDownStripesAdaptiveLx** и **UpDownStripesAdaptive** – прожиг параллельных линий в рамках слоя (Рисунок 1.23).

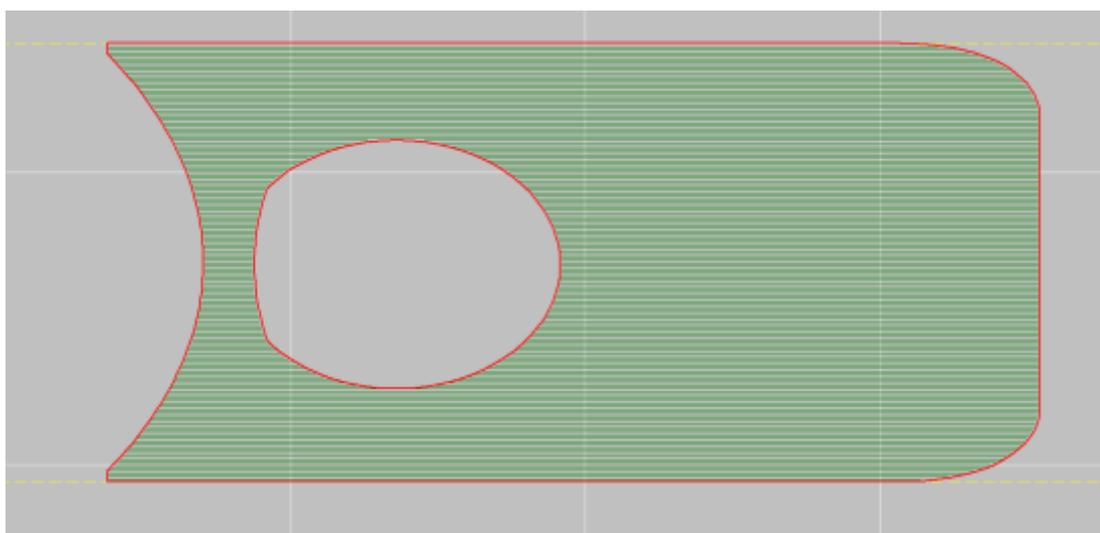


Рисунок 1.23 – Штриховка UpDownStripes

Также, как и профиль **Contours**, настройки прожига **UpDownStripes** не используется в качестве самостоятельного профиля для экспозиции слоя.

3. SkinCore – мастер-профиль для настройки параметров прожига слоя по предварительно подобранным параметрам других профилей;

Мастер-профиль **SkinCore** используется для тонкой настройки прожига изделия. С его помощью можно отрегулировать экспозицию слоя, изменяя следующие параметры (Рисунок 1.24):

- **Pre exposure type** – профиль предварительной экспозиции. По умолчанию перед началом прожига слоя, лазерный луч на большой скорости обходит контур изделия;
- **Skin exposure type** – настройки прожига оболочки изделия;
- **Core exposure type** – настройка прожига ядра изделия;
- **Post exposure type** – профиль заключительной экспозиции слоя. По умолчанию post exposure состоит в дополнительном прожиге контуров слоя после сканирования лазером Skin и Core изделия;

Также дополнительно возможно настроить толщину оболочки изделия по площади (X и Y), а также по высоте (Z).

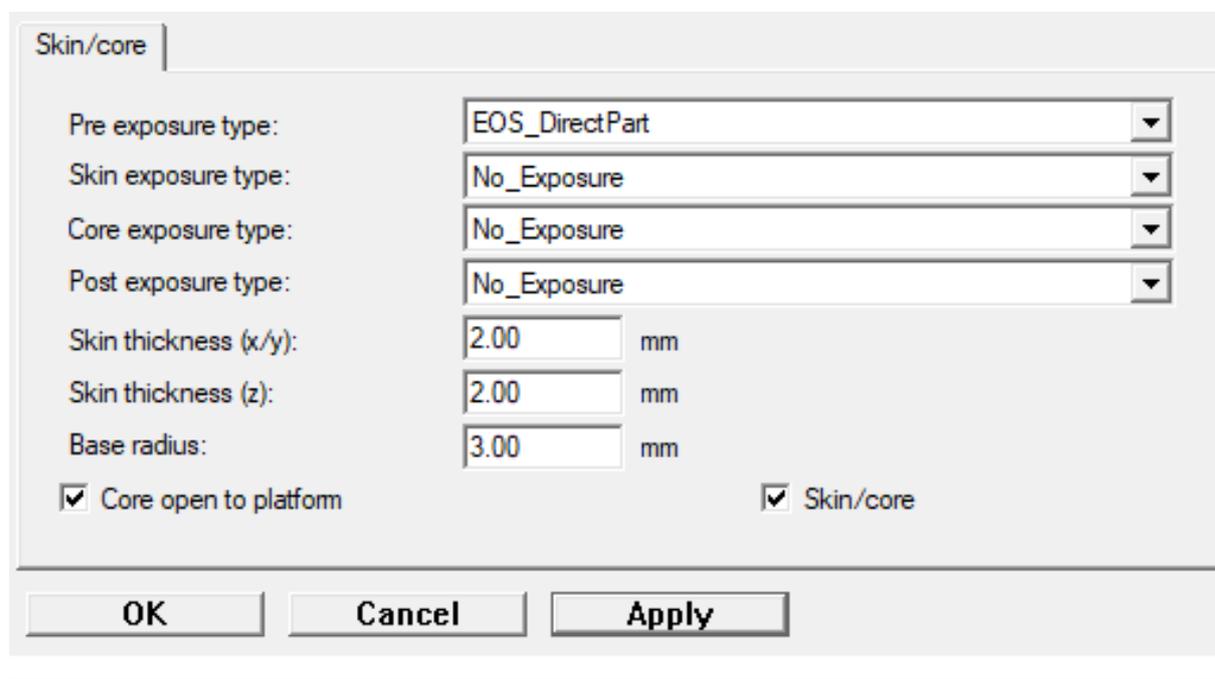


Рисунок 1.24 – Настройки мастер-профиля Skin-Core.

1.2.1.7 Схема процесса ТПП в зарубежных программных комплексах

Процесс технологической подготовки производства изображен на схеме (Рисунок 1.25):



Рисунок 1.25 – Схема процесса подготовки запуска печати в зарубежном ПО.

1.2.2 Процесс технологической подготовки в ПК ТПП «Glicer»

В отличие от зарубежного программного обеспечения Glicer позволяет вести процесс технологической подготовки в единой информационной среде, что обеспечивает неразрывность цифровой цепи при подготовке аддитивного производства [71].

Благодаря этому инженер-технолог не тратит время на трансляцию данных об изделии, подделках и послойном представлении. Это позволяет избежать возможных ошибок при импорте/экспорте информации между программными комплексами и сокращает общее время технологического процесса.

Процесс технологической подготовки производства будет также показан на примере тестового изделия «Камера сгорания» (Рисунок 1.26)

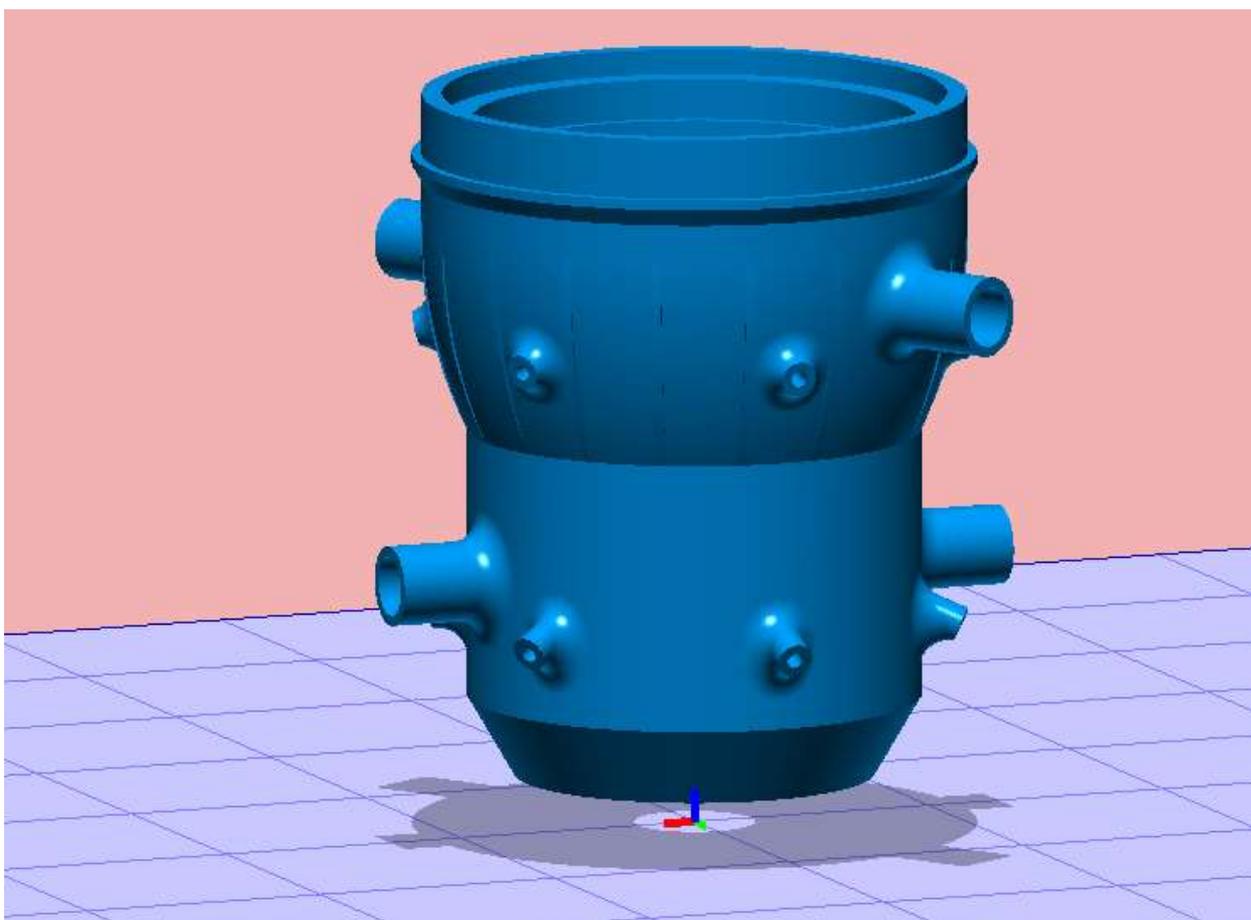


Рисунок 1.26 – Электронная модель изделия «Камера сгорания».

1.2.2.1 Импорт и лечение электронной модели

Glicer позволяет импортировать фасетное тело в формате STL для последующей процедуры нахождения и исправления ошибок (Рисунок 1.27).

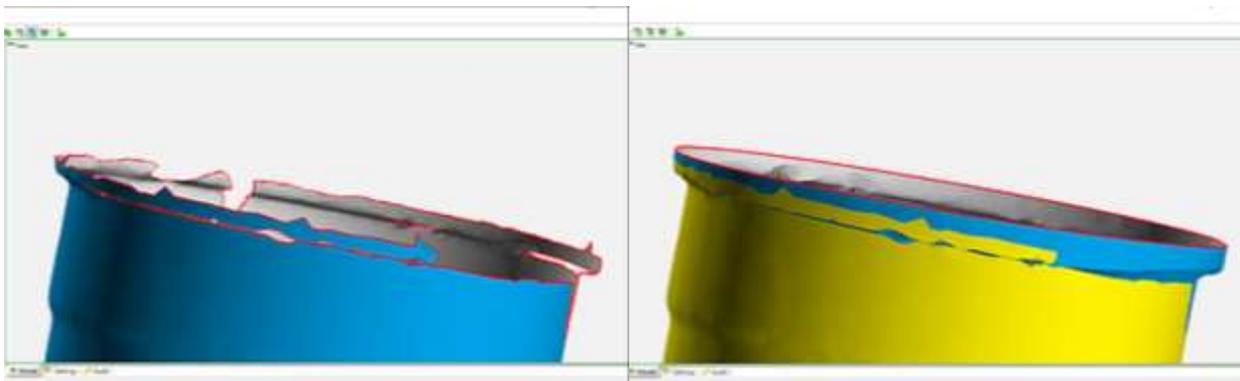


Рисунок 1.27 – Исправление отсутствующей геометрии модели изделия по образующей полигонов.

1.2.2.2 Размещение и компоновка изделий на виртуальной платформе

Поиск компоновочного решения производится, как и в Magics, в виртуальной камере установки DMLS. Параметры установки могут быть заданы самостоятельно, что делает Glicer удобным инструментом для компоновки как широко известных машин, так и единичных экспериментальных 3D-принтеров (Рисунок 1.28).

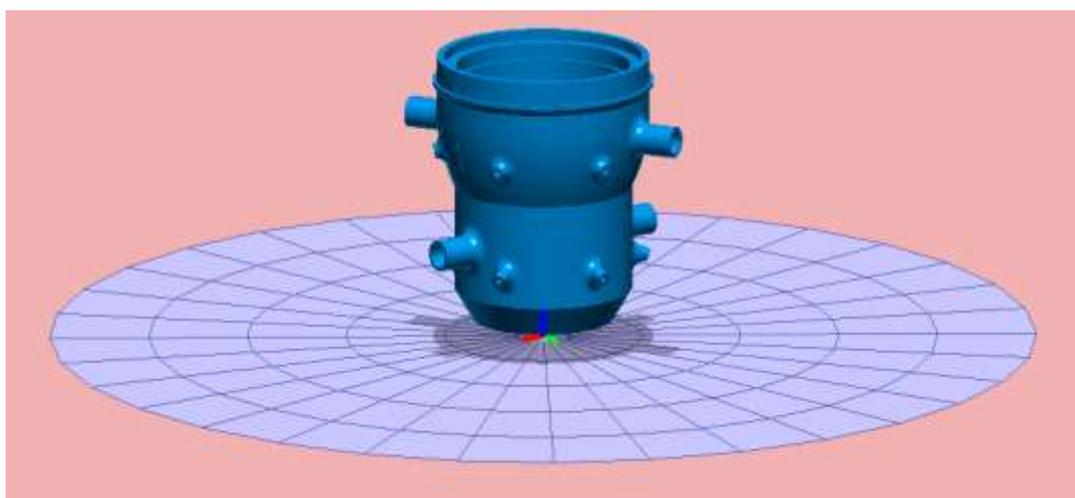


Рисунок 1.28 – Тестовое изделие в камере с цилиндрической системой координат.

1.2.2.3 Проектирование поддерживающих структур

Инструменты Glicer позволяют автоматически определить зоны, требующие поддержек, с помощью анализа поверхностей, нависающих над платформой больше, чем на критический угол, определяемый технологией, материалом, а также особенностями геометрии (Рисунок 1.29).

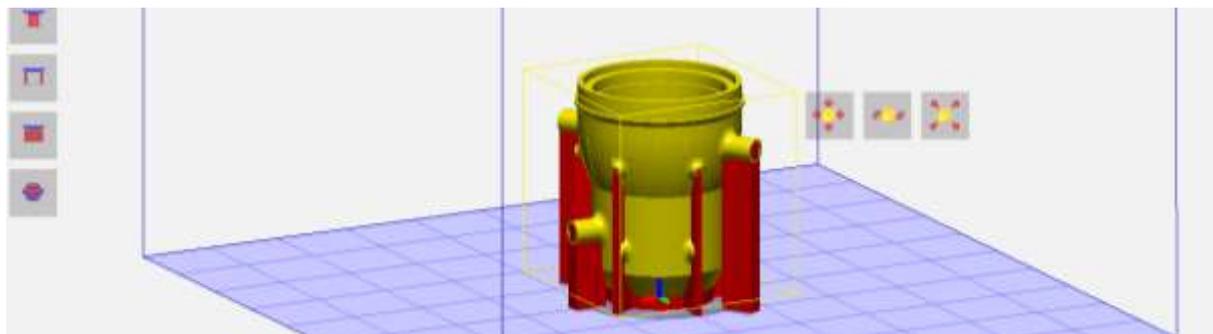
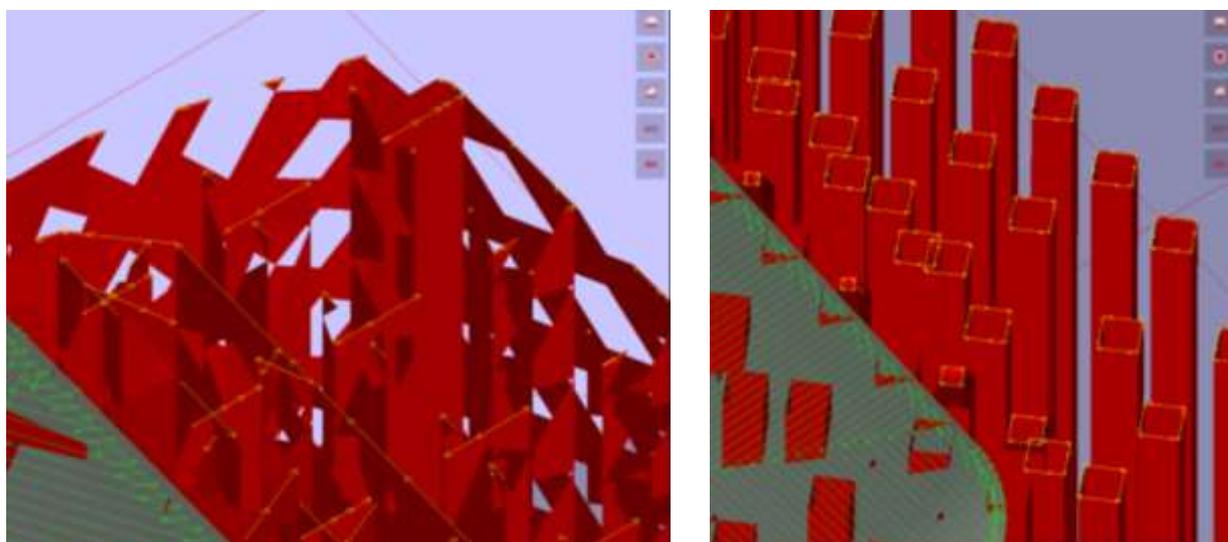


Рисунок 1.29 - Определение зон поддержек для тестового изделия в Glicer.

Настройка поддержек в Glicer заключается в выборе типа поддерживающей структуры. Объем поддерживающих структур может быть заполнен различными вариантами геометрий (Рисунок 1.30: а, б).



а)

б)

Рисунок 1.30 – Варианты заполнения объема поддержек в Glicer:

а) – блоки с перфорацией, б) – вертикальные колонны

Каждый тип поддерживающей структуры может быть индивидуально настроен с помощью редактирования параметров инженерного меню. Таким

образом возможно достичь максимальной эффективности поддержек для конкретной детали.

Для тестового изделия индивидуально были настроены области, требующие поддержек, внутри воздушных каналов (Рисунок 1.31 и Рисунок 1.32). Это позволяет упростить механическую пост-обработку и удаление поддержек после печати, а также уменьшает общее время печати.

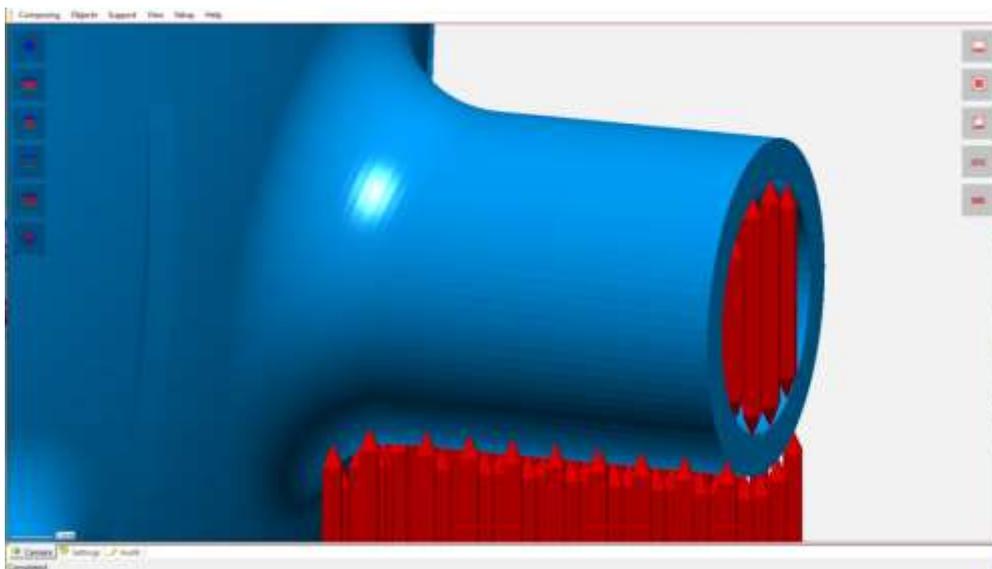


Рисунок 1.31 – Вариант заполнения объема поддержек колоннами с врезанием в тело изделия.

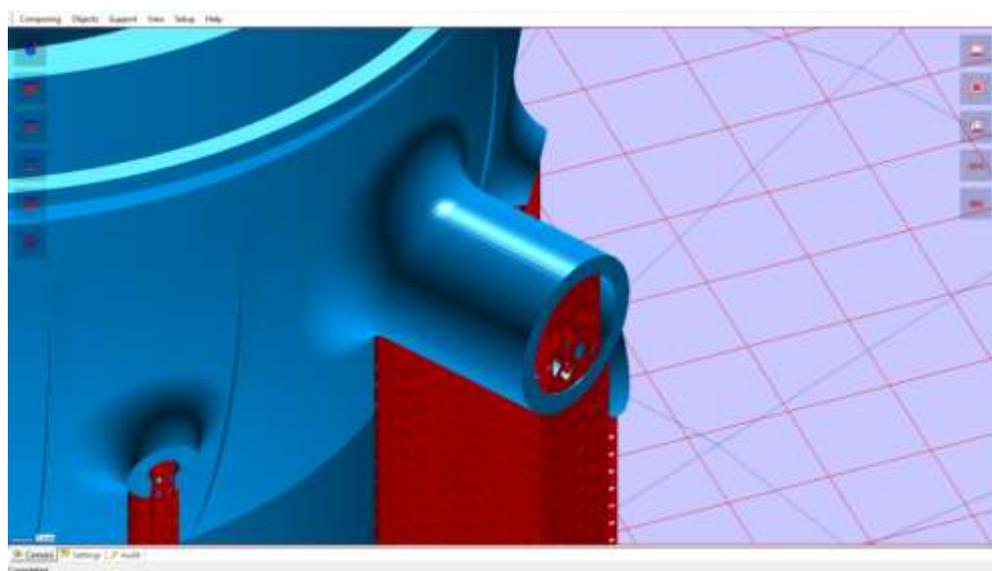


Рисунок 1.32 – Вариант заполнения объема поддержек перфорированными блоками.

Таковыми же инструментами создаются поддерживающие структуры и для других изделий в запуске (Рисунок 1.33).

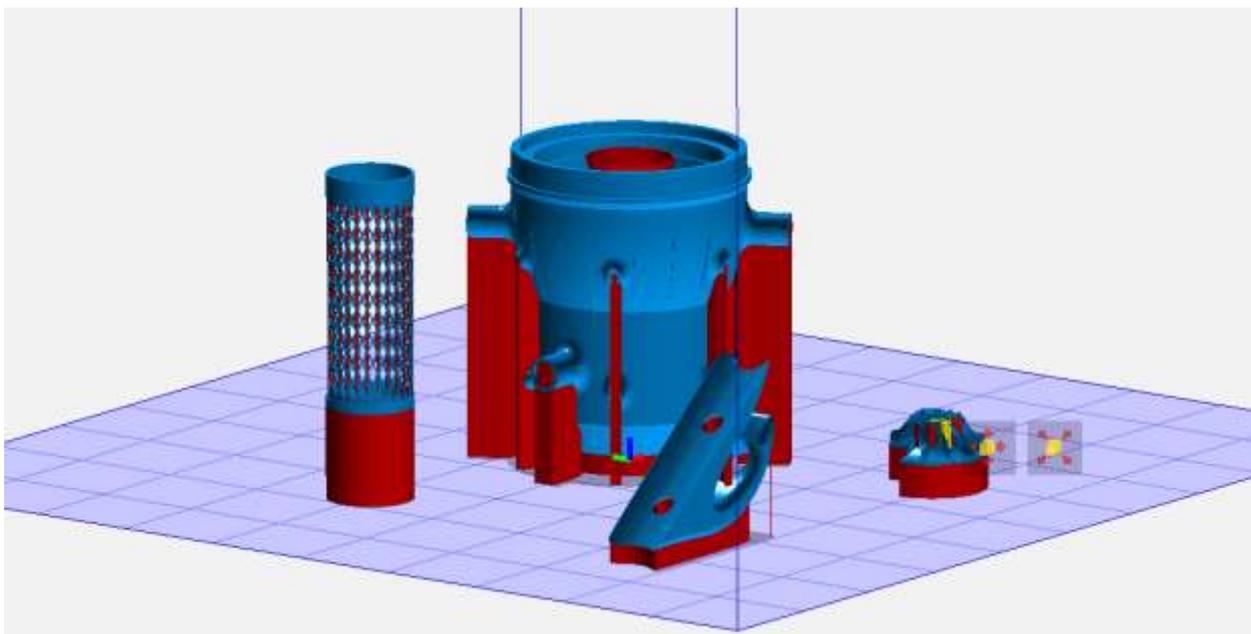


Рисунок 1.33 – Компоновочное решение с поддержками в Glicer.

1.2.2.4 Создание послойного представления об изделии

В Glicer создание послойного представления об изделии возможно с одновременной настройкой параметров сканирования, контуров и путей движения лазерного луча.

Процесс нарезания слоев и построение трасс сканирования управляется параметрами инженерного меню. Тщательная настройка параметров позволяет, в частности, оптимизировать холостой ход лазерного луча в рамках слоя, что позволяет существенно сократить время печати.

Отображение созданных слоев в Glicer возможно в качестве:

- трасс сканирования в виде векторов с возможностью отображения холостого хода (Рисунок 1.34);
- трасс сканирования в виде прямоугольников соответствующей физическому размеру рабочего элемента (в случае с технологией DMLS – пятна лазера) для контроля заполняемости (Рисунок 1.35).

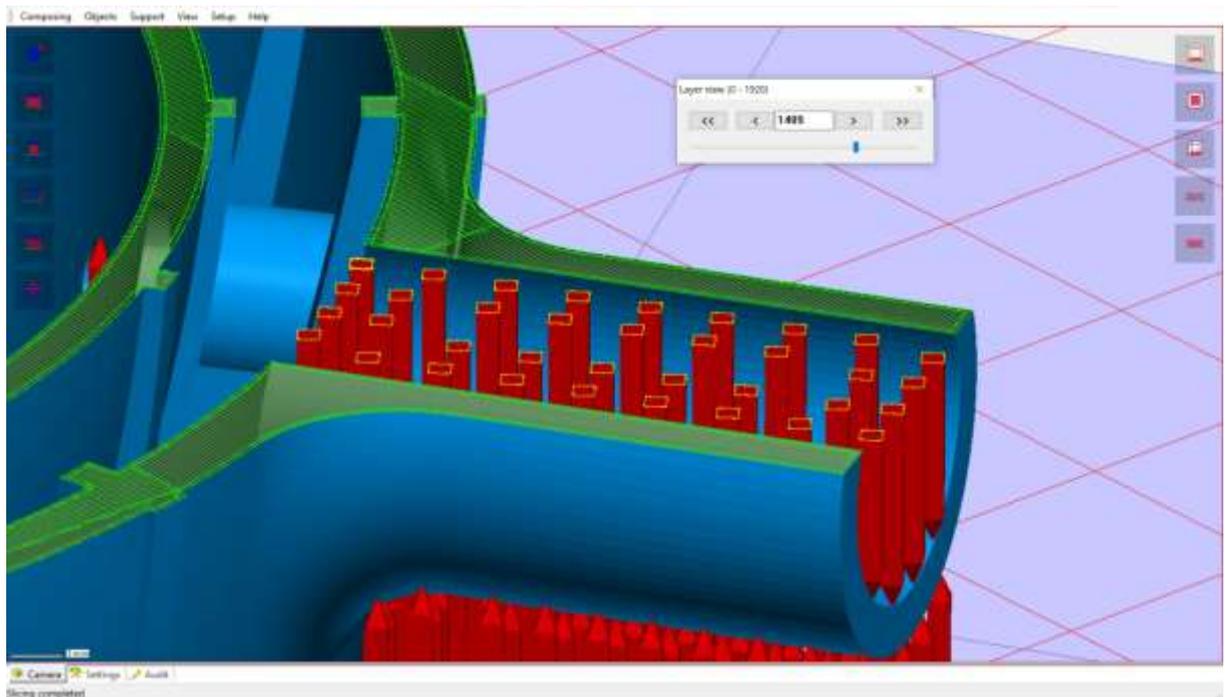


Рисунок 1.34 – Отображение путей-векторов движения лазерного луча.

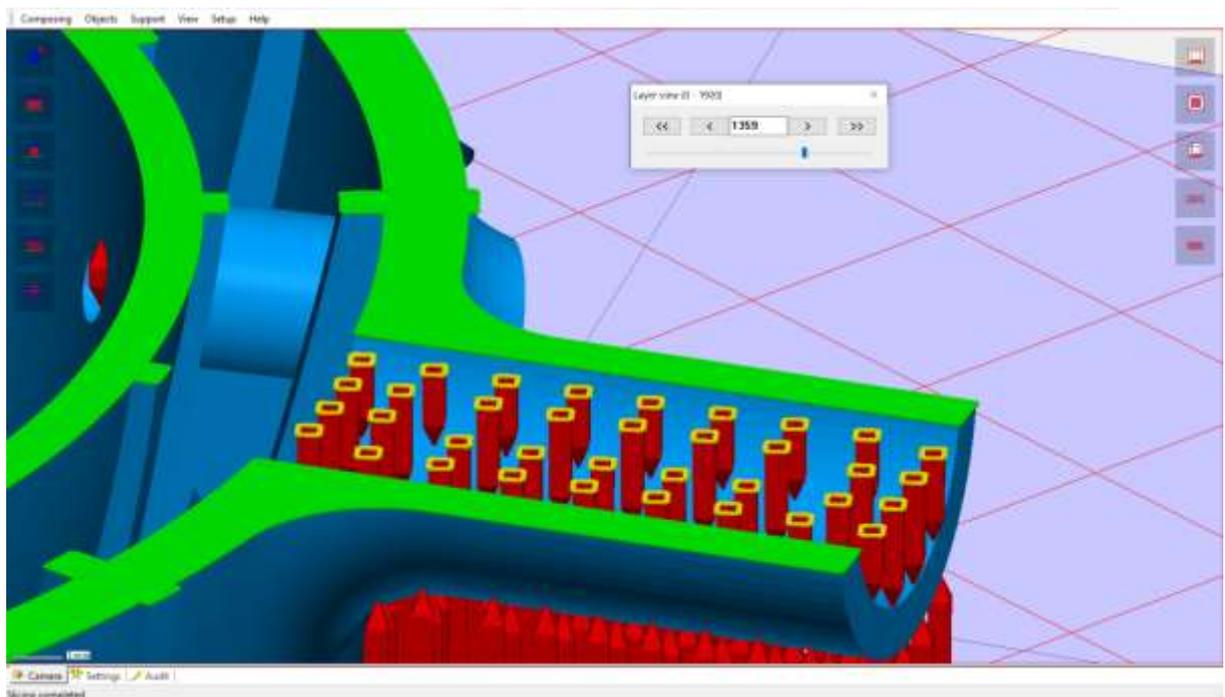


Рисунок 1.35 – Отображение заполняемости слоя лазерным пятном.

Благодаря возможности просмотра слоя в 3D (Рисунок 1.36), а также тому, что инструменты компоновки, проектирования поддержек и исправления ошибок геометрии доступны в одной информационной среде, инженер-технолог может проектировать запуск и вносить изменения на любом из этапов подготовки аддитивного производства без временных затрат и риска

возникновения ошибки при трансляции данных из одного программного комплекса в другой [71].

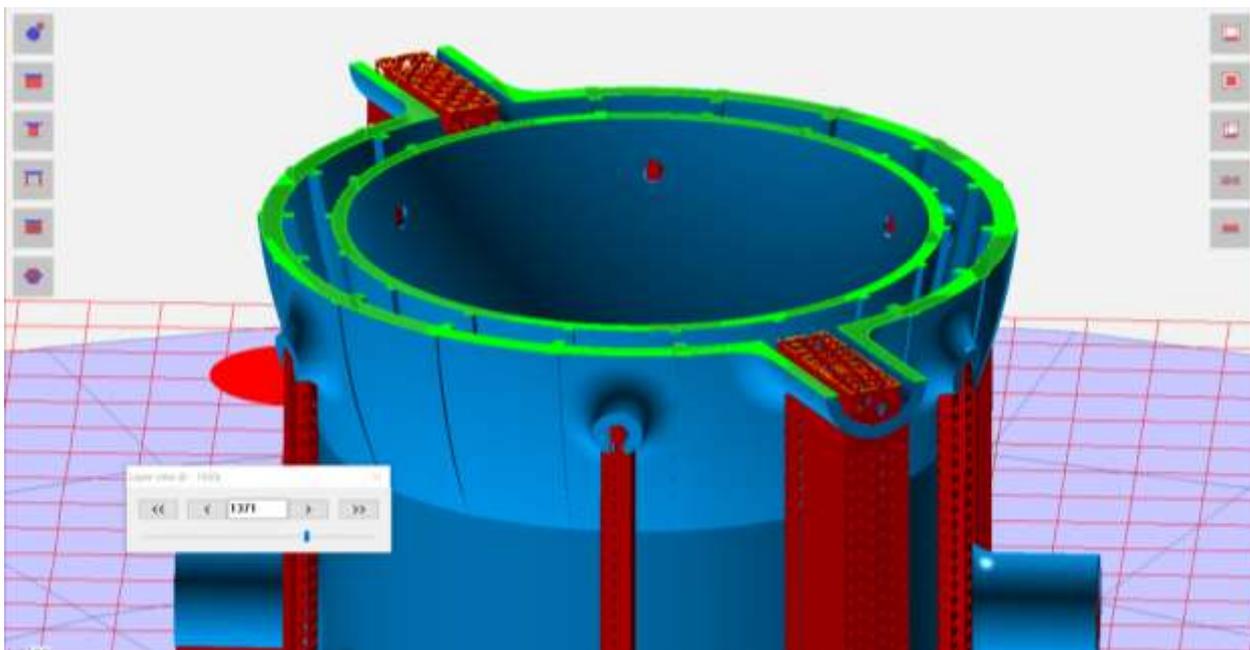


Рисунок 1.36 – Послойный просмотр электронной модели изделия в готовом запуске.

Гибкая настройка параметров процесса печати возможна на каждом из технологических этапов в инженерном меню Glicer. Преимущество заключается в возможности изменения для конкретных деталей, поддерживающих структур и параметров штриховок (Рисунок 1.37).

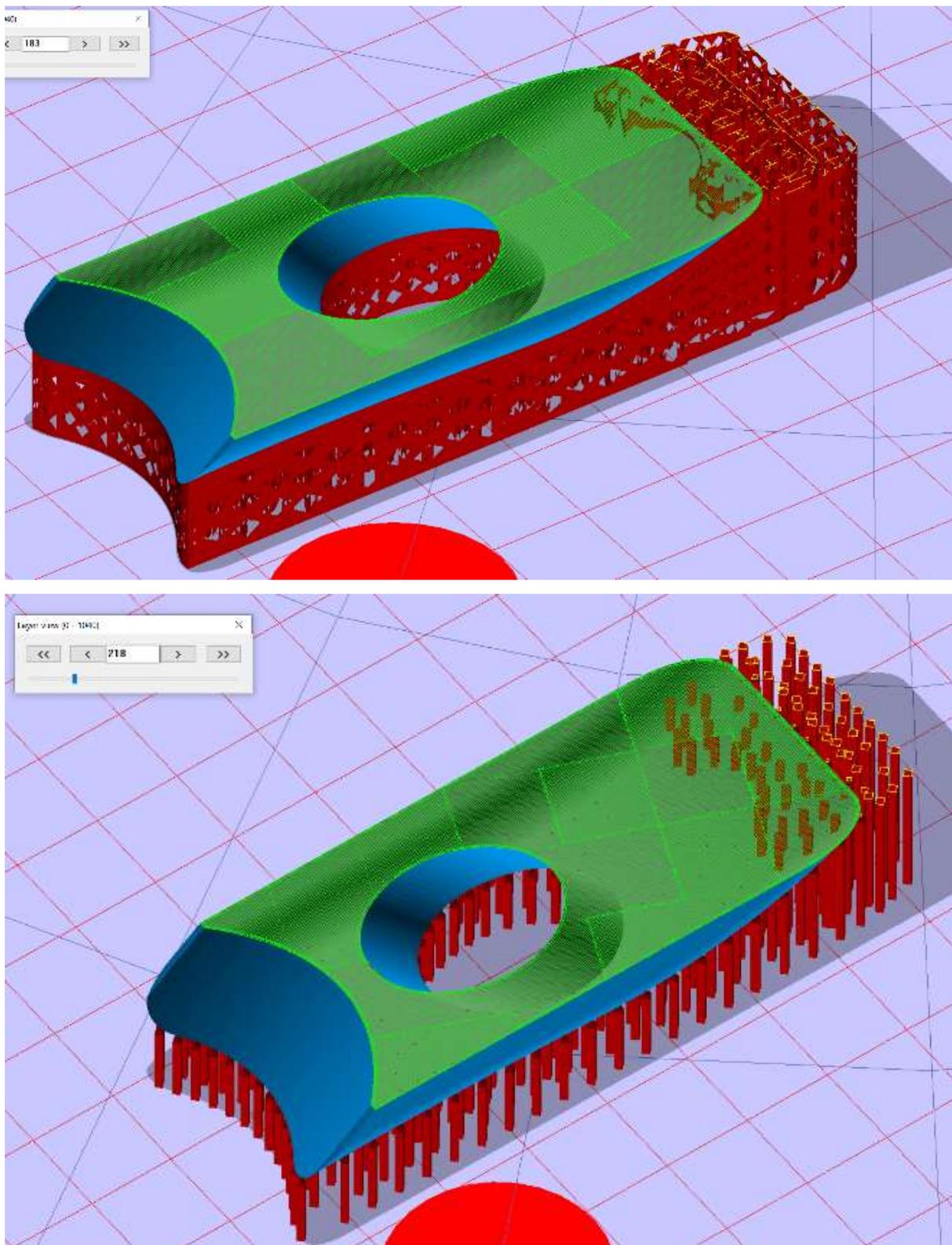


Рисунок 1.37 – Пример внесения изменений в параметры штриховки слоя и характер построения поддержек в уже готовом запуске в ПК ТПП «Glicer».

1.2.2.5 Экспорт в ПО установки DMLS

Дальнейший этап предполагает подготовку файла-задания запуска и передачу управляющей программы в ПО запуска конкретного 3D-принтера. Готовая информация о запуске из Glicer может быть адаптирована к любой современной установке DMLS (Рисунок 1.38).

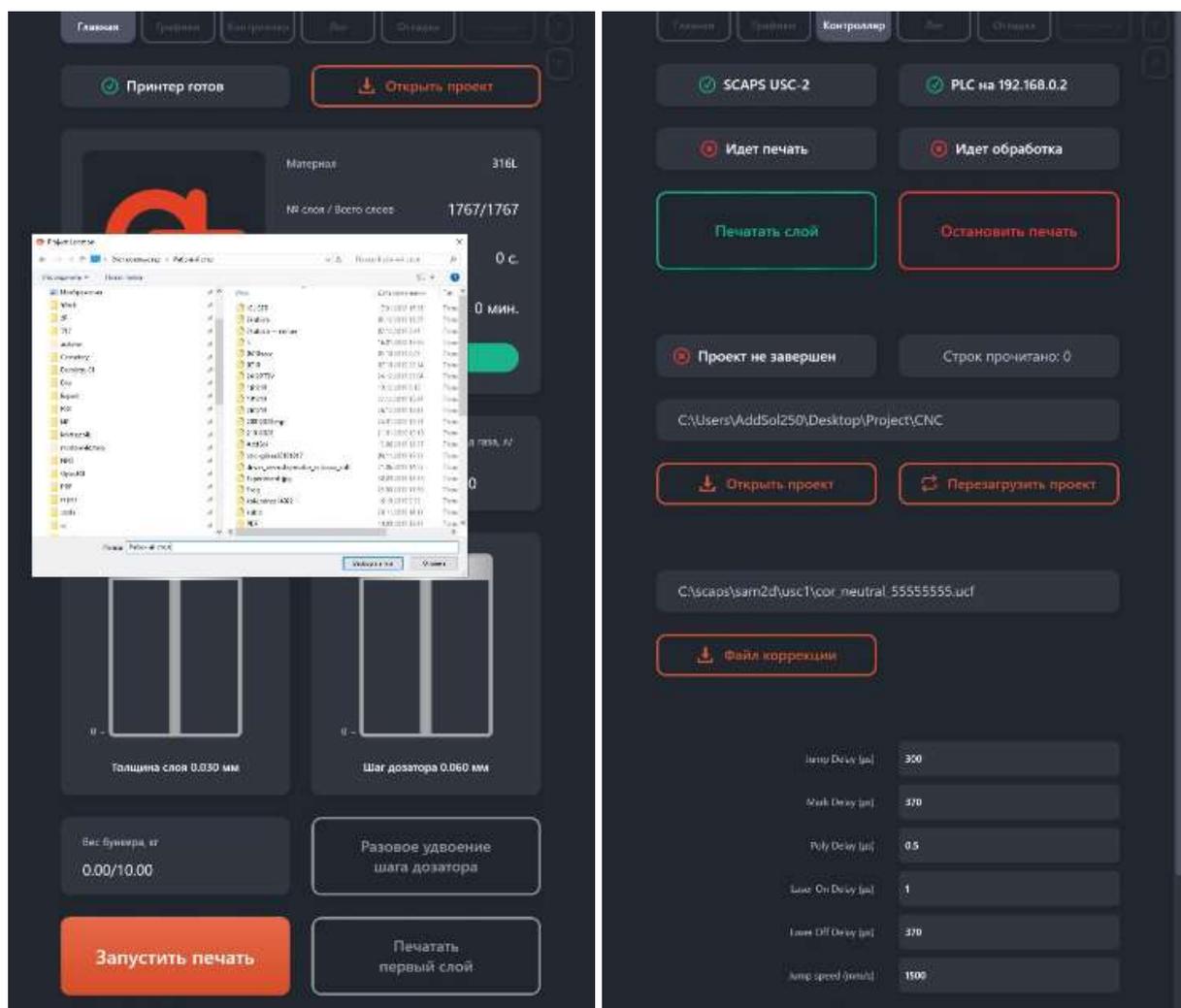


Рисунок 1.38 – Интерфейс установки Addsol D250, для которой подготовка производства осуществляется в ПК ТПП Glicer

1.2.2.6 Схема процесса технологической подготовки в Glicer

Процесс технологической подготовки производства в ПК ТПП “Glicer” (Рисунок 1.39):



Рисунок 1.39 – Схема процесса подготовки запуска печати в единой информационной среде Glicer.

1.2.3 Результаты сравнительного анализа систем технологической подготовки аддитивного производства

Для проведения сравнительного анализа программных продуктов, рассмотренных в разделах 1.1.2 и 1.1.3, были выявлены наиболее важные требования, предъявляемые технологом к ПО на этапе технологического проектирования. По результатам экспертных оценок в соответствии с требованиями технолога были сформулированы критерии оценки системы технологического проектирования (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Требования и критерии оценок систем технологического проектирования

№	Требования к технологическому проектированию	Критерий оценки
1	Возможность осуществления всех этапов технологической подготовки аддитивного производства в единой программной среде	Функционал инструментов технологического проектирования
2	Минимум времени на технологическую подготовку	Время подготовки
3	Оперативное изменение модели, возможность учета экономических показателей производства	Степень интеграции с системами CAD/PLM
4	Возможность анализа корректности выбранных технологических решений	Полнота анализа
5	Наглядное графическое представление результатов; практические рекомендации по внесению изменений в проект / управляющую программу	Полнота / качество представления результатов
6	Возможность сравнения альтернативных технологических решений и оптимизации результатов технологической подготовки	Решение задач оптимизации УП
7	Удобный интерфейс и доступная документация	Эргономика
8	Дополнительные критерии	Область применения системы для процесса ТПП
9		Требования к квалификации пользователя
10		Техническая поддержка
11		Защита от санкций

На основании перечисленных критериев разработана система оценки применимости систем технологической подготовки 3D-печати на этапе

технологического проектирования аддитивного производства. Система оценки включает 11 критериев из таблицы выше, по каждому из которых экспертным путем выставляется от 1 до 3 оценок, а для требований к функционалу программного комплекса – 7 оценок (всего 21 оценок по 11 критериям). Минимальная оценка – 0, максимальная – 5 баллов. Максимально возможное количество баллов, которое может набрать исследуемый программный комплекс – $5 \times 21 = 105$ баллов.

Результаты сравнительного анализа систем технологической подготовки электронных моделей изделия на этапе технологического проектирования аддитивного производства приведены в таблице 4 и на рисунке Рисунок 1.40.

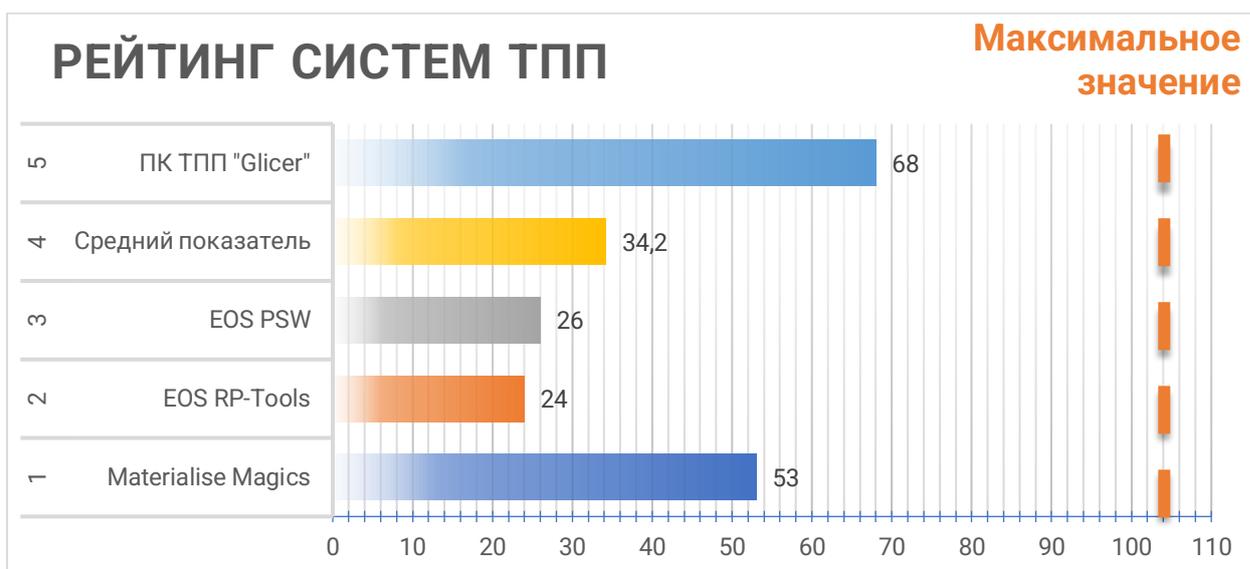


Рисунок 1.40 – результаты сравнительного анализа

Таблица 6 – Результаты сравнительного анализа

№	Критерий оценки	Оценка программного продукта по пятибальной системе (0 – возможность отсутствует, от 1-4 – неудовлетворительно-хорошо, 5 - отлично)				
		Программная экосистема EOS				Отечественное ПО
		Materialise Magics	RP-Tools	EOS PSW	Средний показатель	Glicer
1	Функционал инструментов технологического проектирования процессов АП	14	8	9		30
1.1	Лечение электронной модели	5	0	0	1,7	3
1.2	Создание компоновочного решения	5	0	0	1,7	3
1.3	Проектирования поддержек	4	0	0	1,3	4
1.4	Создание послойного представления	0	4	0	1,3	4
1.5	Генерация путей лазера	0	4	0	1,3	4
1.6	Настройка параметров прожига	0	0	4	1,3	5
1.7	Экспорт управляющей программы в установку АП	0	0	4	1,3	4
2	Время подготовки электронной модели	2	2	2	2	3
3	Степень интеграции с CAD и PLM	3	0	0	1	2

№	Критерий оценки	Оценка программного продукта по пятибальной системе (0 – возможность отсутствует, от 1-4 – неудовлетворительно-хорошо, 5 - отлично)				
		Программная экосистема EOS				Отечественное ПО
		Materialise Magics	RP-Tools	EOS PSW	Средний показатель	Glicer
4	Полнота анализа корректности ТПП	2	0	0	0,7	1
5	Полнота / качество результатов и рекомендаций	2 / 3	1 / 3	1 / 3	1,3 / 3	2 / 3
6	Решение задач оптимизации управляющих программ	3	0	0	1	2
7	Эргономика (удобство интерфейса / русский язык / русская документация)	5 / 3 / 2	2 / 0 / 0	3 / 0 / 0	3,3 / 1 / 0,7	3 / 5 / 5
8	Область применения	4	1	2	2,3	1
9	Требования к квалификации пользователя (высокие – 0 баллов, низкие – 5 баллов)	4	2	2	2,7	3
10	Наличие службы технической поддержки (в России / за рубежом)	1 / 5	1 / 4	1 / 4	1 / 4,3	5 / 1
11	Защита от санкций	0	0	0	0	5
	Суммарная оценка	53	24	26	34,2	68

1.2.4 Выводы по анализу систем технологического проектирования

Из результатов анализа, представленного в разделе 1.1.3 видно, что среднее значение суммарной оценки равняется 51,1 балла, что составляет менее половины (49%) от максимально возможного значения. В результате анализа у всех рассмотренных программных продуктов выявлен полный необходимый набор функциональных инструментов технологического проектирования, однако практически отсутствует возможность и инструменты анализа корректности принятых технологических решений, недостаточно развиты алгоритмы сравнения альтернативных технологических решений и оптимизации результатов технологического проектирования аддитивных процессов. Это делает особенно важным формирование подходов к экспресс-анализу технологической подготовки, проводимой оператором.

Одновременно с этим абсолютно все рассмотренные системы требуют кропотливой работы над технологической подготовкой запусков, что наряду со значительными затратами времени требует высокой квалификации специалиста, выполняющего подготовку. В условиях, когда мировой рынок аддитивных технологий испытывает взрывной рост [72], обеспечение участков АП необходимым количеством квалифицированных инженеров-технологов / конструкторов / исследователей выглядит сложно осуществимой задачей.

Проведенный анализ существующих систем технологического проектирования АП показал, что недостаток возможностей к быстрому анализу корректности технологических решений подтверждает важность новых специализированных программных средств для точной и быстрой оценки решения инженерных задач на этапе технологической подготовки аддитивного производства. Практические предпосылки создания автоматизированной системы экспресс-анализа эффективности технологической подготовки изделий рассмотрены в следующем разделе.

1.3 Предпосылки автоматизации процедур технологической подготовки аддитивного производства

Дальнейшее развитие технологий аддитивного производства и широкое распространение метода лазерной плавки металлопорошковых композиций в высокопроизводительных отраслях требует обеспечения качества изготавливаемых изделий. Современная редакция стандарта ISO 9000 (ГОСТ Р ИСО 9000-2015) [73] определяет качество изделия не только как степень соответствия совокупности его присущих характеристик установленным требованиям, но также воспринимаемую ценность и выгоду для потребителя. Последний пункт позволяет увязать технические требования, предъявляемые непосредственно к объекту производства, с требованиями экономической эффективности процесса создания изделия.

С точки зрения производства это обычно означает совокупность корректно и экономически эффективно решенных задач технологического проектирования процесса производства изделия в соответствии с техническими требованиями, указанными в документации к изделию (техническое задание, конструкторские и технологические документы). В приложении к аддитивному производству вопрос обеспечения качества – сложная мультидисциплинарная задача, требующая совместной работы нескольких специалистов: конструктора АТ, инженера-технолога и инженера по применению АТ. Для нахождения оптимального решения важно учитывать ряд технологических, конструктивных и экономических параметров, определяющих облик изделия.

Структурно процесс аддитивного производства изделий можно представить в виде структурной топологической модели (Рисунок 1.41), описывающей взаимосвязи между параметрами процесса аддитивного производства, свойствами конечного синтезированного изделия и множеством операторов, которые определяют процесс выращивания.

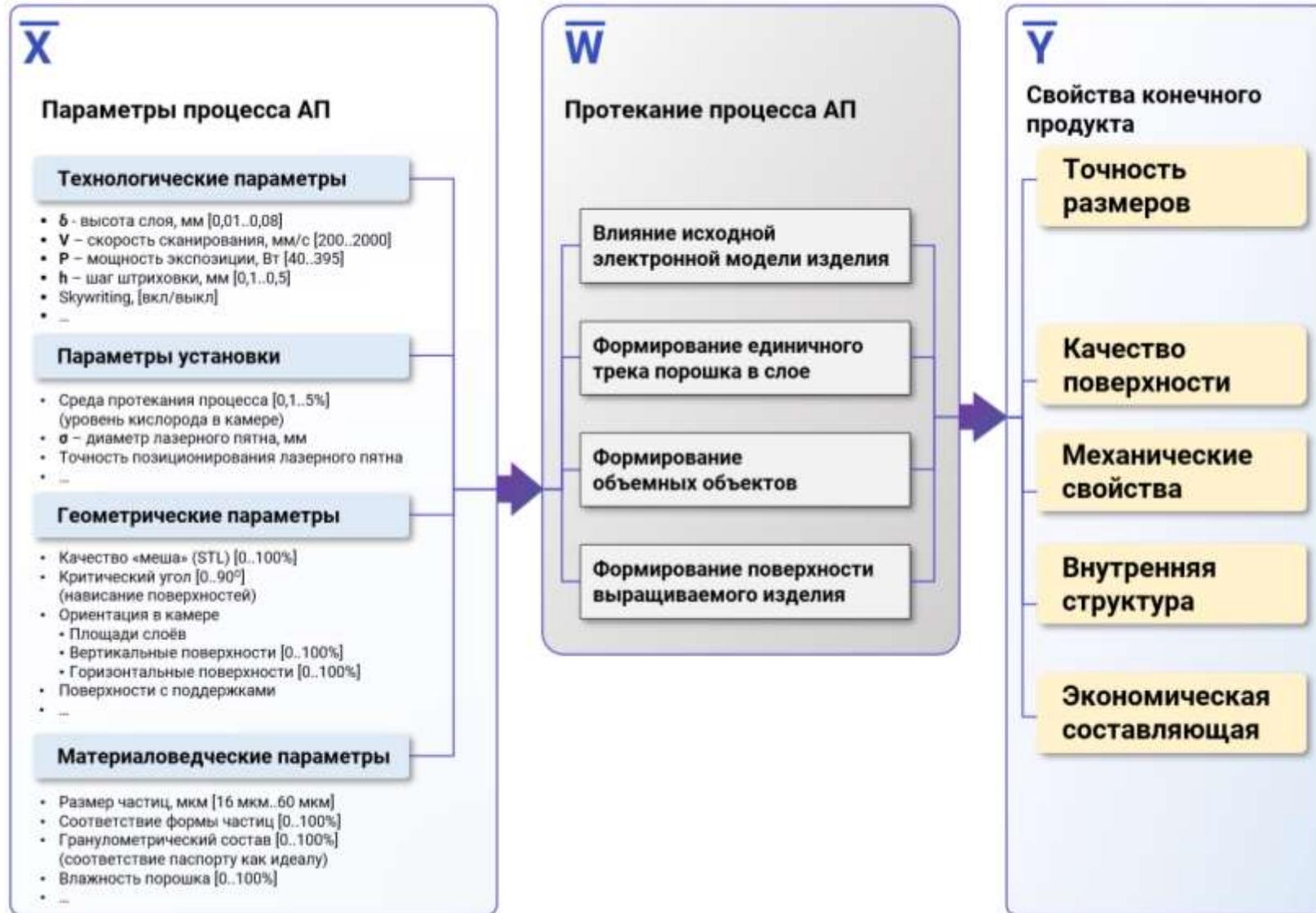


Рисунок 1.41 – Структурная топологическая модель процесса аддитивного производства изделий

В предлагаемой структурной модели:

- \bar{X} – вектор параметров, определяемых на стадии технологического проектирования процесса аддитивного производства;
- \bar{Y} – вектор результирующих свойств изделия, изготовленного аддитивно;
- \bar{W} – вектор операторов, определяющих характер протекания процесса аддитивного производства;

Далее в данном разделе эти множества параметров, критериев и операторов будут рассмотрены более подробно. Также будут представлены предпосылки для автоматизации отдельных процедур технологического проектирования аддитивного производства методом СЛП.

1.3.1 Стадии процесса технологического проектирования

Процесс технологического проектирования аддитивного производства (ТПАП) представляет собой многовариантную и потому достаточно трудоемкую задачу, которая в то же время должна быть строго формализована для достижения высоких требований, предъявляемых к продукции в высокопроизводительных отраслях промышленности. Процедурная декомпозиция процесса технологической подготовки аддитивного производства изделий для технологии селективной лазерной плавки приведена ниже (Рисунок 1.42).

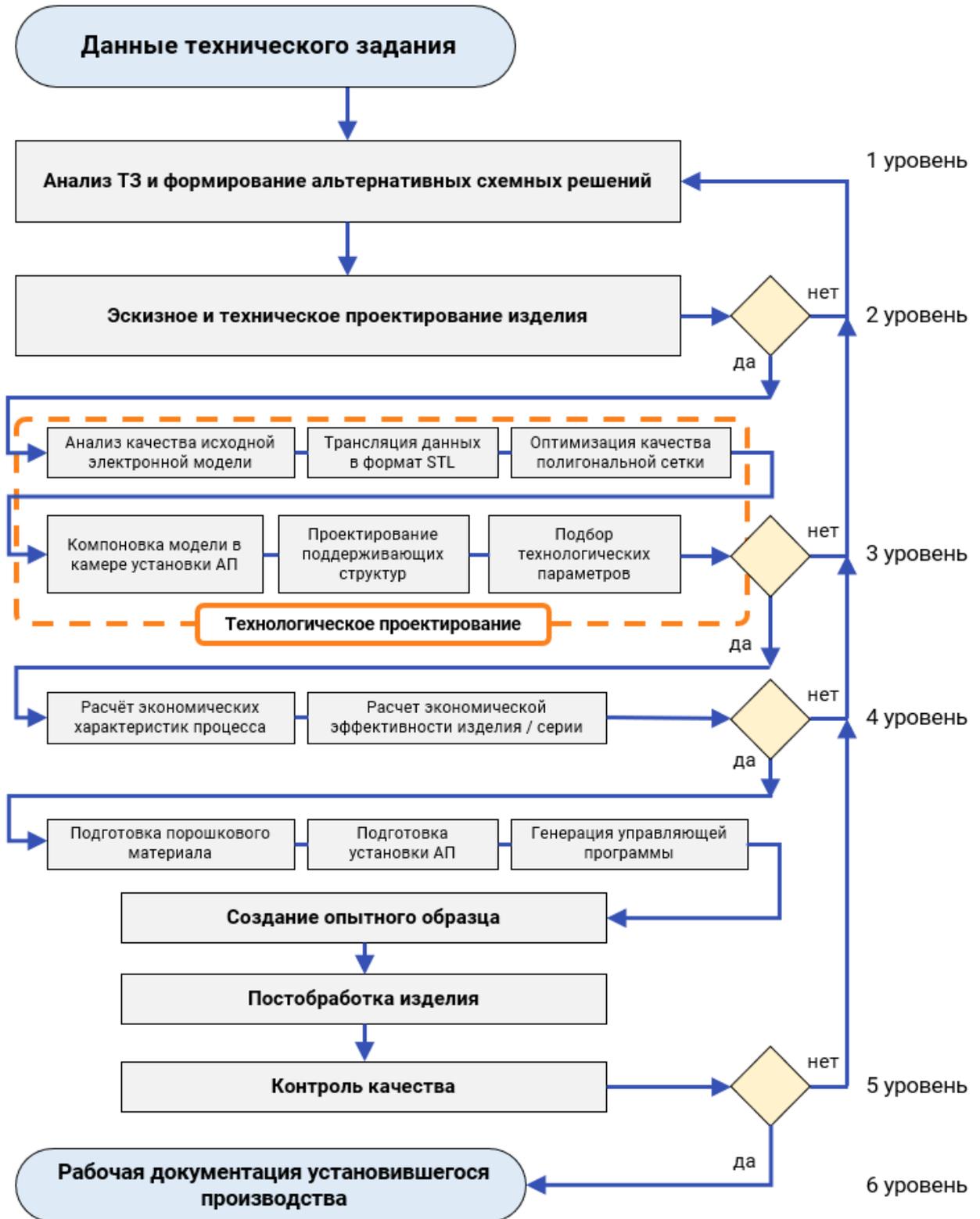


Рисунок 1.42 – Схема ОКТР по аддитивному производству

При разработке теоретических основ метода автоматизации технологической подготовки изделия к аддитивному производству одной из основным проблем является формальное представление компонентов

технологического проектирования для математического моделирования с учетом многовариантности и оптимизации большого количества связей между проектными параметрами, согласование которых обычно осуществляется инженером-технологом на интуитивном уровне с учетом предыдущего опыта. Как следствие, результат анализа, проводимого на этапе опытных технологических работ нестабилен в виду ряда причин:

- Большое количества вариантов изделий, которые приходится анализировать;
- Отсутствие обратной связи от системы ТПАП и риск ошибки вследствие т.н. «человеческого фактора»;
- Скрытые дефекты электронных моделей [74];

Тем самым, для большинства сложных изделий процесс технологической подготовки становится нетривиальной задачей, что приводит к увеличению временных затрат и ошибкам проектирования. Это в свою очередь неприемлемо для этапа ОКР, от которого в большой степени зависит конечное качество как опытных, так и серийных изделий, производимых аддитивно.

1.3.1.1 Состав опытных технологических работ и их место в общей структуре изготовления изделий аддитивным методом

В соответствии с предлагаемой структурной моделью и в силу многовариантности задачи технологической подготовки изменение одного из множества параметров, относящегося к управляющей программе, установке СЛП, геометрии изделия или материалу (МПК), приводит к изменению в протекании процесса выращивания и изменению результата – меняются показатели качества выращиваемого изделия. Так, в частности, любая комбинация используемого материала и установки селективной лазерной плавки приводит к необходимости заново проводить цикл опытных технологических работ по поиску эффективного набора параметров

управляющей программы, позволяющего достичь требуемого качества изделий и заготовок.

Для того, чтобы из большого диапазона возможных технологических параметров определить оптимальный с точки зрения результирующих показателей качества, в ходе ОТР замораживается большое количество параметров процесса СЛП. Зачастую фиксируются:

- Параметры, связанные с установкой СЛП: ОТР проводятся в одной и той же среде протекания процесса, с зафиксированными диаметром лазерного пятна и характеристиками позиционирования лазера;
- Параметры, связанные с материалом: испытания проводятся для одной партии МПК, обладающей сходными свойствами;
- Параметры, связанные с геометрией изделия: для эксперимента используются образцы одинаковой геометрии (зачастую, примитивной);

С другой стороны, технологические параметры, которые формируют управляющую программу, варьируются в пределах допустимого диапазона параметров для конкретной установки СЛП. Зачастую варьируют параметр мощности лазерного излучения и скорости перемещения лазерного пятна (скорости сканирования) [13]. Эти параметры в совокупности формируют энергетический вклад – количество энергии, которое лазер передаёт материалу в процессе селективной плавки. Рассчитывается он по формуле:

$$E_v = \frac{P}{V * t * (2w_0 - y) \left(1 - \left(\frac{2w_0 - 2y}{S - 2y}\right)\right)},$$

где:

P – мощность лазерного излучения, Вт;

V – скорость перемещения лазерного пятна, мм/с;

t – высота слоя, мм;

w_0 – радиус лазерного пятна, мм;

y – перехлест, мм;

S – ширина печатаемого сегмента детали, мм.

Оптимизация энергозатрат имеет ключевое значение в селективной лазерной плавке, поскольку она значительно влияет на качество конечного продукта. Аргументы функции энергозатрат (мощность лазера, скорость сканирования, расстояние между траекториями сканирования и высота слоя) вместе определяют, сколько энергии передается материалу, и, следовательно, влияют на поведение плавления и затвердевания порошка.

Балансировка этих параметров для нахождения оптимального энергозатрат является сложной задачей, и оптимальные значения могут варьироваться в зависимости от конкретной машины, материала и требований к детали. Обычно в ходе ОТР разрабатывается окно процесса или карта процесса, показывающая диапазон параметров, которые приводят к получению деталей требуемого качества. Это делается путем печати образцов с различными настройками параметров и оценки их качества (например, путем изучения микроструктуры и измерения таких свойств, как плотность или механическая прочность). Все больше используются методы машинного обучения и другие вычислительные методы для ускорения этого процесса оптимизации [75].

Состав ОТР представляет из себя воронку последовательных экспериментов по поиску коридора оптимальных параметров (Рисунок 1.43). С каждым новым тестом увеличивается сложность и стоимость эксперимента: от исследования единичных треков без использования материала вплоть до печати объемных объектов и образцов-калибраторов для тонкой настройки процесса печати. С другой стороны, с каждым новым шагом сужается окно варьируемых параметров и количество образцов для анализа.

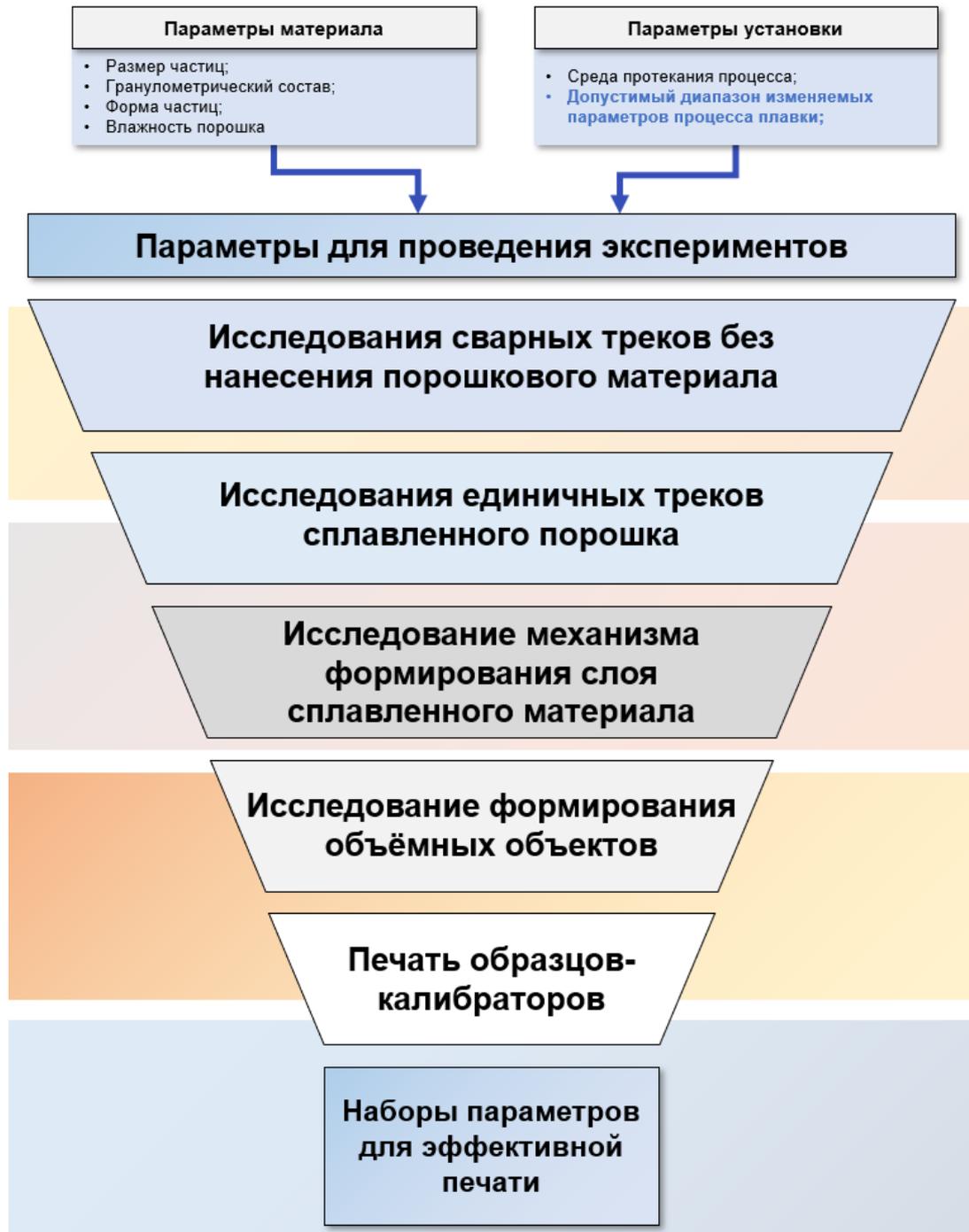


Рисунок 1.43 – Воронка опытных технологических работ

Результаты этих экспериментов не только предлагают способ тонкой настройки процесса аддитивного производства, но и способствуют более широкому научному пониманию взаимодействия лазера и материала в аддитивном производстве. Используя такой методический подход, производители могут обеспечить надежность, воспроизводимость и эффективность своих операций аддитивного производства.

1.3.1.2 Процедурная декомпозиция

В общей схеме работ ОКТР АП воронка подбора технологических параметров занимает ключевое место (Рисунок 1.44).

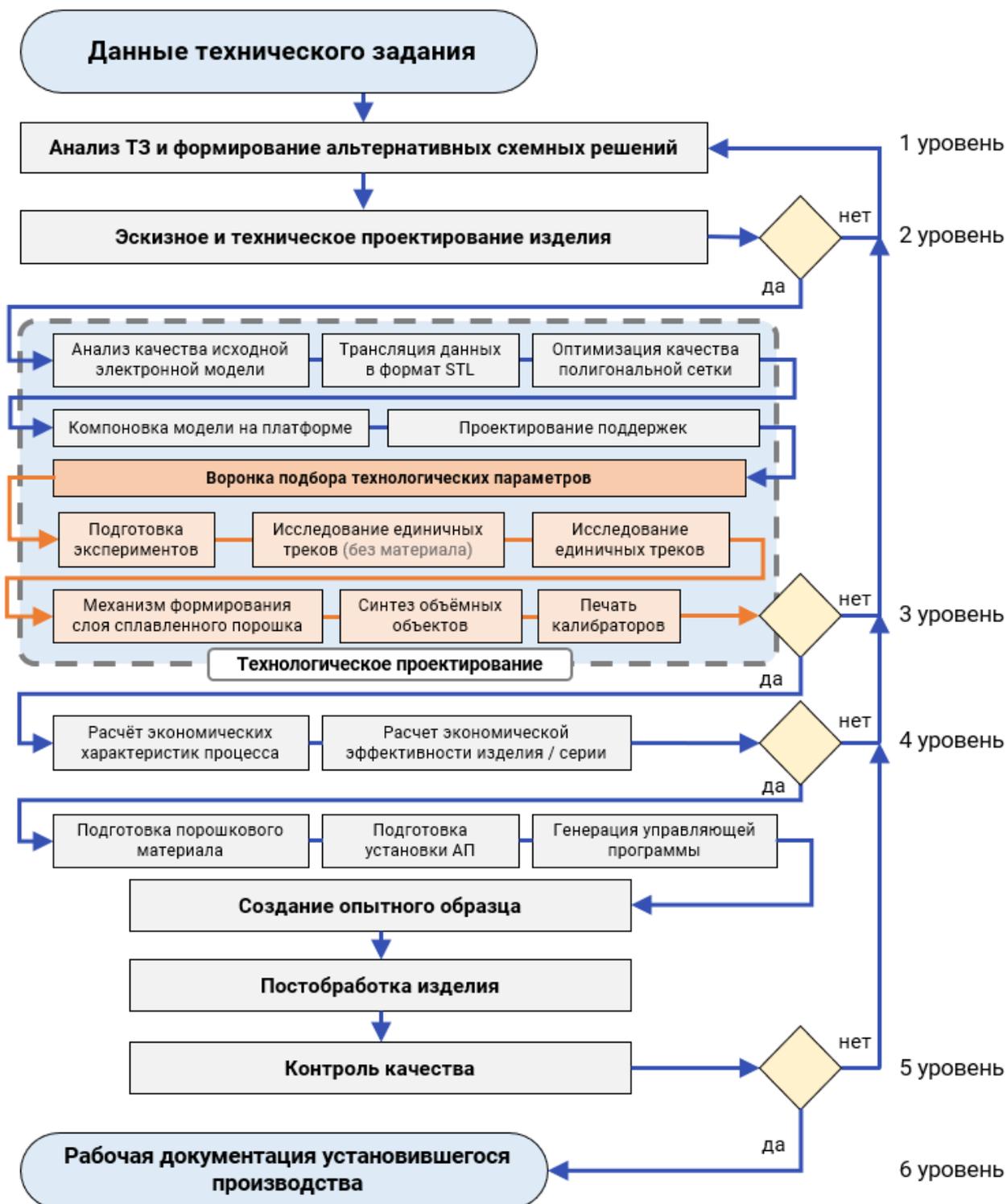


Рисунок 1.44 – Процедурная декомпозиция ОКТР аддитивного производства

Как уже было описано, воронка экспериментального подбора технологических параметров процесса СЛП – на данный момент один из немногих системных подходов, позволяющий получить оптимальный набор (или малое количество наборов) параметров. Подготовка, проведение и анализ результатов такого исследования не только занимают много времени, но также требуют высокого уровня квалификации для обеспечения надежных результатов. Высокая сложность задачи представляет собой серьезную проблему для инженеров-технологов, что затрудняет достижение последовательных и оптимальных результатов. Эта проблема усугубляется отсутствием стандартизированных и формализованных процедур для проведения и анализа этих экспериментов, что приводит к неэффективности и возможным ошибкам в процессе.

Именно поэтому в настоящий момент наибольшую актуальность приобретает задача разработки такого метода автоматизации технологической подготовки, в которой были бы максимально регламентированы и формализованы действия, сводящие многовариантную задачу, стоящую перед инженером-технологом, к стабильному результату. Применение средств экспресс-анализа на этапе ТПАП должно в первом приближении обеспечить высокое качество процесса селективной лазерной плавки и, как следствие, соответствие синтезируемого изделия требованиям, предъявляемым к точности размеров и качеству поверхности.

Таким образом, внедрение практики проведения экспресс-анализа для процедур этапа технологического проектирования является важной и актуальной задачей, решение которой требует разработки новых методов и подходов к автоматизации технологических задач.

1.3.2 Влияние различных параметров процесса аддитивного производства на качество выращиваемого изделия

В данном разделе рассмотрены параметры технологического процесса селективной лазерной плавки, которые в той или иной форме могут быть изменены инженером-технологом и оператором оборудования аддитивного производства до начала процесса синтеза. Совокупность взаимосвязей этих параметров влияет на протекание процесса СЛП и, как следствие, на различные критерии качества, рассмотренные ранее.

Эти параметры можно разделить на:

- Параметры процесса, связанные с характеристиками материала;
- Параметры, определяющиеся управляющей программой;
- Параметры, связанные с характеристиками установки;
- Параметры, связанные с геометрией выращиваемого изделия.

1.3.2.1 Параметры процесса СЛП, связанные с материалом

Для процесса селективной лазерной плавки используются материалы из металлических сплавов в виде порошковой композиции определенного гранулометрического состава и свойств. Для СЛП технологии существует множество металлопорошковых материалов с определенными механическими свойствами, такими как прочность на растяжение, твердость, удлинение и др. Способность процесса СЛП производить изделия из различных металлов, таких как титан, алюминий и медь, делает его выгодным для ряда отраслей промышленности, особенно аэрокосмической и автомобильной [76, 77].

Основными материалами для трехмерной печати металлами являются алюминиевые сплавы [78–82], никелевые сплавы [83–86], титановые сплавы [87–90], кобальтовые сплавы [91, 92], инструментальная и нержавеющая сталь [93–100], медные сплавы и другие различные металлические материалы

(Таблица 7). Эти металлы используются в распыленном состоянии в качестве исходного сырья в процессах 3D печати.

Таблица 7 – Марки порошковых материалов для селективной лазерной плавки

Алюминиевые сплавы	Никелевые сплавы	Титановые сплавы	Кобальтовые сплавы	Стальные материалы	Медные сплавы
AlSi12, AlSi7Mg0.6, AlSi9Cu3, AlSi10Mg	IN625 (NiCr22Mo9Nb) [101], IN718, IN939	Ti6Al4V, Ti GD. II	CoCr28Mo6	316L, PH-1, 17-4PH, Invar 36 ®	CuSn10

Ограничения при выборе металлического материала для лазерной плавки обусловлены рядом факторов. Когда речь идет о плавлении, металлы, как правило, должны быть свариваемыми и поддаваться литью, чтобы успешно обрабатываться в процессе трехмерной печати. Ванна расплава, образованная лазером на слое порошка, имеет размер порядка 70-120 мкм [102]. Эта локальная горячая зона, находится в непосредственном контакте с большой и более холодной зоной несплавленного порошка, что приводит к появлению больших термических градиентов, вызывающих значительные тепловые остаточные напряжения и неравновесные микроструктуры. Для порошкообразного сырья частицы предпочтительно должны быть сферическими с определенным распределением по размерам

Большинство этих металлических порошков, как правило, производится с использованием хорошо зарекомендовавших себя методов, таких как распыление в воде, газе или плазме. В настоящее время разрабатываются или уже используются для экономически эффективного производства металлических порошков малозатратные процессы, например, электролитические методы, металлотермические процессы (например, процесс TIRO) и гидрид-дегидридный процесс, особенно в области титана и титановых сплавов [103].

Различные методы производства порошка приводят к различным характеристикам порошка, таким как морфология частиц, размер частиц и химический состав, каждая из которых может быть важна для АМ. В принципе, процесс АМ требует хороших свойств подачи для достижения однородного распределения порошка, а также хороших упаковочных характеристик для формирования порошкового слоя с высокой относительной плотностью. Эти характеристики порошка влияют на свойства сыпучего материала изготовленного компонента, например, детали плотность и пористость.

Самым простым и недорогим процессом распыления является распыление в воде. В этом процессе жидкий металл распыляется струями воды при свободном падении через камеру распыления. Благодаря высокой скорости охлаждения 24 частицы размером от нескольких мкм до 500 мкм принимают неправильную форму при затвердевании [104].

Порошковый материал с частицами нерегулярной, асимметричной формы не позволяет достичь высокой насыпной плотности, что в процессе плавки приводит к образованию несплошностей. Таким образом, эти виды частиц не являются предпочтительными для использования в процессе СЛП [105]. По сравнению с газовыми атомизированными порошками, при распылении в воде образуются частицы порошка с более высоким содержанием кислорода [106]. Что касается применения полученного металлического порошка при аддитивном производстве, то поглощение кислорода и образование окислителей являются нежелательными эффектами, так как они не только влияют на поведение порошка, но и на формирование ванны расплава и, следовательно, изменяют состав сыпучего материала и механические свойства деталей [107].

Для металлопорошковой композиции, используемой в процессе плавки, возможно выделить ряд свойств, влияющих в совокупности с другими параметрами на процесс СЛП и качество изделия:

- Размер частиц металлопорошковой композиции;
- Соответствие формы («сферичность»);
- Фракция материала / гранулометрический состав;
- Влажность порошка;
- Собственные свойства материала:
 - Поверхностное натяжение;
 - Вязкость;
 - Гигроскопичность;
 - Термокапиллярные эффекты;
 - Испаряемость при нагреве;
 - Окисляемость;
 - Плотность;
 - Теплопроводность.

Эти и другие параметры (Таблица 8 – Параметры процесса СЛП, относящиеся к материалу) обеспечиваются производителем порошкового материала, а также соответствующими условиями хранения и эксплуатации непосредственно на участке аддитивного производства.

Таблица 8 – Параметры процесса СЛП, относящиеся к материалу

Параметр	Описание влияния на процесс плавки
Размер частиц металлопорошковой композиции	Размер частиц металлического порошка может влиять на текучесть порошка, плотность упаковки, поглощение энергии лазера, итоговую постобработку и механические свойства детали.
Соответствие формы («сферичность»);	Форма частиц, часто описываемая в терминах их "сферичности", может влиять на то, как порошок течет и упаковывается, что, в свою очередь, влияет на плотность напечатанной детали и гладкость напечатанных слоев.

Фракция материала / гранулометрический состав	Этот параметр относится к диапазону размеров частиц, присутствующих в порошке, что может влиять на текучесть порошка и его упаковку. Большой диапазон размеров может привести к более высокой плотности упаковки, но может также повлиять на текучесть.
Влажность порошка	Наличие влаги в порошке может привести к дефектам, таким как пористость в напечатанной детали. Высокая влажность может ускорить окисление и деградацию порошкового материала.
Поверхностное натяжение	Это свойство влияет на то, как ведет себя расплавленный металл в процессе печати. Высокое поверхностное натяжение может привести к хорошему слиянию расплавленных частиц, но может также вызвать образование шариков или брызг.
Вязкость	Вязкость расплавленного металла может влиять на распространение расплавленного металла и, следовательно, на итоговые размеры детали и качество поверхности.
Гигроскопичность	Если порошок гигроскопичен, он может поглощать влагу из воздуха, что может привести к дефектам в напечатанной детали и деградации порошка.
Термокапиллярные эффекты	Эти эффекты, вызванные градиентами температуры в расплавленном металле, могут влиять на распространение расплава и форму напечатанной детали.
Окисляемость	Некоторые элементы в сплаве могут испаряться при высоких температурах, используемых в процессе СЛП. Это может привести к изменению химического состава сплава и к дефектам в напечатанной детали
Плотность	Плотность порошка влияет на его упаковку (размещение в объеме платформы) и на плотность напечатанной детали. Более высокая плотность порошка обычно приводит к более высокой плотности напечатанной детали.
Теплопроводность	Теплопроводность влияет на то, как быстро тепло распространяется в порошке и детали во время процесса СЛП. Это может влиять на скорость плавления и охлаждения, а также на образование дефектов, таких как трещины от теплового напряжения.

1.3.2.2 Параметры и управляющая программа процесса СЛП

Параметры, формирующие управляющую программу (G-код) процесса селективной лазерной плавки могут быть охарактеризованы набором атрибутов, которые в совокупности с другими факторами влияют на процесс СЛП и качество конечного продукта:

- Мощность лазерного излучения;
- Скорость сканирования;
- Расстояние штриховки;
- Толщина слоя;
- Стратегия сканирования;

Мощность лазера определяет количество тепла, которое может быть передано на порошковую подложку. Слишком низкая мощность может привести к неполному плавлению, что вызывает дефекты, такие как недостаток сращивания. С другой стороны, слишком высокая мощность может вызвать чрезмерное плавление или даже испарение материала, что приводит к пористости или другим дефектам.

Скорость, с которой лазерное пятно перемещается по поверхности порошкового материала, также влияет на количество передаваемой энергии. Более высокие скорости означают меньшее время для поглощения энергии, что потенциально может привести к недостаточному сплавлению порошка. Наоборот, медленные скорости могут привести к переплавлению или чрезмерному накоплению тепла.

Расстояние между соседними сканированными треками (траекториями сканирования) также один из важных факторов, влияющих на энергозатраты. Меньшее расстояние между треками означает большее их перекрытие, что может быть полезно для достижения хорошего сплавления между материалами, но также может привести к чрезмерному накоплению тепла.

Толщина слоя порошка может влиять на глубину проникновения лазера и, следовательно, на поглощение энергии. Более толстые слои могут требовать больше энергии для обеспечения полного сплавления порошкового материала без пор и дефектов.

1.3.2.3 Параметры геометрии

Ещё одной группой факторов, влияющих на протекание процесса СЛП, являются параметры, связанные с геометрией детали. Они в совокупности с другими параметрами оказывают решающее влияние на определение успешности построения, качества синтезированного продукта и процесс его постобработки. Вот некоторые из ключевых параметров геометрии:

- Допуск;
- Угол нависания поверхности модели;
- Свойства полигонального меша (STL-сетки);
- Ориентация изделия в камере:
 - Площади слоёв;
 - Вертикально ориентированные поверхности;
 - Горизонтально ориентированные поверхности;
 - Ориентация детали относительно движения рекотера;

Допуск – это допустимое отклонение размеров детали, на которое могут влиять такие факторы, как толщина слоя, параметры лазера и свойства материала. В аддитивном производстве достижение строгих допусков может быть затруднено из-за таких проблем, как термическая деформация и остаточные напряжения.

Нависания — это поверхности детали, наклоненные по отношению к рабочей платформе. Если угол свеса слишком крутой, могут потребоваться опорные конструкции для предотвращения деформации или обрушения во время сборки. Необходимость поддержки также зависит от материала и параметров процесса.

Качество файла STL, используемого для представления геометрии детали в виде треугольной сетки, может повлиять на точность сборки. Такие проблемы, как отверстия в сетке или другие ошибки меша, могут привести к дефектам детали.

Ориентация детали в камере установки АП может влиять на различные аспекты выращивания, включая качество поверхности, механические свойства, время сборки и потребность в поддержках. Различная ориентация может привести к разным площадям поперечного сечения для каждого слоя, что может повлиять на распределение тепла и характер плавки. Вертикально ориентированные поверхности могут страдать от эффекта ступенчатости [108], в то время как горизонтально ориентированные поверхности могут иметь проблемы с выступами. Кроме того, ориентация детали относительно движения устройства для повторного нанесения покрытия может повлиять на равномерность распределения порошка.

1.3.2.4 Параметры установки СЛП

В процессе селективной лазерной плавки (СЛП), разнообразные характеристики установки оказывают влияние на процесс и конечное качество изделия.

Допустимый диапазон мощности лазера установки влияет на возможный энергетический вклад. Верхний предел мощности определяет максимальное количество энергии, которое может быть передано материалу, что может привести к лучшему сплавлению порошковых частиц, но также может вызвать перегрев и другие дефекты.

Диаметр лазерного пятна определяет разрешение и точность печати. Меньшие размеры пятна позволяют добиться более тонких деталей, но могут потребовать больше времени для печати данной области.

Допустимый диапазон скорости, с которой лазер сканирует слой порошка, влияет на скорость плавки и затвердевания материала. Более высокие скорости сканирования могут ускорить процесс печати, но могут привести к недостаточному плавлению. В таком случае требуется увеличение мощности излучения.

Скорость, с которой рекотер распределяет порошок для каждого нового слоя, может влиять на равномерность слоя порошка и, следовательно, на качество печати.

Многие установки СЛП используют инертный газ (например, аргон или азот) для минимизации окисления во время процесса. Скорость и направление потока этого газа могут влиять на удаление побочных продуктов, таких как дым и брызги.

Температура в камере печати может влиять на тепловые градиенты внутри печатаемой детали, что, в свою очередь, может влиять на риск искривления и трещин.

Каждый из рассмотренных параметров может взаимодействовать с остальными, а также с материалом и геометрией изделия, демонстрируя сложные взаимосвязи. В связи с этим, оптимизация процесса селективной лазерной плавки зачастую предполагает тщательный подбор параметров и проведение обширного количества экспериментов.

1.3.2.5 Место исследуемых параметров в общей структуре работ ОТР АП

В силу сложности задачи, из всего разнообразия параметров процесса селективной лазерной плавки (Рисунок 1.45) в ходе процесса опытных технологических работ, как правило исследуется лишь часть. В данной работе основной упор был сделан на исследование энергоклада в ходе ОТР и его влияния на качество процесса плавки порошка алюминиевого сплава AlSi10Mg.



Рисунок 1.45 – Структурная декомпозиция исследуемых параметров процесса СЛП

1.4 Постановка задачи исследования

1.4.1 Вербальная постановка задачи

Целью диссертационной работы является совершенствование технологического процесса аддитивного производства методом селективной лазерной плавки металлопорошковых композиций путём разработки методики автоматизированного подбора технологических параметров процесса. Внедрение средств экспресс-анализа и проектных рекомендаций на их основе в цикл технологического проектирования процессов СЛП позволит технологам и конструкторам аддитивного производства оперативно решать задачу поиска оптимальных технологических параметров процесса с обеспечением минимальных затрат машинного времени, что приведет к заметному сокращению сроков технологического проектирования, снижению себестоимости изделий и увеличению эффективности процесса селективной лазерной плавки в целом.

Достижение поставленной цели диссертационной работы осуществлено путем решения следующих задач:

1. провести анализ существующих методов технологической подготовки и опытных технологических работ (ОТР) аддитивного производства изделий с целью поиска недостатков процесса;
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 на характеристики протекания процесса селективной лазерной плавки металлопорошковых композиций, структуру и свойства 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 свойств 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 пористости, морфологии структуры и механических свойств получаемого изделия.

1.4.2 Математическая постановка задачи

Анализ структуры процедур ОКТР аддитивного производства, проведенный в разделе 1.2.2 показывает, что отыскание вектора параметров технологического проектирования $X^* \in X_{\text{доп}}$, где $X_{\text{доп}}$ – множество допустимых вариантов проекта, есть сложная многокритериальная задача. В общем виде её можно сформулировать следующим образом:

Требуется определить вектор конструктивно-технологических параметров X^ , состоящий из элементов, которым соответствует минимальное значение целевой функции $F(x; u)$, связывающей параметры и характеристики тех. процесса на множестве ограничений U .*

В качестве целевой функции в данной работе принимается эффективность опытных технологических работ по поиску эффективного набора параметров аддитивного производства. Как было описано ранее, зачастую решением задачи ОТР является коридор эффективных параметров процесса СЛП. Оптимизация этой функции заключается в сужении коридора или в сокращении времени работ и, как следствие, снижение себестоимости всего цикла работ аддитивного производства.

Решение данной задачи как задачи математического моделирования зачастую невозможно из-за значительной размерности вектора технологических параметров процесса выращивания X^* , а также множества ограничений U – экономических, конструктивных и технологических, напрямую или косвенно влияющих на значение целевого критерия $F(x;u)$.

Исходя из данного подхода, математическая постановка задачи, как задачи многокритериальной дискретной оптимизации, принимает вид:

$$X^* = \text{ArgMin}F(x; u); x \in X; u \in U;$$

где:

$X = X\{P, d, V, \delta, h \dots\}$ - искомый вектор технологических параметров,

где:

$P, d, V, \delta, h \dots$ – параметры управляющей программы процесса СЛП: мощность лазерного излучения, диаметр пятна лазера, скорость сканирования, шаг штриховки, высота слоя и др.

$$U = U(C_{AM}, H_L, M_P, Q_P \dots)$$

где:

C_{AM} – ограничение экономической эффективности цикла АП;

H_L – ограничения установки аддитивного производства;

M_P – ограничения, связанные со свойствами материала;

Q_P – требования к качеству технологического процесса;

\dots – прочие ограничения и технические условия, ограничивающие процесс технологического проектирования производства изделия методом СЛП.

$F = F(T_{\text{отр}})$ – вектор целевой функции времени, затрачиваемого на производство изделия с учетом ограничений и требований к процессу, где $T_{\text{отр}}$ – время, затрачиваемое на поиск оптимальных параметров процесса селективной лазерной плавки МПК (время ОКТР в АП).

1.5 Выводы по главе 1

1. Выявлено, что современный уровень разработки и производства наукоёмких высокотехнологичных изделий требует ускорения процессов ОКТР.
2. Показано, что системный подход для получения эффективных наборов параметров процесса СЛП требует серьезной квалификации от инженера-технолога. В то же время достижение высокого уровня качества выращиваемого изделия может быть обеспечено путем анализа как можно большего числа результатов опытных технологических работ аддитивного производства, что непременно требует внедрения инструментов автоматизации в цикле ОКТР АП;
3. Проведенный сравнительный анализ существующих систем технологической подготовки аддитивного производства показывает их практическую неприменимость для проведения анализа технологичности изделия на этапе технологического проектирования и доказывает необходимость разработки новых средств экспресс-анализа и подходов к проведению опытных технологических работ в рамках полного АП.
4. В рамках принятых допущений поставлены вербальная и математическая задачи исследования. Математическая задача поставлена как задача многокритериальной дискретной оптимизации времени проведения опытных технологических работ.

Глава 2 Материалы и методы

В данной главе приведена подробная информация о материалах, оборудовании, инструментах анализа данных и прочих методах исследования для анализа и оптимизации ОТР процесса селективной лазерной плавки. Это даёт возможность воспроизвести эксперименты и проверить полученные результаты.

2.1 Используемые материалы

В качестве металлопорошковой композиции для исследования был взят порошок сплава AlSi10Mg производства компании «Российский алюминий» (ОК РУСАЛ, г. Москва, Россия). Материал поставляется в виде сферического порошка с номинальным размером частиц от 20 до 63 мкм. Химический состав (Таблица 9) и морфология гранул контролируется поставщиком материала. Отдельно в рамках исследования проводится входной контроль МПК перед стартом опытных технологических работ.

Таблица 9 - Химический состав материала AlSi10Mg

Марка сплава	Содержание элементов, %										
	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

Сразу после завершения процесса изготовления методом селективной лазерной плавки материал обладает конкретными физико-механическими свойствами (Таблица 10). Однако важно заметить, что эти свойства в значительной мере зависят от условий последующей постобработки изделий. Как следствие, без сопоставления с полной технологической картой для изделия или заготовки из конкретного порошкового материала эти свойства являются в большей мере справочными.

Таблица 10 – Физико-механические свойства изделий из AlSi10Mg

	Горизонтальное направление XY	Вертикальное направление Z
Предел прочности, МПа	325-350	330-360
Предел текучести, МПа	210-245	175-225
Модуль Юнга, ГПа	67-77	62-72
Удлинение	9-14%	5-12%
Твердость	114-124 HBW	
Плотность	2,66 г/см ³	

2.2 Оборудование и методы

2.2.1 Оборудование для селективной лазерной плавки

Исследование проведено с использованием установки селективной лазерной плавки МПК Addsol D50 (ООО «Титан-Авангард, Россия) (Рисунок 2.1). Для технологической подготовки всех управляющих программ, компоновки запусков и подробного планирования экспериментов использовался программный комплекс ПК ТПП, разработка ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

В качестве инертной среды для обеспечения процесса плавки был использован газ аргон, очищенный методом каталитического гидрирования, соответствующий ГОСТ 10157-2016 и обладающий следующими свойствами:

- Объёмная доля аргона – не менее 99,993%;
- Объёмная доля кислорода – не более 0,0007%;
- Объёмная доля азота – не более 0,005%;
- Объёмная доля суммы углеродосодержащих в пересчёте на CO₂ – не более 0,0009%;
- Объёмная доля водяного пара – 0,0009%;
- Точка росы – -61 °С;.



Рисунок 2.1 – Установка селективной лазерной плавки Addsol D50

Непосредственное начало плавки производилось только после достижения уровня кислорода в камере не более 0,3%. Тело образцов изготавливалось только после достижения уровня кислорода не более 0,1%.

2.2.2 Оборудование и методы анализа результатов экспериментов

Исследование структуры единичных треков было выполнено с помощью оптического микроскопа с функцией автофокусировки Saike Digital SK2700HDMI-AF (Shenzhen Saike Digital Technology Development Co., Ltd, КНР).

Изучение микроструктуры изготовленных объемных тестовых изделий проводилось с помощью подготовки металлографических образцов. Обработанный шлиф также исследовался с помощью оптического микроскопа.

Дополнительно проводилось исследование внутренней структуры (в т.ч. пористости/сплошности) синтезированных образцов объемных объектов было

проведено с использованием компьютерного томографа (Рисунок 2.2, а) Nordson DAGE NT500 XD7600NT Ruby (Nordson DAGE llc., Великобритания). Также микроструктура образцов исследовалась с помощью полученных снимков со сканирующего электронного микроскопа (Рисунок 2.2, б) TFS Quattro S (Thermo Fisher Scientific Inc., США). Исследование результатов томографии производилось в свободно распространяемом программном обеспечении myVGL 3.5 (Volume Graphics GmbH, Германия).



Рисунок 2.2 – Оборудование для детального изучения микроструктуры и пористости синтезированных образцов: компьютерный томограф NT500 XD7600NT Ruby (а) и сканирующий электронный микроскоп TFS Quattro S (б)

Локальное исследование химического состава шлифов было произведено с помощью системы энергодисперсионной спектроскопии Bruker QUANTAX (Bruker Corporation, США).

Исследование механических свойств проводилось по специально изготовленным образцам для испытаний на растяжение по ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение». Было изготовлено по 3 образца для каждого набора исследуемых параметров энерговклада: мощности излучения, скорости сканирования и высоты слоя. Исследование проведено на универсальной электромеханической машине Instron 5969 (Illinois Tool Works Inc., США).

2.3 Методика экспериментальных исследований

Как уже было описано, специфика опытно-технологических работ по поиску оптимального коридора технологических параметров подразумевает проведение последовательных экспериментов с оборудованием и материалом. Как правило, объем ОТР определяется:

- Диапазонами допустимых значений параметров оборудования;
- Точностью оборудования, используемого для анализа результатов экспериментов;
- Чистотой эксперимента и возможностью её обеспечить;
- Требованиями к качеству процесса плавки (или качеству изделия);
- Свойствами материала;

В свою очередь время, затраченное на этап подбора оптимальных технологических параметров энерговыклада определяют следующие факторы:

- Количество проведенных экспериментов;
- Время, затраченное на подготовку и проведение эксперимента;
- Время, затраченное на анализ результатов эксперимента;

Решение об объёме выполняемых исследовательских задачах и метриках для анализа в рамках процесса подбора параметров принимает инженер-технолог аддитивного производства. В этом разделе приведена информация о проводимых экспериментах, обоснование их использования в данной исследовательской работе, принципиальные схемы, исследуемые параметры и метрики.

2.3.1 Входной контроль металлопорошковой композиции

Процедура входного контроля является по сути своей «нулевым» этапом любых технологических работ наравне с пусконаладочными работами с оборудованием аддитивного производства.

Методика входного контроля сырья для селективной лазерной плавки предусматривает проверку нескольких ключевых параметров материала: размер частиц, химический состав порошка и его насыпную плотность.

Размер частиц в данной работе определялся с сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Данный метод позволяет получить точные данные о распределении размеров частиц, их средний размер и объемное распределение. Высокое увеличение позволяет также определить дефекты и примеси на поверхности частиц металлопорошковой композиции. Результаты представляются в виде графиков, отражающих процентное соотношение частиц разного размера (гранулометрический состав).

Химический состав порошковой композиции, установленный с помощью спектроскопии порошка, позволяет определить включения и примеси в порошке, а также установить процентное содержание основных элементов в сплаве AlSi10Mg. В целях данного исследования спектроскопия не проводилась, химический состав гарантируется паспортом/сертификатом, предоставляемым поставщиком материала (ОК РУСАЛ, Россия).

Также базовой характеристикой всех сыпучих материалов является их насыпная плотность. Под ней понимают количество порошка (сыпучего продукта), которое находится в свободно засыпанном состоянии в определённой единице объема. Значение насыпной плотности определяется в соответствии с ГОСТ 19440-94.

Анализ изображений является одним из наиболее эффективных методов для определения распределения порошка по размерам. Одним из примеров автоматизированных средств для анализа распределения частиц по размерам является программное обеспечение Image J, которое представляет собой бесплатный инструмент для обработки изображений на базе Java. Этот метод оказывается быстрее и точнее по сравнению со ситовым анализом, при условии хорошего качества изображения – например, полученного с помощью

СЭМ с относительно высоким разрешением (выше 1 нм при 15 кВ). С помощью анализа изображений можно измерить различные параметры размера и формы частиц, такие как распределение размеров, периметр, диаметр Ферета (ширину частицы), округлость и т.д.

В данной работе предложен собственный программный анализатор СЭМ-снимков порошкового материала, позволяющий автоматически определить основные параметры порошка и распределить гранулы по соответствующим диапазонам.

С помощью сканирующей электронной микроскопии была изучена морфология партии порошка AlSi10Mg и качество дисперсии частиц в композитах с частицами размером 50 мкм (Рисунок 2.3). Так как сканирующая электронная микроскопия не подходит для анализа распределения наночастиц в композитах на основе эпоксидного стекла, для композитов с частицами этого стекла размером 50 мкм была использована просвечивающая электронная микроскопия.

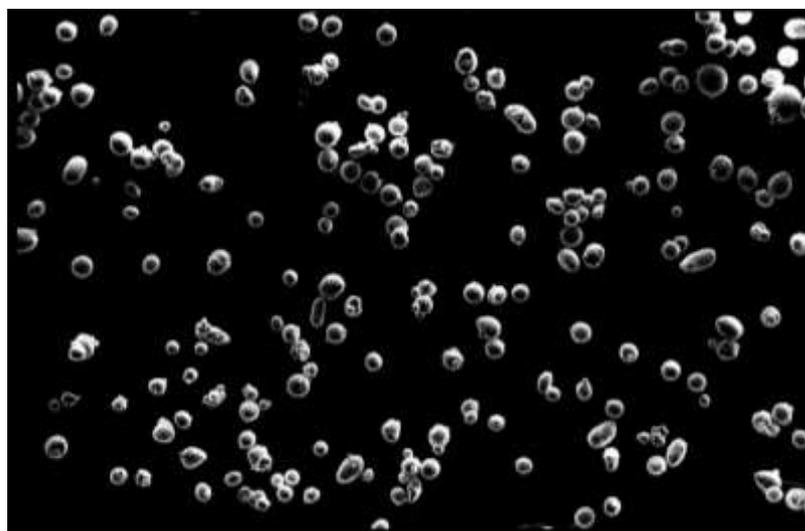


Рисунок 2.3 – SEM-снимок порошка AlSi10Mg

Основной проблемой такого метода является обработка перекрывающихся и соприкасающихся частиц – агломератов. Без средств автоматизации процесса анализа, отбирать эти частицы приходится вручную инженеру-технологу, что значительно усложняет процесс входного контроля,

повышая влияние человеческого фактора и затягивая общий процесс опытных технологических работ.

2.3.2 Исследование единичного трека без нанесения порошкового материала

Данный эксперимент представляет собой исследование взаимодействия лазера с поверхностью подложки. Суть эксперимента заключается в формировании гравировок – следов единичных треков на поверхности платформы принтера без нанесения порошкового материала. Это позволяет изучить основные характеристики лазерного воздействия на твердую поверхность и является отправной точкой для определения параметров процесса СЛП.

Перед началом эксперимента проводятся два подготовительных этапа:

- Проводится настройка и калибровка установки СЛП;
- Формируется управляющая программа, состоящая из набора траекторий единичных треков;

На втором этапе для каждого из треков выбирается пара параметров: мощность лазерного излучения и скорость движения лазерного пятна (скорость сканирования).

Основное преимущество данного вида испытаний – возможность испытать достаточно широкий диапазон параметров с маленьким шагом (дельтой параметров) и сделать предварительные выводы об оптимальных параметрах без использования порошкового материала.

Результаты эксперимента фиксируются с помощью фотографий, а в дальнейшем особенное внимание обращается на следующие метрики:

1. Ширина единичного трека (гравировки) может указывать на распределение тепла и эффективность взаимодействия лазера с материалом;

2. Глубина трека позволяет сделать выводы о глубине проникновения лазерного луча в материал, что важно для определения оптимальных параметров процесса.

3. Если в процессе образуется плазма, это может указывать на слишком высокую мощность лазера, что может привести к повреждениям материала.

4. Выброс материала при лазерном воздействии может привести к формированию дефектов в получаемом продукте.

Также эксперимент иногда проводят, сканируя площади по несколько мм. Таким образом можно оценить не только глубину отдельного трека, но и их взаимный перехлест (Рисунок 2.4).

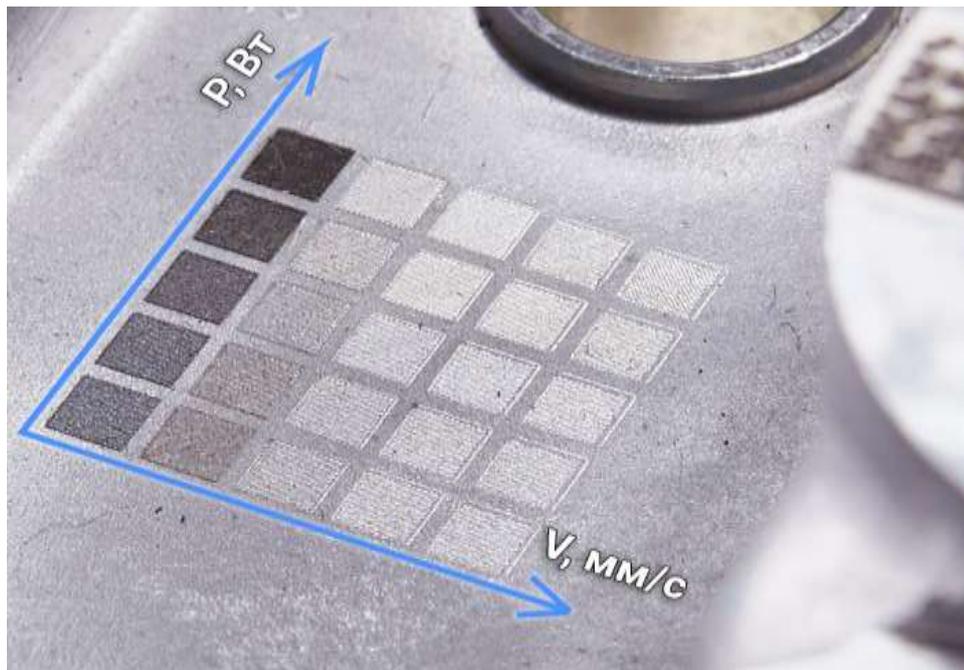


Рисунок 2.4 – Исследование энерговклада по отсканированным площадям без нанесения порошкового материала

2.3.3 Исследование единичного трека сплавленного порошкового материала

Исследование одиночного трека (Single Track Study) – это эксперимент, в ходе которого изучаются свойства и качество отдельного трека,

образующегося при прохождении лазерного пятна по поверхности порошкового материала.

Эксперимент начинается с подготовительного этапа, включающего настройку и калибровку установки СЛП и формирование управляющей программы, состоящей из набора траекторий для одиночных треков. При этом для каждого трека также определяются параметры: мощность лазера и скорость сканирования. Далее на платформу установки наносится ровный слой порошка и в соответствии с подготовленной управляющей программой осуществляется единичный последовательный прожиг каждого трека (Рисунок 2.5).

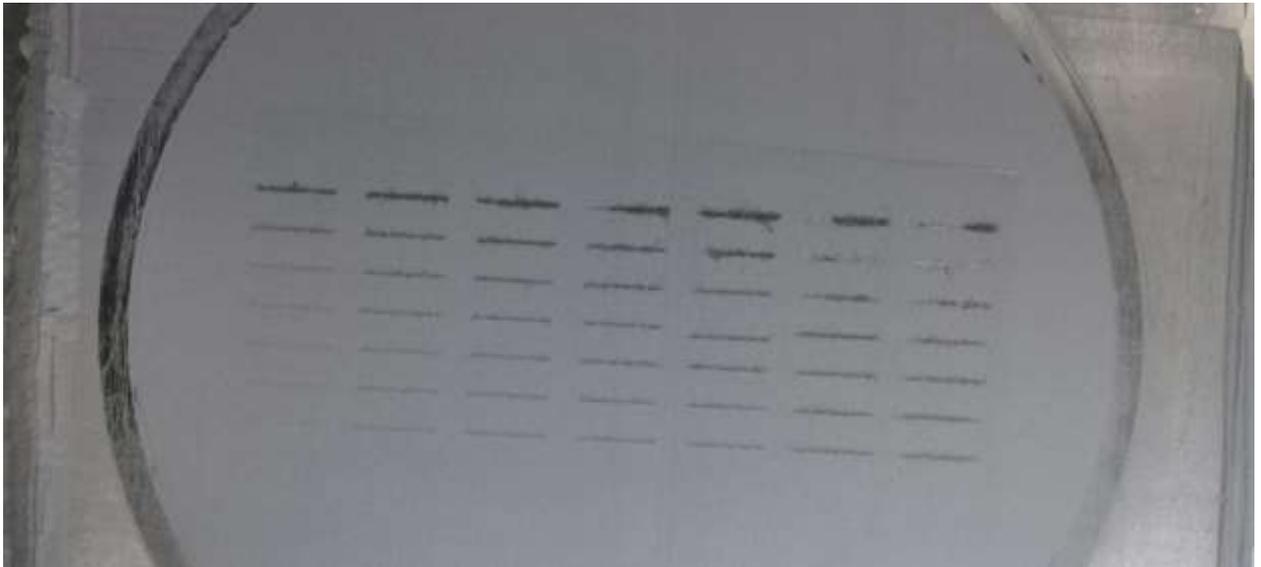


Рисунок 2.5 – Пример эксперимента с матрицей 7x7 единичных треков длиной 10 мм;

В отличие от предыдущего эксперимента, в данном случае важным является контроль за равномерностью нанесения порошка и поддержание его качества и чистоты в течение всего эксперимента.

Ключевыми метриками, на которые следует обратить внимание в ходе исследования одиночного трека, являются:

1. **Ширина трека:** аналогично предыдущему эксперименту, ширина трека может указывать на эффективность взаимодействия лазера с материалом

и распределение тепла. Данный параметр может быть относительно точно замерен с помощью оптического микроскопа;

2. **Высота трека:** важная метрика, отражающая эффективность сцепления порошка с поверхностью подложки. Для измерения высоты трека обычно используются методы профилометрии. Оптический профилометр или конфокальный микроскоп могут использоваться для измерения высоты трека с высокой точностью. Эти приборы позволяют получить трехмерное изображение поверхности образца и провести качественный и количественный анализ его топографии. Также существуют методы, которые используют сканирующую зондовую микроскопию (SPM) или атомно-силовую микроскопию (AFM), которые также позволяют измерить высоту трека и другие характеристики поверхности на микро- и наноуровне.
3. **Качество поверхности трека:** искажения, неоднородности и другие дефекты на поверхности трека могут указывать на неоптимальные параметры процесса. Видимые дефекты отсеиваются инженером при просмотре фотографий трека, сделанных оптическим или SEM-микроскопом.
4. **Присутствие дефектов в структуре трека:** поры, трещины и другие дефекты внутри трека могут значительно снизить качество изделия и его механические свойства. Обычно такие дефекты обнаруживаются с помощью микротомографии или ультразвуковой дефектоскопии. Эти методы позволяют провести неразрушающий контроль и получить трехмерное изображение внутренней структуры трека.

Также стоит отметить, что существуют различные технологии встроенного контроля процесса, которые могут использоваться для мониторинга процесса плавления в реальном времени. Это включает в себя оптический контроль, контроль температуры и контроль плазмы.

2.3.4 Исследование единичного слоя сплавленного порошка

Следующий эксперимент в воронке опытных технологических работ направлен на исследование процесса выборочного плавления одного слоя порошкового материала, нанесенного на подложку или ранее спеченный слой (Рисунок 2.6). Основная цель эксперимента - получить данные о перекрытии смежных треков, микроструктуре получаемого слоя, а также установить взаимосвязь между параметрами штриховки и свойствами конечного изделия.



Рисунок 2.6 – пример проведенного эксперимента с единичным слоем порошка алюминия.

Процедура эксперимента включает следующие этапы:

1. Калибровка и настройка оборудования СЛП.
2. Формирование управляющей программы, включающей все необходимые параметры (мощность/скорость сканирования и перехлест) для плавления одного слоя порошка в соответствии с заданным шаблоном.

В процессе проведения эксперимента осуществляется контроль таких параметров, как мощность лазера, скорость сканирования, толщина порошкового слоя, шаг штриховки и стратегия сканирования.

Анализ результатов эксперимента проводится с применением методов микроскопии и получения поперечных сечений. В процессе анализа особое внимание уделяется следующим метрикам:

1. Качество перекрытия соседних треков определяет гомогенность материала и влияет на его механические свойства.
2. Параметры микроструктуры, такие как сплошность/пористость и наличие позволяет выявить влияние параметров процесса СЛП на кристаллическую структуру и фазовый состав материала.
3. Дефекты, такие как недостаточное слияние или пористость – ещё одни важные индикаторы качества процесса, влияющие на механические свойства изделия.

2.3.5 Исследование механизма формирования объемных объектов плавкой металлопорошковой композиции

В рамках данного эксперимента исследуется процесс формирования объемных изделий методом СЛП. Часто в качестве образцов используются кубы (Рисунок 2.7). Целью испытания является анализ микроструктуры и дефектов, возникающих при многослойном прожиге.

Во время подготовки к эксперименту проводятся:

1. Калибровка и настройка оборудования для СЛП.
2. Создание управляющей программы, которая включает в себя требуемые геометрические параметры изделия и траекторию сканирования.

3. Определение начальных параметров процесса, таких как мощность лазера, скорость сканирования, интервалы между треками и стратегию сканирования.

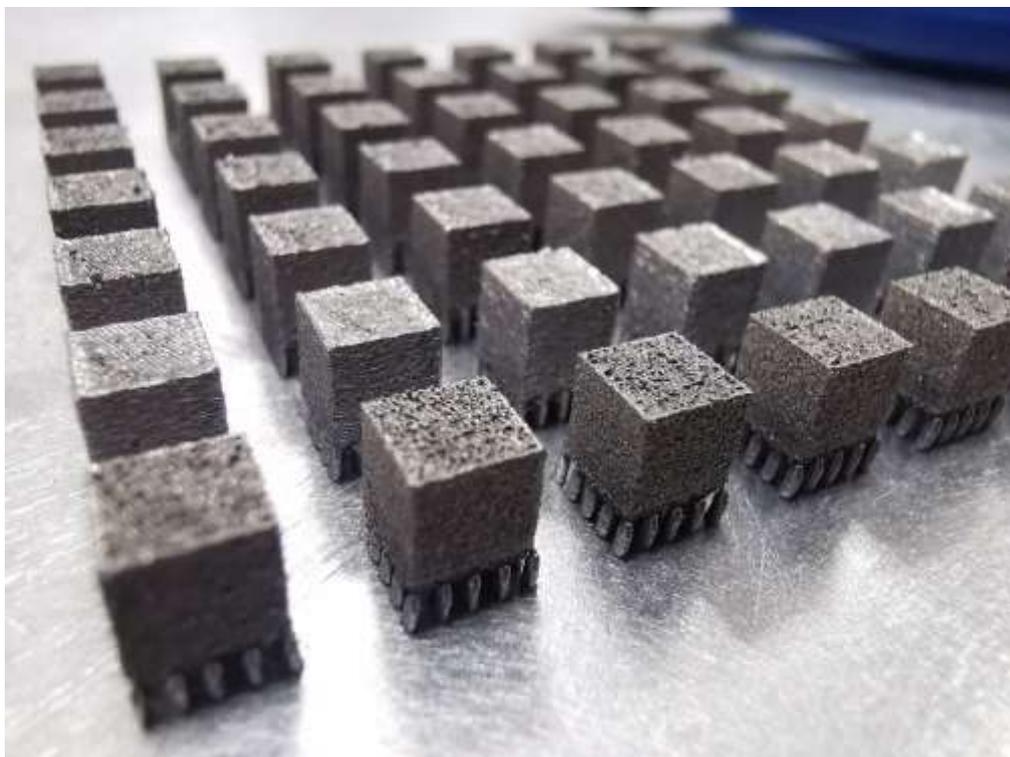


Рисунок 2.7 – Пример изготовленной матрицы образцов-кубов 7x7

Эксперимент с объемными образцами является важным этапом, позволяющим перевести полученные на предыдущих стадиях знания в практику и оценить их применимость при формировании реальных изделий.

2.4 Методика анализа результатов экспериментов

При анализе синтезированных образцов проводится:

1. Измерение геометрических параметров полученных образцов и их сравнение с заданными в управляющей программе. Это позволяет выявить возможные отклонения, связанные с деформациями или искажениями геометрии.
2. Исследование морфологии структуры образцов с помощью микроскопии (оптический микроскоп и СЭМ), а также рентгеновской

компьютерной томографии для выявления внутренних дефектов, таких как поры или несплошности.

3. Оценка качества поверхности образцов (шероховатости) и определение степени адгезии слоев друг к другу.

Исходя из полученных результатов, производится корректировка параметров процесса для оптимизации качества изделий. Часто требуется несколько итераций для достижения наилучших результатов. С каждой итерацией сужается диапазон исследуемых параметров, уменьшается шаг изменения варьируемых параметров.

2.4.1 Подготовка микрошлифов из выращенных материалов

Для ряда тестовых кубов были подготовлены металлографические образцы – шлифы. Шлифы изготавливали на оборудовании фирмы Struers (Struers ApS, Дания).

Для их изготовления из выращенных кубов вырезается область для исследования с помощью абразивной пилы. Для целей данного исследования была выбрана плоскость реза – XOZ, область перпендикулярная платформе построения, содержащая в себе вектор роста слоёв аддитивно сплавляемого образца.

Материал из куба вырезается с «запасом» – на некотором расстоянии от плоскости, которая будет изучаться (обычно до 500-1000 мкм). Это необходимо, так несколько десятков микрометров будет удаляться при механическом шлифовании. Для предотвращения нагрева образца и изменения структуры образца при резке применяют охлаждающую эмульсию.

Сначала получают приблизительно плоскую поверхность (опиловкой, обработкой абразивами). Для удобства выполнения этой операции образцы помещают заливают в эпоксидную смолу. После получения приблизительно плоской поверхности образец шлифуют наждачной бумагой, которую для

этого помещают на плоское основание (обычно на стекло) или закрепляют на вращающемся круге.

Шлифование проводят последовательно наждачной бумагой с различным размером зерна – сначала крупнозернистой, а затем мелкозернистой. При смене сорта бумаги – шкурки – меняют на 90° направление движения образца по наждачной бумаге относительно направления круга. Это дает лучшее удаление гребешков и риск от предыдущего шлифования. Частицы абразивного материала с поверхности образца после шлифования удаляют обдуванием воздухом или, лучше, промывкой водой. При шлифовании большинства алюминиевых сплавов (в т.ч. и AlSi10Mg) наждачную бумагу предварительно смачивают в воде.

Оставшиеся после шлифования мелкие риски удаляют полированием. В данном исследовании было применено механическое полирование при помощи полировального фетра. После полирования образец высушивают фильтровальной бумагой.

Финальным этапом перед установкой микрошлифа в микроскоп является травление. Подготовленные микрошлифы первоначально травились путем погружения в реагент Келлера (95 мл воды, 2,5 мл азотной кислоты, 1,5 мл соляной кислоты, 1 мл плавиковой кислоты) на 15 секунд. Этот травитель даёт возможность выявлять границы зерна и частицы кремния в шлифованных образцах AlSi10Mg.

2.4.2 Исследование микроструктуры образцов

В рамках этого исследования проводился помимо визуальной оценки внешнего вида образцов проводился также и анализ структуры объёмных образцов-кубов с помощью микроскопии – оптического и сканирующего электронного микроскопа на различных увеличениях: 50x, 100x, 500x, 1000x, 5000x и 30 000x. Для СЭМ использовался режим приближения с напряжением 10 кВ.

Отдельные объёмные образцы были исследованы с помощью компьютерной томографии. Параметры сканирования:

- Напряжение: 120 кВ.
- Сила тока при съёмке: 41,456 мкА.
- Мощность: 5 Вт.

Выбранные параметры обеспечивают детализированное изображение внутренней структуры объёмных образцов из алюминиевых сплавов с точностью до 12,5x15x15 мкм (разрешающая способность томографа).

Глава 3 Проведение опытных технологических работ по поиску оптимальных параметров процесса СЛП

В этой главе подробно описываются проведенные опытные технологические работы, направленные на поиск оптимальных параметров процесса СЛП. Детально изложены процессы, связанные с проведением трёх выбранных экспериментов из общего цикла опытных технологических работ:

- входного контроля порошкового материала;
- исследования единичных треков сплавленного порошкового материала AlSi10Mg;
- исследования механизма формирования объёмных образцов-кубов.

Каждый из разделов содержит подразделы, описывающие комментарии к эксперименту, подготовку и ход эксперимента, а также обработку и анализ результатов эксперимента.

Для всех экспериментов анализ результатов с помощью разработанных программных компонентов экспресс-анализа, разработка которых описана в главе 4. Таким образом результаты исследования в настоящей работе (в главах 3 и 4) представлены параллельно-последовательно.

3.1 Входной контроль порошка AlSi10Mg

В рамках экспериментальных работ для обеспечения стабильности и повторяемости процесса СЛП был проведен контроль исходного порошкового материала с помощью анализа изображений, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа. Этот раздел посвящен деталям входного контроля порошка AlSi10Mg, а также описанию результатов эксперимента.

3.1.1 Результаты анализа

В ходе исследования порошок был разделён на две партии и просеян через два сита с разным размером ячейки – 30 мкм и 60 мкм. Каждая из партий

была собрана и помещена на пластинку для дальнейшего изучения с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Просев через сито с ячейкой 30 мкм (Рисунок 3.1) представлен 519 гранулами, средний диаметр – 24,135 мкм. Максимальный и минимальный диаметр элементов на СЭМ-снимке – 65,8 мкм и 5,8 мкм соответственно.

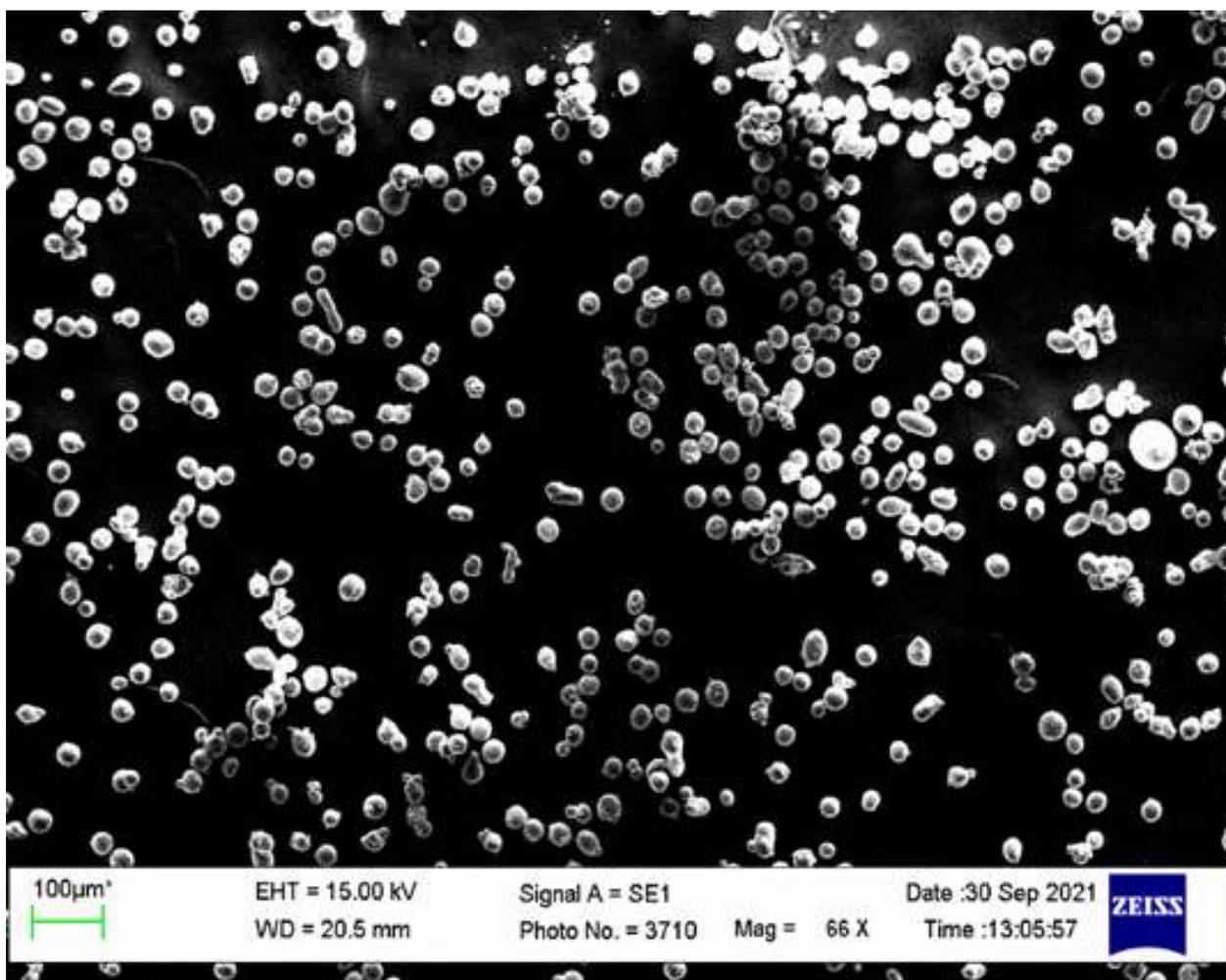


Рисунок 3.1 – СЭМ-снимок просева порошка AlSi10Mg через сито 30 мкм, увеличение – 100х, напряжение – 15 кВ

Анализ полученных изображений с помощью разработанных инструментов экспресс-анализа позволил определить распределение размеров частиц порошка AlSi10Mg по интервалам (Таблица 11).

Таблица 11 – Анализ гранулометрического состава порошка AlSi10Mg (сито 30 мкм)

№ диапазона	Диаметр гранул в диапазоне, мкм-мкм	Количество частиц в диапазоне
1	0 - 5	0
2	5 - 10	9
3	10 - 15	24
4	15 - 20	84
5	20 - 25	173
6	25 - 30	168
7	30 - 35	42
8	35 - 40	13
9	40 - 45	3
10	45 - 50	0
11	50 - 55	1
12	55 - 60	1
13	60 - 65	0
14	65 - 70	1
15	70+	0
		519

Частицы, превышающие размер ячейки сита (30 мкм), представленные в диапазонах №7, 8, 9, 11, 12 и 14 представляют собой агломераты – мелкие частицы металлического порошка, соединенные в более крупные образования за счет адгезии.

По результатам анализа построена гистограмма распределения частиц порошка по диапазонам размеров (Рисунок 3.2).

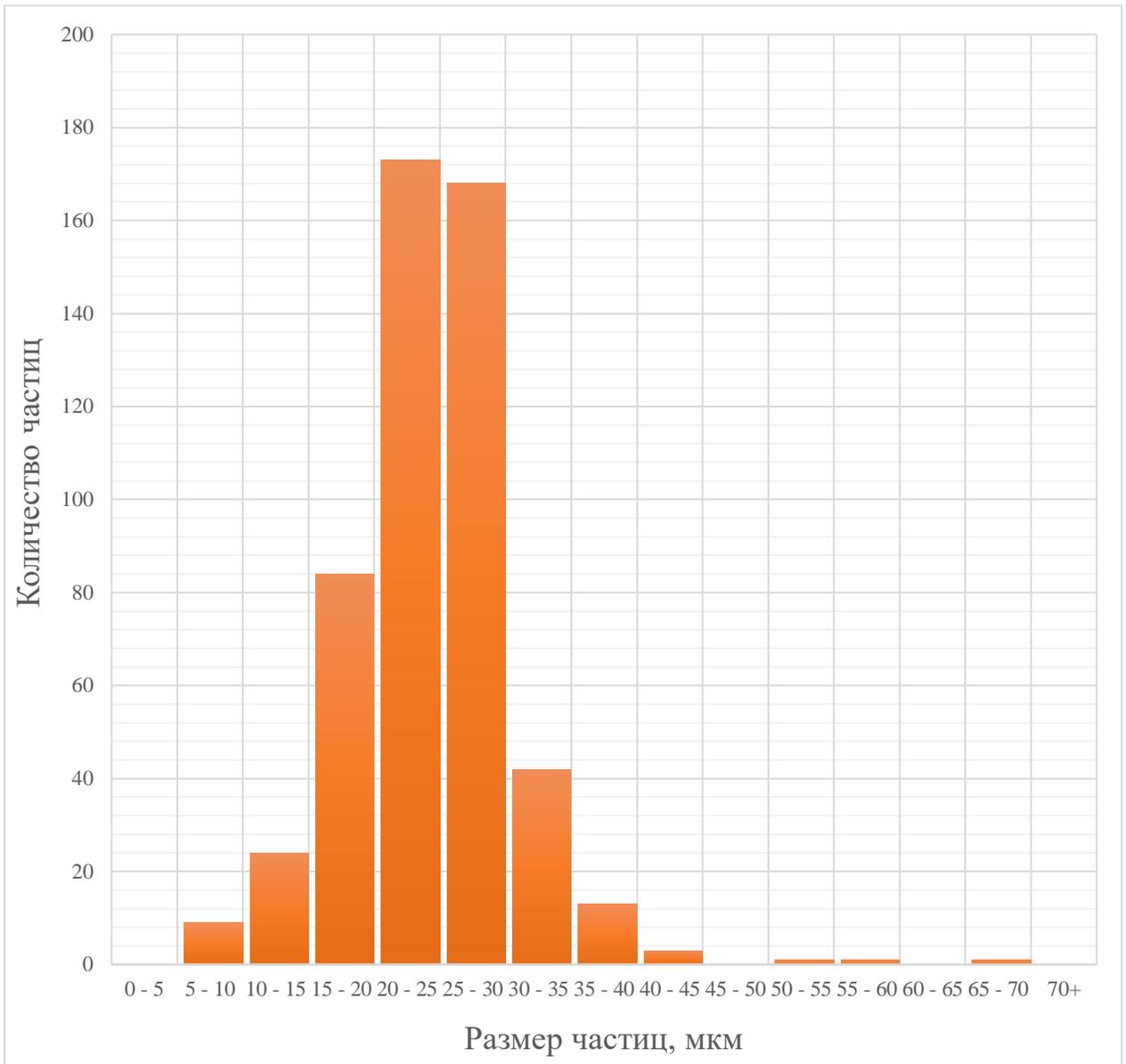


Рисунок 3.2 – Гистограмма распределения частиц порошка AlSi10Mg по размерам, просев через сито с размером ячейки 30 мкм

Анализ гистограммы показывает нормальное одномодальное распределение с модой равной 25,215 мкм. 85-й перцентиль для партии порошка, просеянного через сито 30 мкм, составляет 29,363 мкм.

Просев через сито с ячейкой 60 мкм (Рисунок 3.3) в свою очередь показывает более «грязную» картину. Помимо более крупных агломератов, на изображении представлены ещё артефакты, которые были отброшены в ходе обработки СЭМ-снимков средствами разработанных программных инструментов.

Просев представлен 307 гранулами, средний диаметр – 39,868 мкм. Максимальный и минимальный диаметр элементов на СЭМ-снимке – 108,6 мкм и 5,0 мкм соответственно.

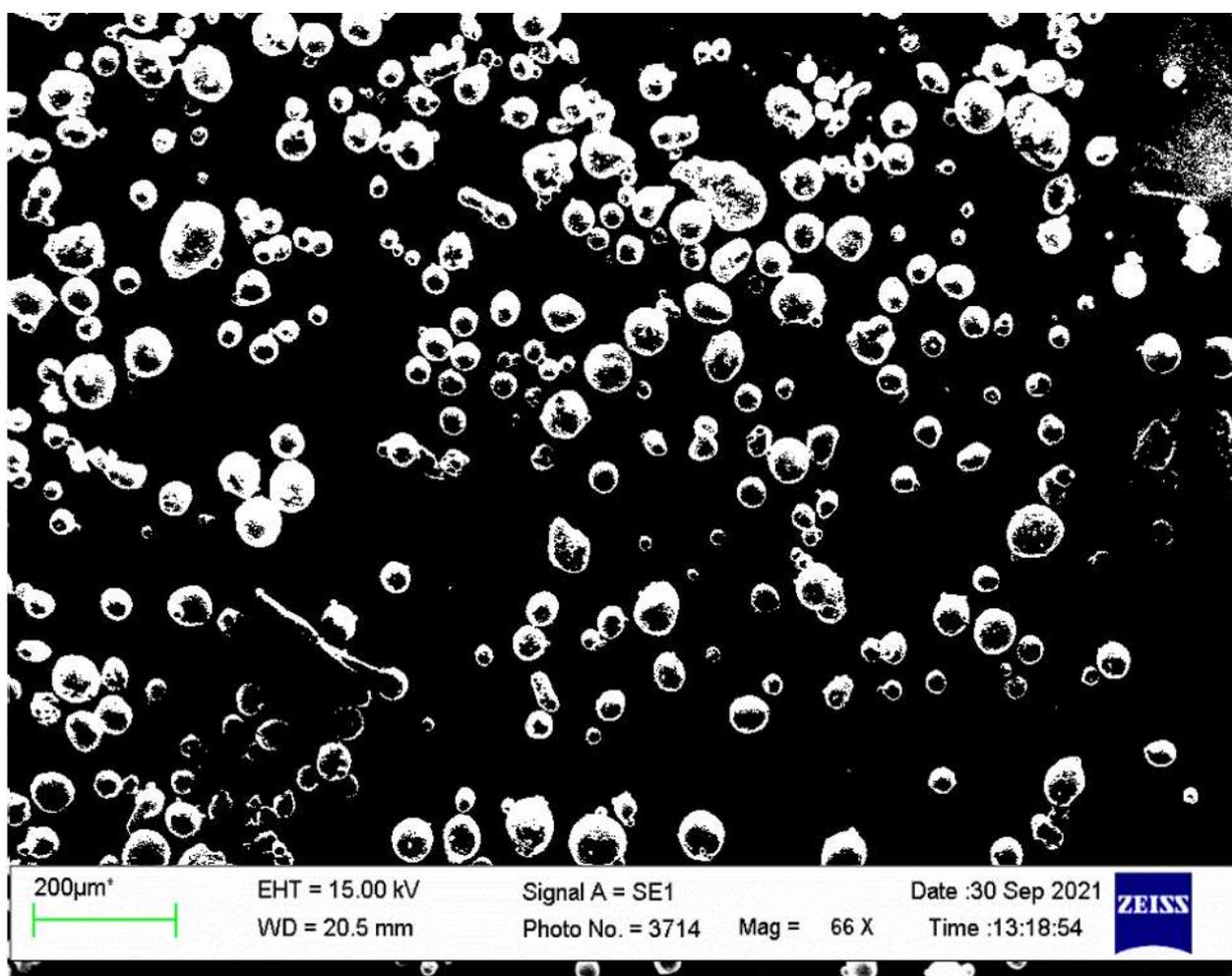


Рисунок 3.3 – СЭМ-снимок просева порошка AlSi10Mg через сито 60 мкм, увеличение – 100х, напряжение – 15 кВ

Анализ полученных изображений с помощью разработанных инструментов экспресс-анализа позволил определить распределение размеров частиц порошка AlSi10Mg по интервалам (Таблица 12).

Таблица 12 – Анализ гранулометрического состава порошка AlSi10Mg (сито 60 мкм)

№ диапазона	Диаметр гранул в диапазоне, мкм-мкм	Количество частиц в диапазоне
1	0 - 5	0
2	5 - 10	6
3	10 - 15	11
4	15 - 20	21
5	20 - 25	19
6	25 - 30	30
7	30 - 35	46
8	35 - 40	35
9	40 - 45	26
10	45 - 50	31
11	50 - 55	29
12	55 - 60	15
13	60 - 65	16
14	65 - 70	11
15	70+	11
		307

Частицы, превышающие размер ячейки сита (60 мкм), представленные в диапазонах №13-15 представляют собой агломераты.

По результатам анализа построена гистограмма распределения частиц порошка по диапазонам размеров (Рисунок 3.4).

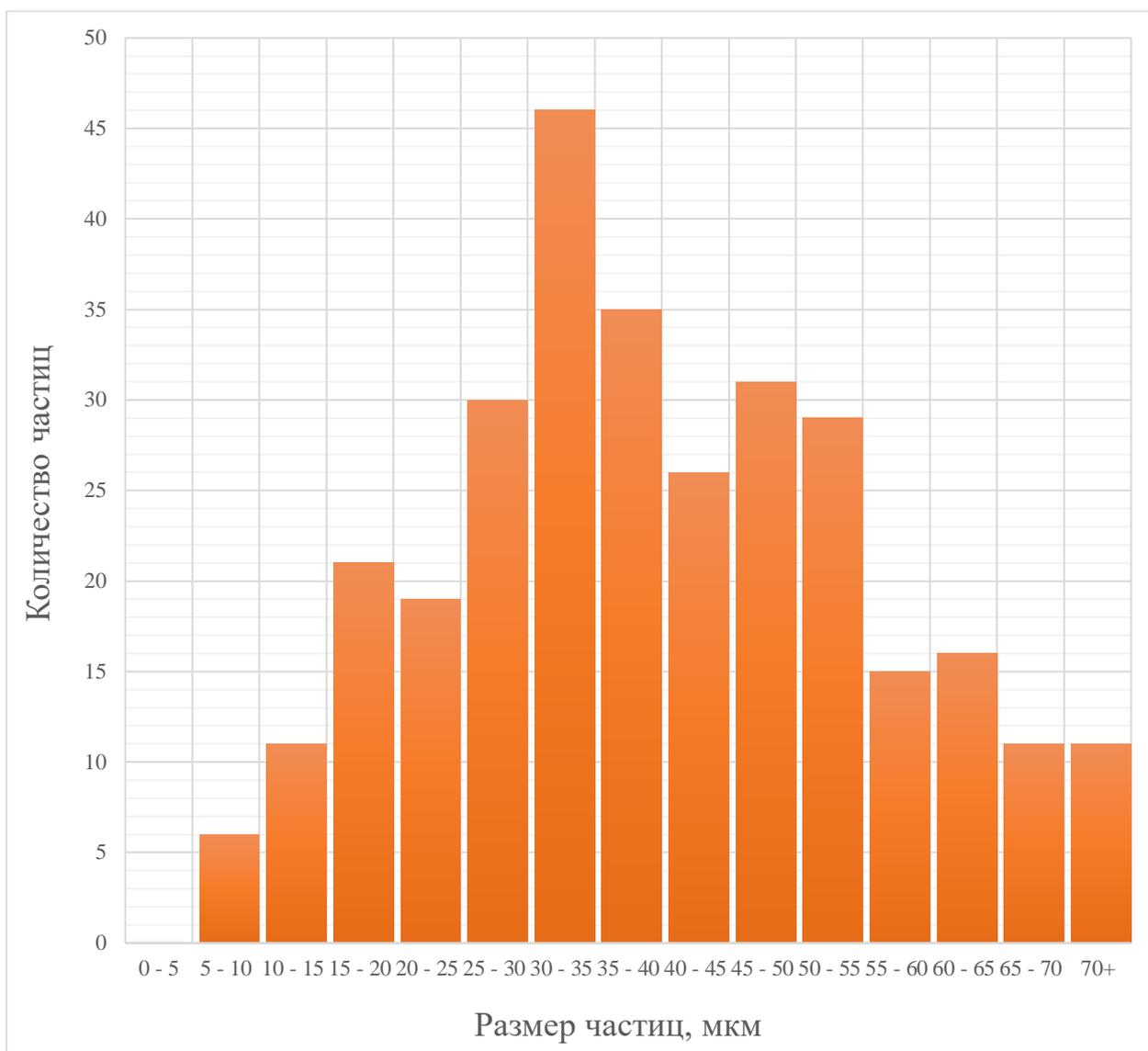


Рисунок 3.4 – Гистограмма распределения частиц порошка AlSi10Mg по размерам, просев через сито с размером ячейки 60 мкм

Анализ гистограммы показывает нормальное одномодальное распределение с модой равной 35,344 мкм. Выбросы в правой части графика обусловлены большим количеством агломератов в диапазоне 60-75 мкм.

85-й перцентиль для партии порошка, просеянного через сито 60 мкм, составляет 57,422 мкм.

3.1.2 Выводы из результатов входного контроля порошка AlSi10Mg

Было проведено статистическое исследование распределения размеров частиц двух партий металлопорошковой композиции AlSi10Mg, просеянных

через сита с размером ячейки 30 и 60 мкм с помощью изучения результатов просева методом анализа просевов сканирующим электронным микроскопом.

Несмотря на то, что при выбранном методе анализа порошка к исследованию представляется относительно небольшая выборка (307 и 519 частиц для двух разных просевов), методика и аппарат исследования позволяет сделать вывод о повторяемости результатов и для большей выборки или для применения других методов входного контроля (например, лазерной дифракции).

Ключевым выводом из анализа двух просевов является то, что частицы порошка распределены в соответствии с нормальным одномодальным распределением. При увеличении размера ячейки сита с 30 до 60 мкм, мода размера частиц порошка увеличивается приблизительно на 10 мкм (с 25,215 мкм до 35,344 мкм), а 85-й перцентиль с 29,363 мкм до 57,422 мкм.

Приведенные результаты гарантируют адекватную насыпную плотность $2,67 \text{ г/см}^3$ при использовании просеянного порошка в установке селективной лазерной плавки в соответствии с паспортом материала, предоставленного ОК РУСАЛ. Это позволяет уверенно проводить опытно-технологические работы, связанные с непосредственным синтезом образцов.

3.2 Исследование единичного трека сплавленного порошка AlSi10Mg

3.2.1 Подготовка эксперимента

Эксперимент предполагает изготовление набора единичных треков с варьируемыми параметрами, которые являются аргументами функции энерговклада – мощность лазерного излучения и скорость движения лазерного пятна. Для расчета линейного энерговклада (в рамках одного слоя и на траектории линии) используется формула линейного энерговклада:

$$E_l = \frac{P}{V};$$

Где:

P – мощность лазерного излучения, Вт;

V – скорость движения лазерного пятна при плавке, мм/с

Эксперимент со сканированием единичных сварных треков позволяет определить характер формирования и параметры ванны расплава в зависимости от параметров сканирования – мощности лазерного излучения P и скорости сканирования V . Для этого в целях эксперимента «замораживаются» остальные параметры процесса, а аргументы функции энерговклада варьируются с целью найти треки, соответствующие в том числе критерию непрерывности.

Для проводимого эксперимента мощность лазерного излучения варьировалась в диапазоне от 40 до 400 Вт, а скорость сканирования от 200 мм/с до 2000 мм/с, что составляет 90% коридора параметров, возможных на установке Addsol D50.

3.2.2 Подготовка управляющей программы и ход эксперимента

Целью подготовительного этапа эксперимента является:

- Определение числа тестовых образцов-треков;

- Размещение STL-моделей треков на платформе;
- Установка параметров прожига;
- Создание и экспорт управляющей программы на терминал управления установки селективной лазерной плавки.

Для создания управляющей программы (g-кода) использовался программный комплекс ПК ТПП (ФБГОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Россия).

STL-файл единичного трека представляет собой прямоугольный параллелепипед с параметрами d , t , l , где d – ширина, не превышающая диаметр лазерного пятна в мкм, t – высота, не превышающая толщину слоя в мкм, l – длина трека, устанавливаемая технологом. Параметры $d = 50$ мкм и $t = 30$ мкм выбраны исходя из технических характеристик установки Addsol D50. Была выбрана длина трека 5 мм. Такая длина позволяет разместить большое количество тестовых образцов на платформе, не усложняя процесс анализа результатов эксперимента. Это также обеспечивает достаточное пространство для выявления всех потенциальных дефектов, которые могут возникнуть.

Единичные треки были скомпонованы в матрицу 9x11. Шаг изменения мощности лазерного излучения – 36 Вт. Шаг изменения скорости – 225 мм/с. Для визуального представления плана эксперимента была подготовлена точечная диаграмма (Рисунок 3.5).

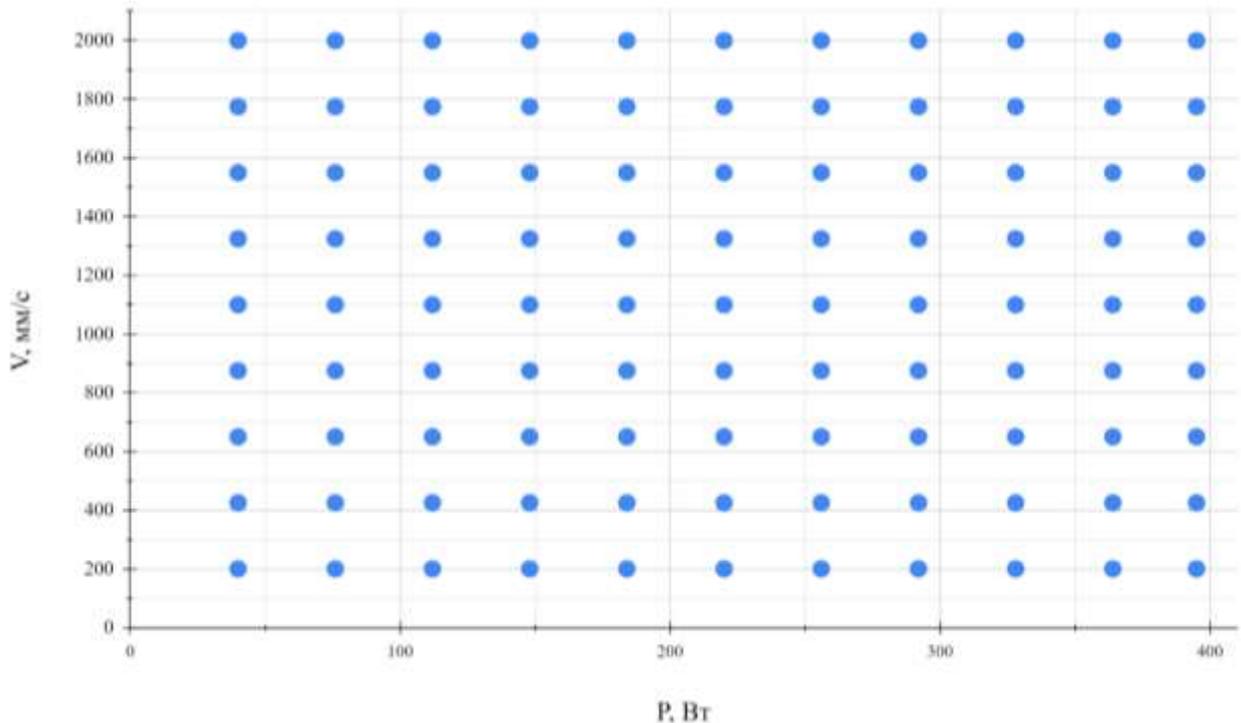


Рисунок 3.5 – План эксперимента по выращиванию единичных треков

Максимальная мощность в 395 Вт установлена из-за технических ограничений источника лазерного излучения – максимальная мощность не достигает номинально установленной мощности 400 Вт.

Таким же образом подобраны значения для скорости сканирования – перемещения лазерного пятна по поверхности платформы:

Далее технологом подготавливается управляющая программа, содержащая координаты треков, а также параметры экспозиции (мощность и скорость) для лазерного излучения (Листинг 1).

Листинг 1 – Пример управляющей программы (g-код) для образца 1

```
;Layer 1
; new part order = 1
M3
M702 40
M704 B200
; inskin
M3
M702 40
M704 B200
G0 X-35.0000 Y-20.0000
G1 X-35.0000 Y-25.0000
```

Управляющая программа экспортируется на терминал установки Addsol D50. Затем производится насыщение камеры инертным газом с целью избежать формирования оксидных плёнок на поверхности расплавленных частиц порошка. Печать проводилась в инертной среде аргона (Рисунок 3.6). Содержание кислорода во время выращивания не превышало 0,8%.

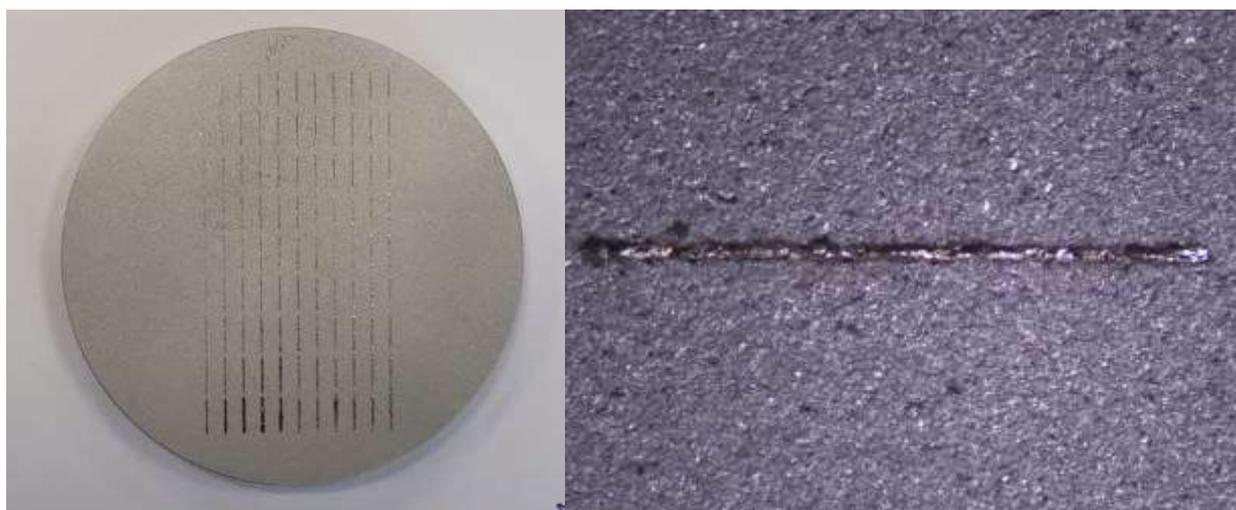


Рисунок 3.6 – Экспонированные треки на платформе установки Addsol D50

Очистка платформы производится с помощью мягкой кисти вручную оператором установки АП. На этом шаге существует риск очистить несплавленный порошок, принадлежащий трекам с минимальным энергозатратом. Однако в силу того, что изготавливать более сложные образцы и изделия с такими настройками невозможно, то в данном случае и с учетом целей исследования случайно удаленные частицы порошка не влияют на общую картину результатов эксперимента.

3.2.3 Сбор и систематизация результатов

Подготовленные платформы (Рисунок 3.7, а) были проанализированы с помощью оптического микроскопа Saike Digital SK2700HDMI-AF. Был подготовлен набор из 99 фотографий вида треков сверху на 30-кратном увеличении (Рисунок 3.7, б).



а)

б)

Рисунок 3.7 – Платформа с образцами-треками для анализа (а) и пример снимка, полученный на оптическом микроскопе (б)

Массив JPG-изображений в исходном качестве был сохранен для последующего анализа. Размер каждого снимка составляет от 3,7 до 4,0 МБ. Обработка всего массива изображений в программном компоненте экспресс-анализа единичных треков позволила отделить сегментированные (нестабильные) треки, характеризующиеся недостаточным энерговкладом при синтезе порошка (Рисунок 3.8 – а, б), от стабильных непрерывных треков (Рисунок 3.8 – в, г).



а)

б)



в)

г)

Рисунок 3.8 – Примеры единичных треков, полученных в ходе эксперимента:

- а) минимальное сплавление с подложкой; б) нестабильный сегментированный трек;
- в) стабильный непрерывный трек стандартной ширины;
- г) непрерывный трек, полученный расширенной нестабильной ванной расплава

Далее результаты были систематизированы, а на основании данных об мощности излучения, скорости сканирования и фрагментации единичного трека построена пузырьковая диаграмма (Рисунок 3.9). На диаграмме выделены треки, которые программный компонент экспресс-анализа определил как непрерывные.

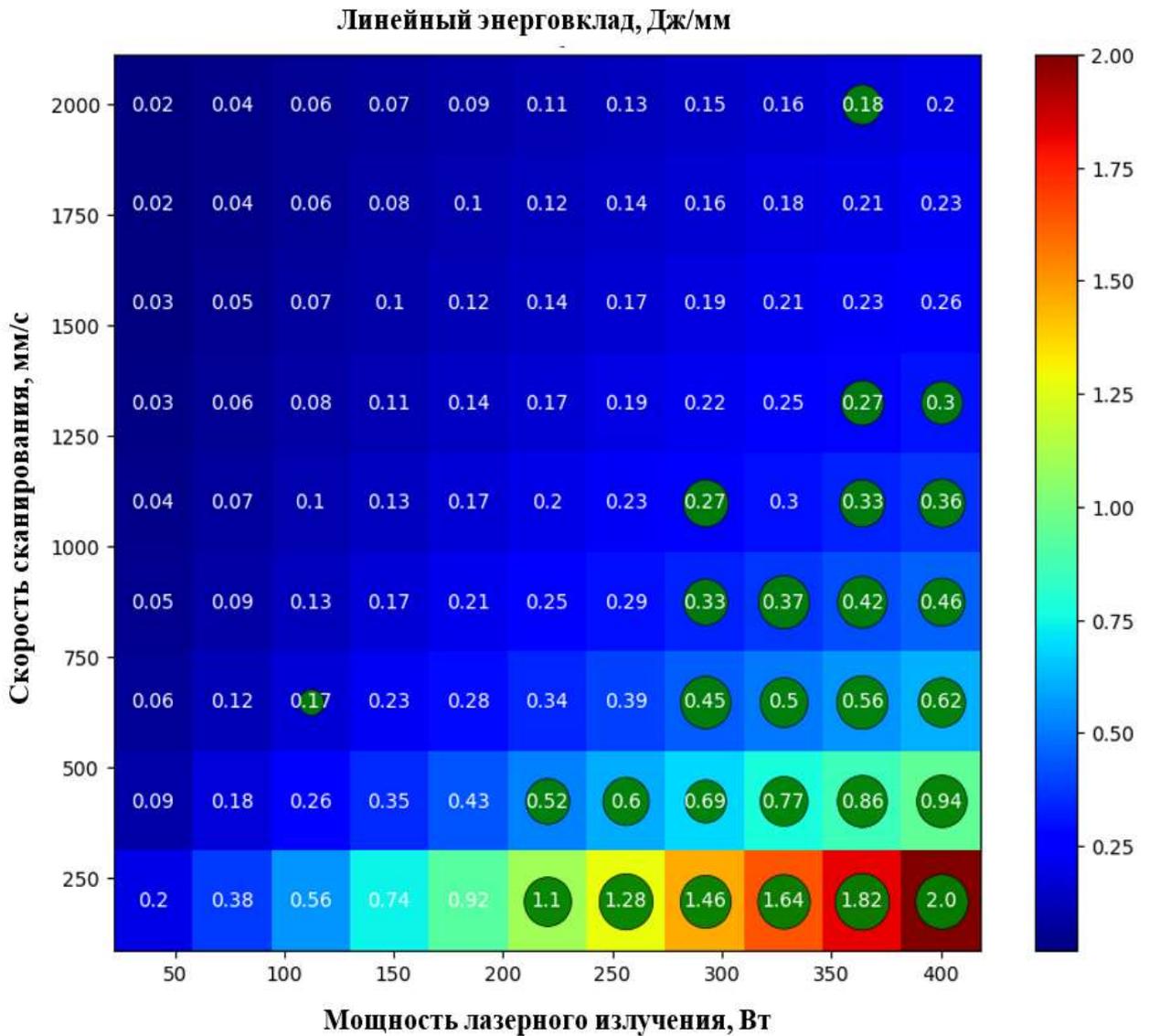


Рисунок 3.9 – Пузырьковая диаграмма результатов эксперимента с выделением непрерывных единичных треков

Пузырьковая диаграмма позволяет наглядно и с минимальным участием инженера-технолога выделить непрерывные единичные треки, в результате чего становится возможным уточнить диапазон следующего эксперимента (например, печать тестовых объемных образцов).

В случае с приведенной выше диаграммой диапазон можно сократить с [40:400], Вт (для мощности излучения) и [200:2000], мм/с (для скорости сканирования) до [220;400], Вт и [200;1400], мм/с соответственно. Такое сокращение позволит в дальнейших экспериментах либо сократить количество образцов, либо значительно (в два раза) уменьшить шаг варьирования параметров при сохранении количества образцов, что увеличит точность определения коридора оптимальных параметров процесса плавки.

3.3 Исследование механизма формирования объемных образцов

3.3.1 Подготовка эксперимента

Следующий эксперимент из цикла ОТР, заключающийся в создании объёмных образцов-кубов размером 5x5x5 мм, был проведен уже в уточненном диапазоне параметров. Аргументом оптимизации, как и в эксперименте с единичными треками является энерговклад. Для объемного случая он рассчитывается в Дж/мм³ по формуле:

$$E_v = \frac{P}{V \cdot t \cdot h};$$

где:

V – скорость сканирования (движения лазерного пятна), мм/с;

P – мощность лазерного излучения, Вт;

t – высота слоя нанесённой порошковой композиции, мм;

h – дистанция между «штрихами» - проходами лазерного луча, мм.

В целях настоящего исследования варьировались как параметры скорости и мощности, так и параметр высоты слоя, увеличение которого в перспективе способно дать прирост к производительности процесса СЛП.

3.3.2 Подготовка управляющей программы и ход эксперимента

К печати были подготовлены 60 образцов с различными сочетаниями мощности, скорости и высоты слоя. Уточненный диапазон параметров энерговклада был визуализирован с помощью точечной диаграммы (Рисунок 3.10). Зелёными точками на диаграмме выделены сочетания параметров уточненного диапазона из всех возможных на установке комбинаций.

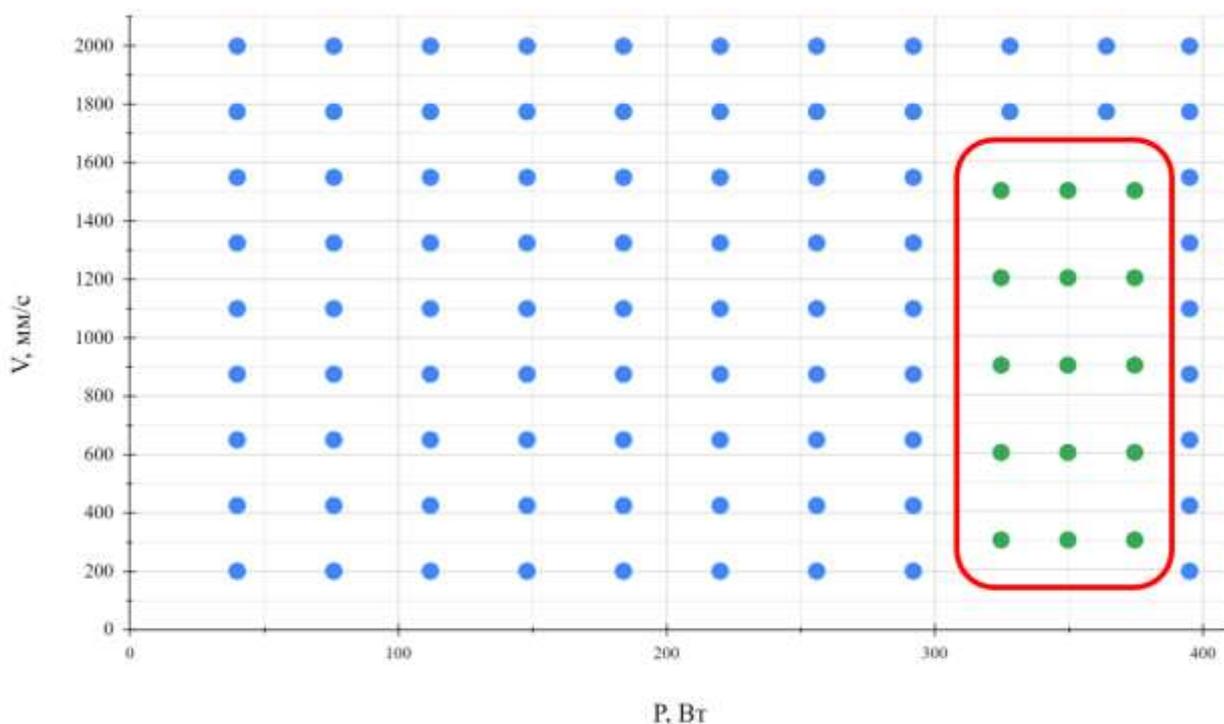


Рисунок 3.10 – План эксперимента по синтезу объемных образцов

В связи с тем, что платформа установки ограничена по размеру (диаметр платформы всего 50 мм), разместить все 60 образцов в одном запуске – задача нетривиальная. 15 образцов (четверть от планируемого количества) занимает всю площадь платформы (Рисунок 3.11).

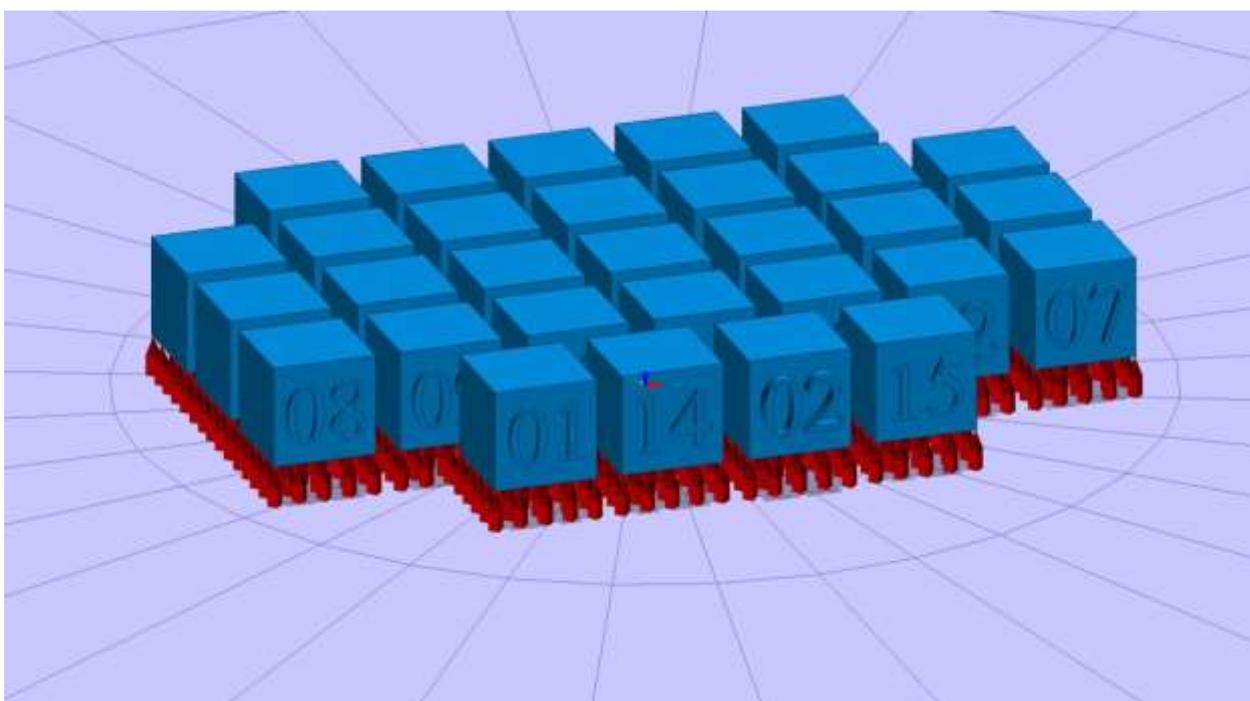


Рисунок 3.11 – Размещение части образцов на платформе Addsol D50

С целью экономии машинного времени, расходуемого инертного газа и порошкового материала, образцы были сформированы «башнями» (Рисунок 3.12).



Рисунок 3.12 – Пример размещения «башен» образцов на платформе установки D50

Таким образом на первом ярусе башни были размещено 15 образцов с варьируемыми параметрами «мощность»-«скорость» с высотой слоя 30 мкм, на втором ярусе – 50 мкм, на третьем – 70 мкм и на четвертом – 90 мкм. Между ярусами печатается поддерживающий материал высотой 1 мм.

Далее технологом подготавливается управляющая программа, содержащая координаты образца, а также параметры экспозиции: мощность и скорость. Один слой поддерживающего материала занимает порядка 128 строк G-кода (Листинг 2).

Листинг 2 – Пример части УП для печати поддерживающего материала

```
;Layer 0
;Support Volume 1 (mm^3)
;Model volume 0 (mm^3)
; new order = 1 Box1.stl
M3
M702 300
M704 B200
G0 X1.2250 Y-2.7500
G1 X1.5250 Y-2.4500
G1 X1.2250 Y-2.1500
G1 X0.9250 Y-2.4500
G1 X1.2250 Y-2.7500
```

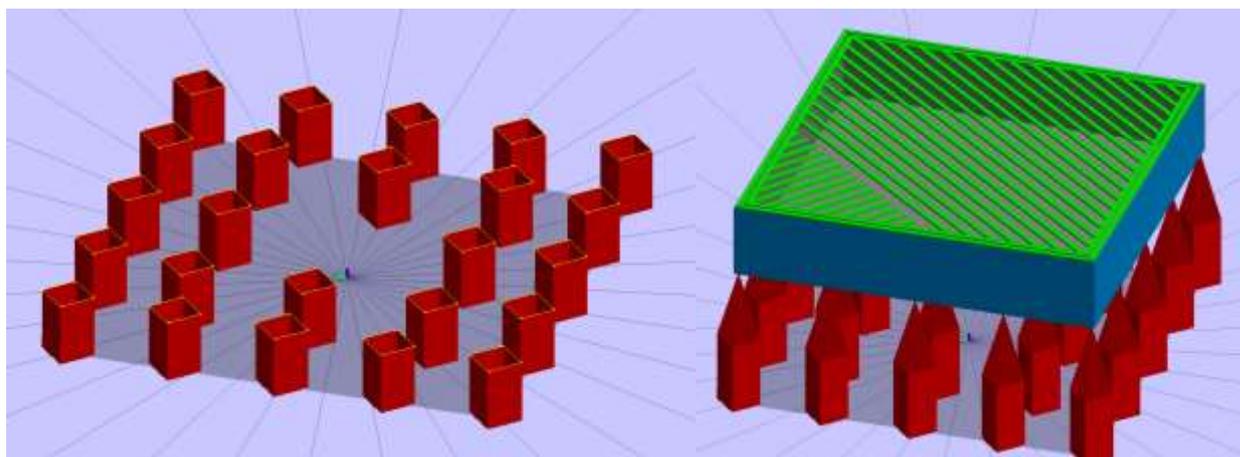
```
G0 X-0.0000 Y-2.7500
G1 X0.3000 Y-2.4500
...
G1 X1.7000 Y-1.4000
G1 X1.4000 Y-1.1000
G1 X1.1000 Y-1.4000
G1 X1.4000 Y-1.7000
```

Для печати слоя непосредственно «тела» тестового образца уходит порядка 100 команд (Листинг 3), задающих траектории движения лазерного луча для прожига контуров (“Perimeter” и “Offset”), а также внутреннего заполнения (“Chess”).

Листинг 3 – Пример части УП для печати материала тестового образца

```
; Layer 101
; Support Volume 0 (mm^3)
; Model volume 0,75 (mm^3)
; new order = 1
; new zone: Perimeter
G0 X-2.4500 Y-2.4500
G1 X-2.4500 Y2.4500
G1 X2.4500 Y2.4500
G1 X2.4500 Y-2.4500
G1 X-2.4500 Y-2.4500
; new zone: Offset
G0 X-2.3500 Y-2.3500
G1 X-2.3500 Y2.3500
G1 X2.3500 Y2.3500
G1 X2.3500 Y-2.3500
G1 X-2.3500 Y-2.3500
; new zone: Chess
G0 X0.4162 Y2.3490
G1 X-0.2055 Y2.1589
G0 X1.1003 Y2.3490
G1 X-0.1470 Y1.9676
...
G1 X1.4672 Y-2.3490
G0 X2.3490 Y-2.2886
G1 X2.1513 Y-2.3490
; new zone: Chess
G0 X1.0577 Y-2.3490
G1 X-0.3787 Y2.3490
G0 X0.8485 Y-2.3490
...
G0 X-2.0794 Y-2.3490
G1 X-2.3490 Y-1.4672
G0 X-2.2886 Y-2.3490
G1 X-2.3490 Y-2.1513
M5
; jumping time 0
; smart laser time 0.00000
; Printing time 0 (sec)
```

Управляющими командами задаются траектории движения лазерного луча (Рисунок 3.13). В примере печать поддерживающего материала проводилась с толщиной слоя 40 мкм, а печать самого тестового образца с толщиной слоя 30 мкм.



а)

б)

Рисунок 3.13 – Траектории движения лазерного луча при печати: поддерживающего материала (а) и «тела» изделия (б).

3.3.3 Сбор и систематизация результатов

Критериями качества на этом этапе являются пор в образце, совокупный объём пор и несплошностей, а также распределение пор по размерам. Для определения этих параметров внутренняя структура образцов была исследована с использованием компьютерного томографа Nordson DAGE NT500 XD7600NT Ruby (Nordson DAGE llc., Великобритания).

Технические особенности используемого оборудования позволяют получить снимки всех 4-х образцов на одной «башне», осуществив 2 снимка (Рисунок 3.14). Это избавляет от необходимости производить съёмки каждого образца в отдельности, что значительно снижает время, затраченное на анализ результатов эксперимента. С учетом сэкономленного времени на установ образца в томограф и калибровку оборудования происходит снижение

времени анализа результатов эксперимента до 30-50 минут (2-2,5 раз) на один образец-куб.



Рисунок 3.14 – Пример установка объёмного образца в зажим томографа

Тем не менее, исследование на компьютерном томографе занимает значительное время – один снимок с учетом калибровки оборудования занимает от 30 до 50 мин. С целью экономии ресурса оборудования (в т.ч. рентгеновской трубки томографа) и человеческого ресурса, были исследованы наиболее характерные образцы – №3, 6, 8, 10 и 13 (Рисунок 3.16) с известными параметрами селективной лазерной плавки (Таблица 13 – Параметры образцов, исследованных с помощью РКТТаблица 13).

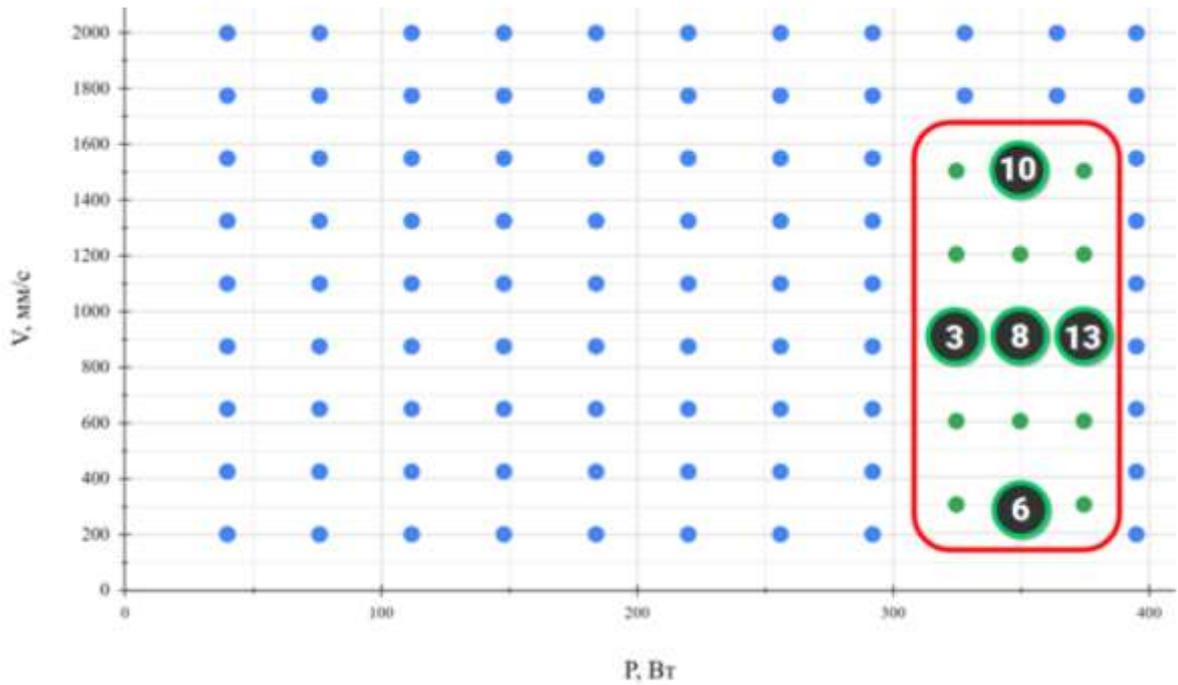


Рисунок 3.15 – Уточненный план исследования образцов методом РКТ

Таблица 13 – Параметры образцов, исследованных с помощью РКТ

№ башни	Мощность излучения, Вт	Скорость сканирования, мм/с	Энерговклад, Дж/мм ³			
			h = 30 мкм	h = 50 мкм	h = 70 мкм	h = 90 мкм
3	325	900	150,5	90,3	64,5	50,2
6	350	300	486,1	291,7	208,3	162,0
8	350	900	162,0	97,2	69,4	54,0
10	350	1500	97,2	58,3	41,6	32,4
13	375	900	173,6	104,2	74,4	57,9

Выбранные образцы представляют собой диапазон энерговклада от 32 Дж/мм³ до 486 Дж/мм³. Общий исследуемый диапазон энерговклада в распечатанных образцах составил от 30 Дж/мм³ (образец №5, 90 мкм высота слоя, 325 Вт, 1500 мм/с) до 520 Дж/мм³ (образец №11, 30 мкм высота слоя, 375 Вт, 300 мм/с). Таким образом методом РКТ были исследованы образцы характерные для 92,5% общего интервала, который был возможным для исследования после синтеза образцов. Результатом компьютерной томографии является стек – набор из множества растровых изображений формата DICOM (Рисунок 3.16).

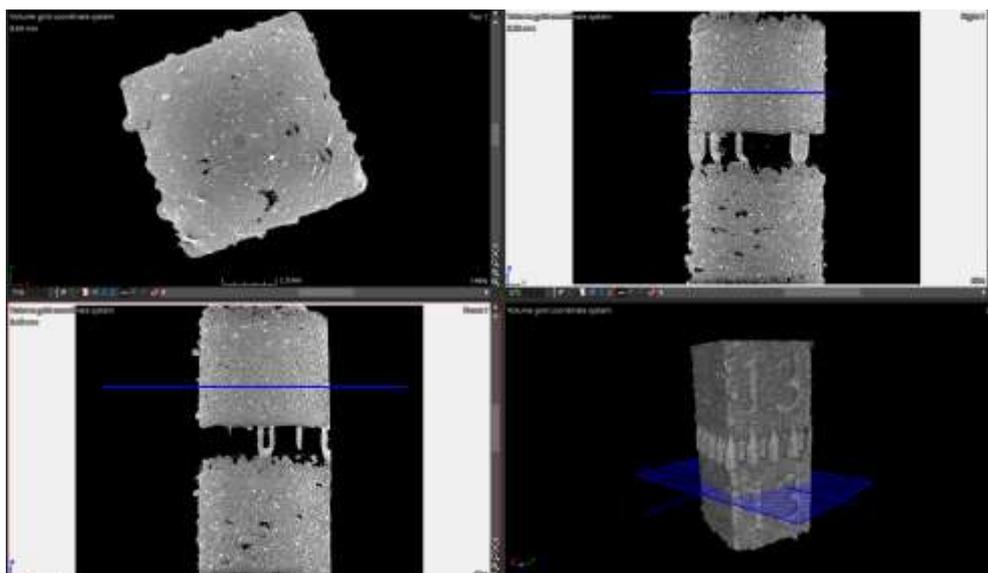


Рисунок 3.16 – Просмотр результата исследования образца из башни №13 (375 Вт, 900 мм/с) в программном комплексе MuVGL

Средний размер стека по одному образцу составил 2 ГБ. Анализ такого стека с помощью разработанного программного компонента экспресс-анализа объёмных образцов позволил оперативно установить пористость образцов – обработка 5 стеков (8000 срезов с шагом 12,5 мкм) заняла около 24 минут.

Результатом обработки в программном компоненте стали систематизированные значения пористости образцов (Таблица 14).

Таблица 14 – Результаты исследования относительной плотности образцов

№ куба	Мощность, Вт	Скорость, мм/с	Энерговклад, Дж/мм ³	Пористость	Относительная плотность
10.1	350	1500	97,2	0,50%	99,50%
10.2	350	1500	58,3	4,29%	95,71%
10.3	350	1500	41,7	6,69%	93,31%
10.4	350	1500	32,4	11,22%	88,78%
13.1	375	900	173,6	3,34%	96,66%
13.2	375	900	104,2	3,68%	96,32%
13.3	375	900	74,4	4,10%	95,90%
13.4	375	900	57,9	6,69%	93,31%
3.1	325	900	150,5	0,30%	99,70%
3.2	325	900	90,3	2,22%	97,78%

3.3	325	900	64,5	3,85%	96,15%
3.4	325	900	50,2	5,86%	94,14%
6.1	350	300	486,1	3,68%	96,32%
6.2	350	300	291,7	3,85%	96,15%
6.3	350	300	208,3	2,48%	97,52%
6.4	350	300	162,0	2,85%	97,15%
8.1	350	900	162,0	1,15%	98,85%
8.2	350	900	97,2	2,99%	97,01%
8.3	350	900	69,4	5,30%	94,70%
8.4	350	900	54,0	6,76%	93,24%

Исследованные образцы обладают относительной плотностью от 88,6% до 99,7%. Образцом с максимальной пористостью стал куб из серии №10 (350 Вт, 1500 мм/с) и высотой слоя 90 мкм – его пористость составила 11,2%. Образцом с самой высокой относительной плотностью стал куб из ряда №3 (325 Вт, 900 мм/с) и высотой слоя 30 мкм.

3.4 Выводы по главе

В данной главе приведено описание экспериментальной части исследования. Описан ход проведения экспериментов по входному контролю порошкового материала. Проведен просев порошка сплава AlSi10Mg через сита с ячейкой 30 и 60 мкм. С помощью разработанного программного компонента экспресс-анализа входного контроля ([см. раздел 4.2](#)) установлено нормальное распределение размеров частиц просеянного порошка с модами 25,215 мкм и 35,344 мкм, что соответствует паспорту материала и гарантирует насыпную плотность 2,67 г/см³, необходимую для процесса СЛП в установке Addsol D50.

Изготовлен набор из 99 образцов единичных треков для уточнения эффективного набора технологических параметров мощности и скорости. Получены снимки с оптического микроскопа, позволяющие исследовать образцы по критерию их непрерывности. Результат эксперимента обработан в программе экспресс-анализа ([см. раздел 4.3](#)). Диапазон исследуемых

параметров мощности и скорости сокращен с [40:400], Вт и [200:2000], мм/с до [220;400], Вт и [200;1400], мм/с соответственно.

Предложено конструктивно-технологическое решение, позволяющее увеличить эффективность исследования объемных образцов на установках с платформами малой площади. Изготовлено 60 образцов-кубов с вариацией параметров энерговклада (мощности, скорости и высоты слоя). Получены данные компьютерной томографии, позволяющие исследовать образцы по критериям плотности, пористости и характеру этих пор. Разброс относительной плотности для исследованных образцов составил от 88,6% до 99,7%.

Глава 4 Разработка программных компонентов экспресс-анализа экспериментов в ОТР аддитивного производства

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

4.1 Концепция разрабатываемого комплекса программных средств

Создание инструментов экспресс-анализа, способного оказывать поддержку в принятии технологических решений в соответствии с разрабатываемой методикой проведения опытных технологических работ, есть сложная и трудно формализуемая задача. В настоящее время ещё не разработан алгоритм прямого синтеза допустимого коридора оптимальных технологических параметров. В данной работе предлагается решение задачи экспресс-анализа за счёт реализации ряда специализированных программных компонентов, решающих определённые узконаправленные задачи в конкретных предметных областях. Таким образом разрабатываемый комплекс станет ещё и программным средством поддержки принятия технологических решений на этапе ОТР аддитивного производства.

Разрабатываемые программные средства также должны соответствовать требованиям к качеству современных систем технологического проектирования (см. раздел [1.2](#)). В свою очередь их использование в рамках методики поиска коридора оптимальных параметров обязано действительно решать задачу настоящего исследования по оптимизации времени, затрачиваемого на проведение опытных работ (см. раздел [1.4](#)).

4.2 Программный компонент экспресс-анализа результатов входного контроля металлопорошковых композиций (ПКЭА ВК МПК)

Разрабатываемый программный компонент позволяет осуществлять статистический контроль частиц порошка с помощью анализа СЭМ-снимков. Представлена общая логика, схема алгоритма работы программы (Рисунок 4.1), использованные инструменты для её реализации, а также разобрана практика применения ПКЭА ВК для решения задач входного контроля.

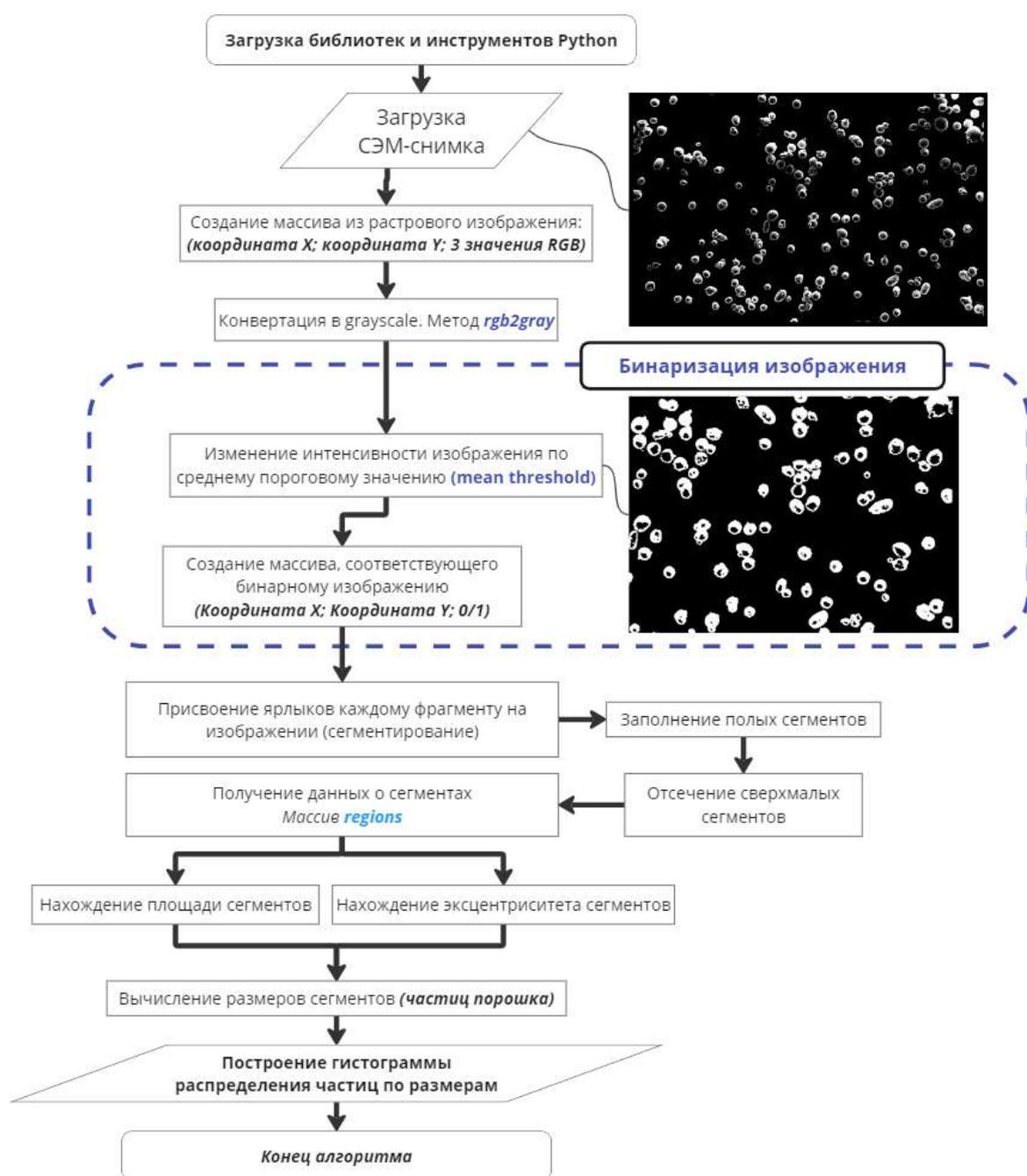


Рисунок 4.1 – Схема алгоритма программного компонента входного контроля

4.2.1 Реализация ПКЭА ВК

Для создания компонента, который позволил бы осуществлять экспресс-анализ были использованы популярные пакеты инструментов для Python:

- Numpy;
- Matplotlib;
- Seaborn;
- Scikit-image;

Numpy – основная библиотека для численных вычислений в Python. Она предоставляет поддержку для работы с большими многомерными массивами и матрицами, а также содержит математические функции для операций с этими массивами. В рамках разрабатываемого программного компонента numpy используется для работы с массивами изображений и для выполнения различных математических операций, таких как определение 75-го перцентиля.

Matplotlib.pyplot (отдельный модуль библиотеки графиков и визуализаций Matplotlib) предоставляет функции для создания различных статических, анимированных и интерактивных визуализаций в Python. В ПКЭА модуль используется для отображения СЭМ-снимков непосредственно в среде разработки, а также для создания графиков функции плотности распределения (в т.ч. и гистограмм).

Seaborn – библиотека визуализации данных на основе Matplotlib. Она предоставляет интерфейс высокого уровня для создания красочных и информативных графиков. Seaborn используется для создания графика плотности (kdeplot), который показывает распределение интенсивности пикселей на изображении.

Skimage (scikit-image) это библиотека для обработки изображений для Python. Она включает в себя множество алгоритмов для обработки и анализа

изображений. В данном программном компоненте используются следующие методы данной библиотеки:

- `io.imread` используется для загрузки изображений;
- `exposure.rescale_intensity` для пересчета интенсивности изображения;
- `rgb2gray` для преобразования изображения в оттенки серого.
- Функции для пороговой обработки (`try_all_threshold`, `threshold_mean` и др.) для определения оптимального порога для бинаризации изображения;
- `label` и `regionprops` для маркировки связанных областей на изображении и анализа их свойств

Также используется модуль `scipy.ndimage` из библиотеки SciPy. Модуль предоставляет набор функций для многомерной обработки изображений. Функции `binary_fill_holes`, `binary_erosion`, `binary_dilation` и `binary_opening` из данного модуля используются для обработки изображений, что помогает улучшить качество выделения частиц порошка.

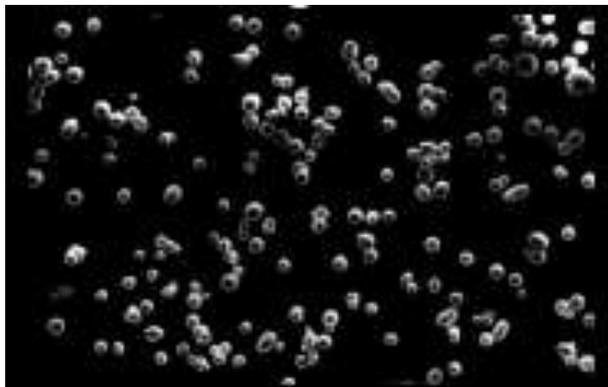
После импорта всех необходимых инструментов реализован блок-обработчик изображений порошка, полученных с помощью СЭМ.

Обработка начинается с загрузки фотографии с помощью функции `io.imread` из библиотеки `skimage`. Она автоматически определяет тип изображения (PNG, JPG) и возвращает изображение в виде массива `numpy`, где каждый элемент соответствует пикселю изображения – в массив вносятся координаты пикселя и значения RGB-цветов пикселя.

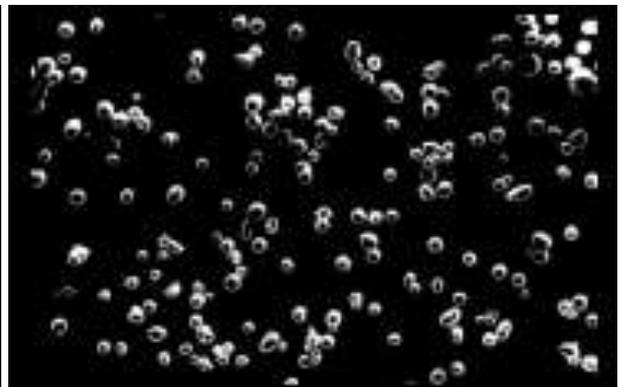
RGB-изображение преобразуется в оттенки серого методом `rgb2gray` (`skimage.color`). Это происходит с помощью усреднения значения каналов RGB с учетом их весов, чтобы получить одно значение интенсивности для каждого пикселя.

Дальнейшая работа направлена на получение четкого и контрастного черно-белого изображения гранул порошка (белый цвет) на черном фоне. Сначала функция `exposure.rescale_intensity` (`skimage.exposure`) изменяет диапазон интенсивности изображения. Это устанавливает диапазон значений интенсивности для каждого пикселя от 0 до 255.

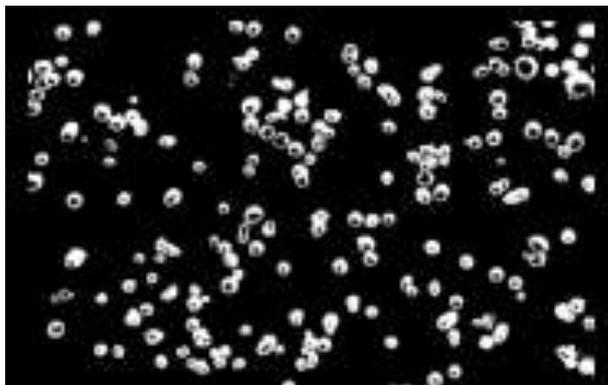
Поиск методов по улучшению контрастности выделения гранул порошка на черном фоне привёл к применению различных методов пороговой обработки изображений из библиотеки `scikit-image` для определения наиболее результативного метода бинаризации изображения (Рисунок 4.2).



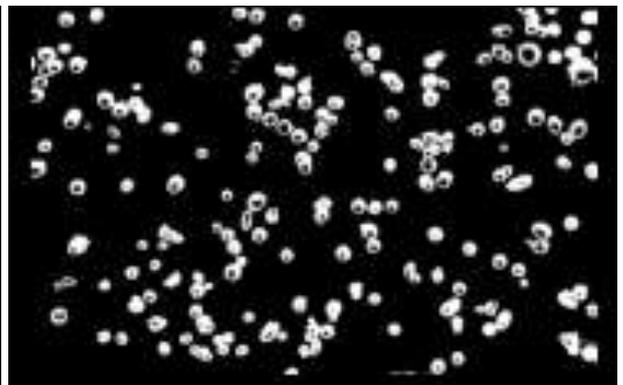
а)



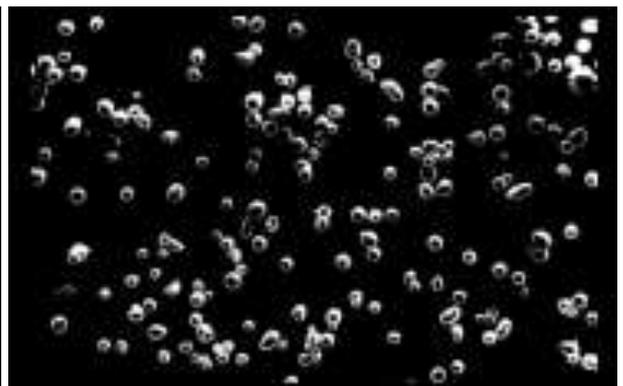
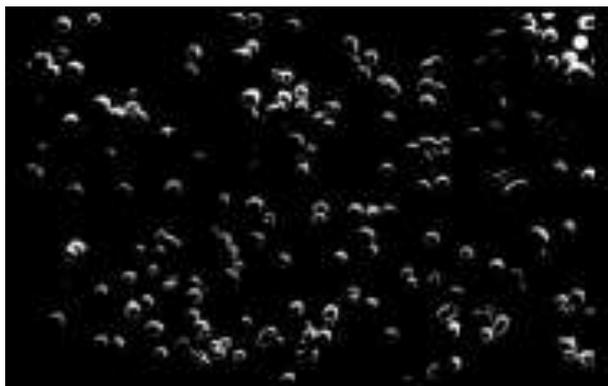
б)



в)



г)



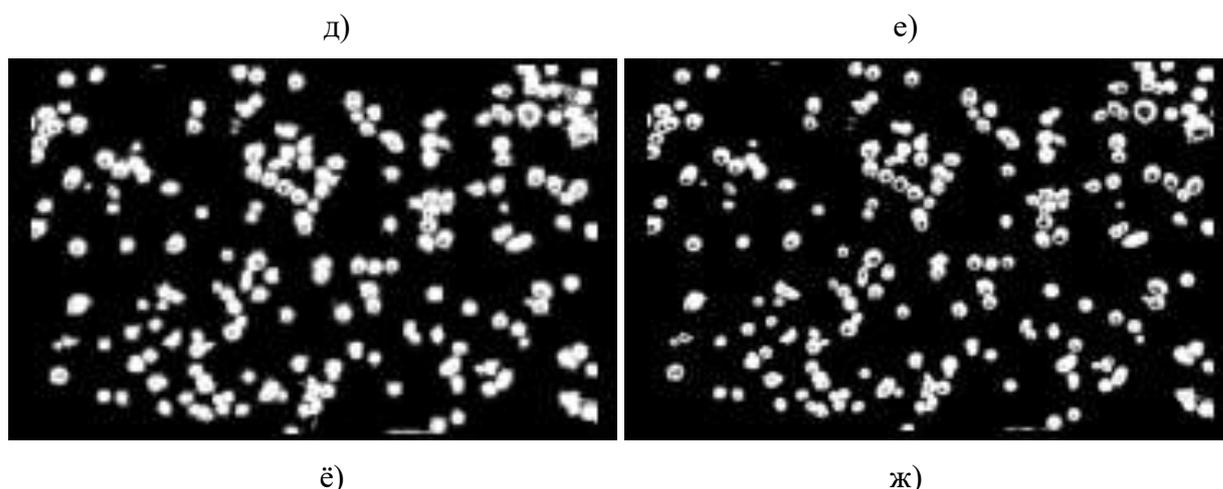


Рисунок 4.2 – Методы пороговой обработки изображений СЭМ-снимков порошка: а) Оригинальный СЭМ-снимок; б) Обработка методом итерации (изодаты); в) метод Ли; г) метод среднего значения; д) метод минимального значения; е) метод Оцу; ё) метод треугольника; ж) Метод Йена.

С точки зрения контрастности, чёткости изображения, а также сохранения деталей СЭМ-снимка был выбран метод среднего значения (mean threshold). По нему и была проведена бинаризация изображения – процесс преобразования изображения в оттенках серого в двоичное изображение, где каждый пиксель может принимать только одно из двух значений (обычно 0 или 1). Это делается на основе заданного порога: пиксели с интенсивностью выше порога получают значение 1, а все остальные - значение 0.

После бинаризации производится маркировка связанных областей (наборов пикселей) в изображении с помощью функции label. Эта функция идентифицирует и маркирует связанные области на бинаризованном изображении. Каждая связанная область (или группа соседних пикселей с одинаковым значением) получает уникальный идентификатор.

Области, внутри которых есть темные пиксели (значения цвета бинаризованного изображения равно нулю) заполняются с помощью метода `ndimage.binary_fill_holes`.

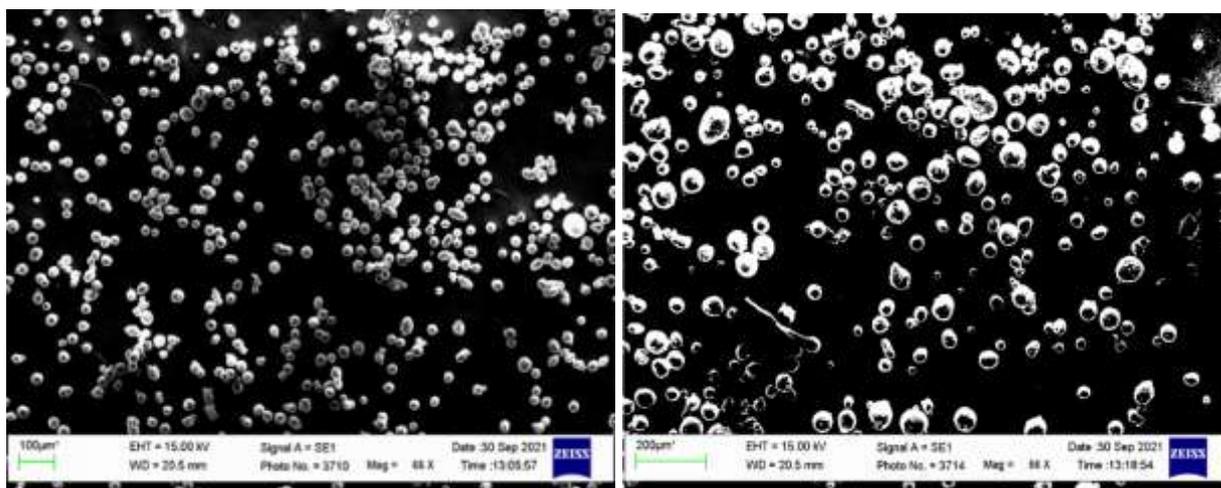
Чтобы избавиться от областей, состоящих из небольшого количества пикселей (шум) производятся последовательные операции эрозии (сжатия

областей) и дилатации (увеличения областей). После эрозии исчезают области минимального размера.

Очищенное изображение анализируется инструментами библиотеки `skimage.measure`. Методы позволяют определить различные свойства области. Для данной работы вычисляется размер частиц, их площадь и эксцентриситет. В свою очередь библиотека `Numpy` и модуль `seaborn` позволяют определить распределение частиц по интервалам размеров, посчитать процентиль и построить гистограмму этого распределения.

4.2.2 Применение ПКЭА ВК для статистического анализа порошка

Применение описанных инструментов и методов для обработки и анализа снимков порошка AlSi10Mg , полученных с помощью СЭМ, начинается с импорта изображений в формате PNG (Рисунок 4.3).



а)

б)

Рисунок 4.3 – СЭМ-снимки результатов просева порошка AlSi10Mg : а) просев через сито с ячейкой 30 мкм; б) просев через сито с ячейкой 60 мкм.

Изображение загружается и сохраняется в обработчик в переменной `img`. Эта переменная представляет собой массив из $i * j$ элементов, где i – ширина изображения в пикселях, а j – его высота. Это изображение становится основой для всех последующих операций обработки.

Изображение преобразуется в оттенки серого с помощью функции `rgb2gray`, его интенсивность пересчитывается таким образом, чтобы она

соответствовала диапазону `np.uint8` (значения от 0 до 255). Это делается для того, чтобы упростить последующую пороговую обработку и другие операции, которые требуют определенного диапазона интенсивности. После выполнения этих операций у обработчика готово изображение в оттенках серого с оптимизированным диапазоном интенсивности, готовое к пороговой обработке и бинаризации.

Применение пороговой обработки методом `threshold_mean` позволяет получить бинаризованное изображение (Рисунок 4.4). Пиксели, относящиеся к частицам порошка представляются как белые области (значение 1), а фон – как черные области (значение 0).

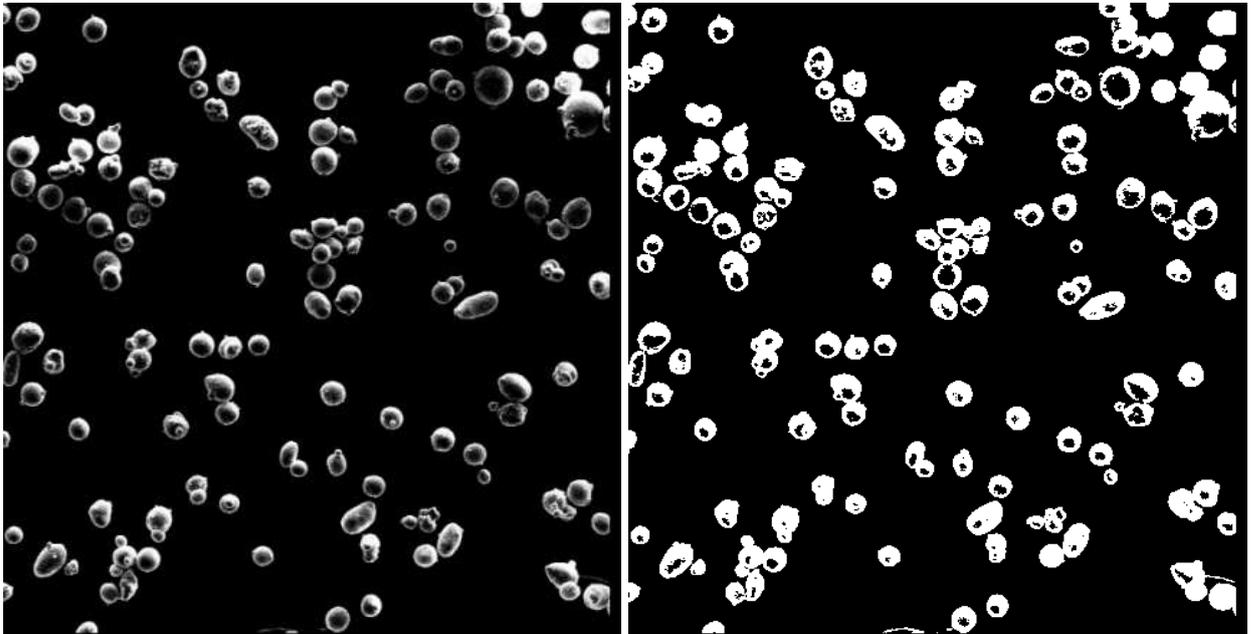


Рисунок 4.4 – Пример пороговой обработки фрагмента СЭМ-снимка с помощью метода `threshold_mean`: до (а) и после бинаризации (б)

После бинаризации изображения происходит идентификация связанных областей, присвоение им уникального маркера (`label`). Это позволяет различать отдельные частицы порошка на изображении (Рисунок 4.5).

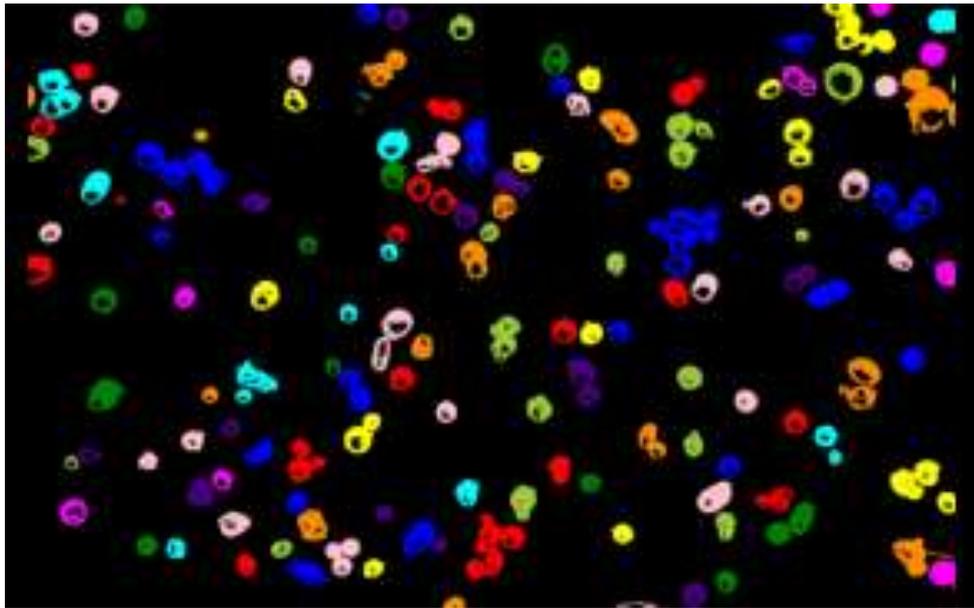


Рисунок 4.5 – Пример маркировки связанных областей с помощью функции `label`

Функция `ndimage.binary_fill_holes` из библиотеки `scipy.ndimage` устраняет отверстия в связанных областях (темные пиксели принадлежащие частицам порошка на бинаризованном изображении). С помощью последующих операций эрозии и дилатации убирается шум (Рисунок 4.6).

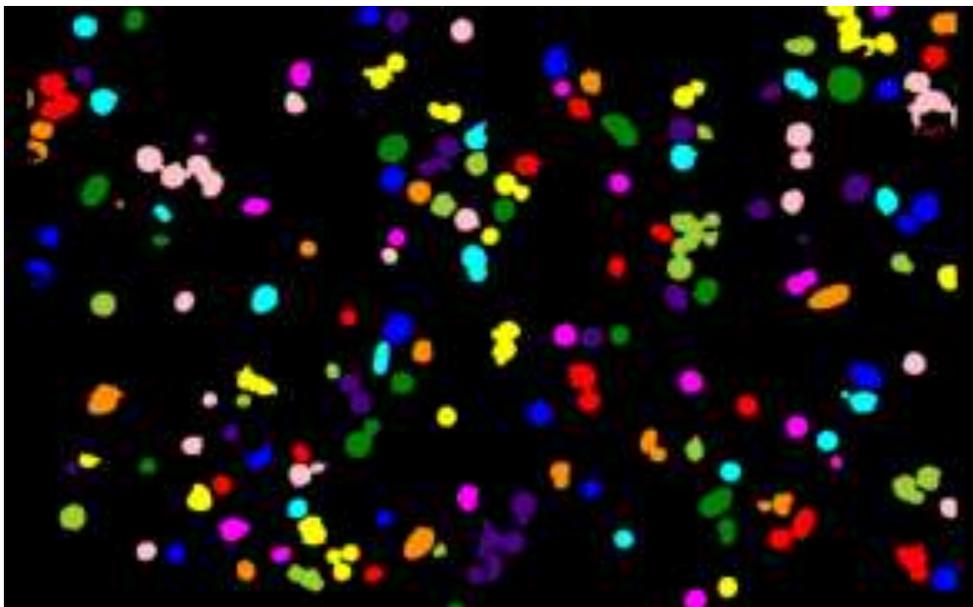


Рисунок 4.6 – Заполненные области, представляющие частицы порошка на изображении

Используя методы из библиотеки `skimage.measure` для каждой связанной области (`region`) находится площадь с помощью метода `region.area` и эксцентриситет методом `region.eccentricity`. Это позволяет посчитать линейный размер связанной области. Этот размер приблизительно равен

большой полуоси условного эллипса, описывающего связанную область. В результате вычислений, строится гистограмма распределения частиц по размерам. Результаты этого исследования подробно представлены [в разделе 3.1](#) настоящей работы.

4.3 Программный компонент экспресс-анализа единичных треков (ПКЭА ЕТ)

Разрабатываемый программный компонент позволяет осуществлять оперативный анализ изображений единичных треков, снятых с помощью оптического микроскопа.

4.3.1 Реализация и применение ПКЭА ЕТ для анализа экспериментов

На языке Python разработан программный инструмент для экспресс-анализа изображений единичных треков на виде сверху. Программа состоит из двух частей – блока обработки исходных данных и блока визуализации.

Исходным материалом для работы программы-обработчика являются растровые изображения единичных треков в формате JPG/PNG, полученных с помощью оптического микроскопа. Блок визуализации позволяет наглядно представить результаты экспресс-анализа по обработанным данным. Представлена логика реализации программного компонента и схема алгоритма его работы по обработке изображений треков (Рисунок 4.7).

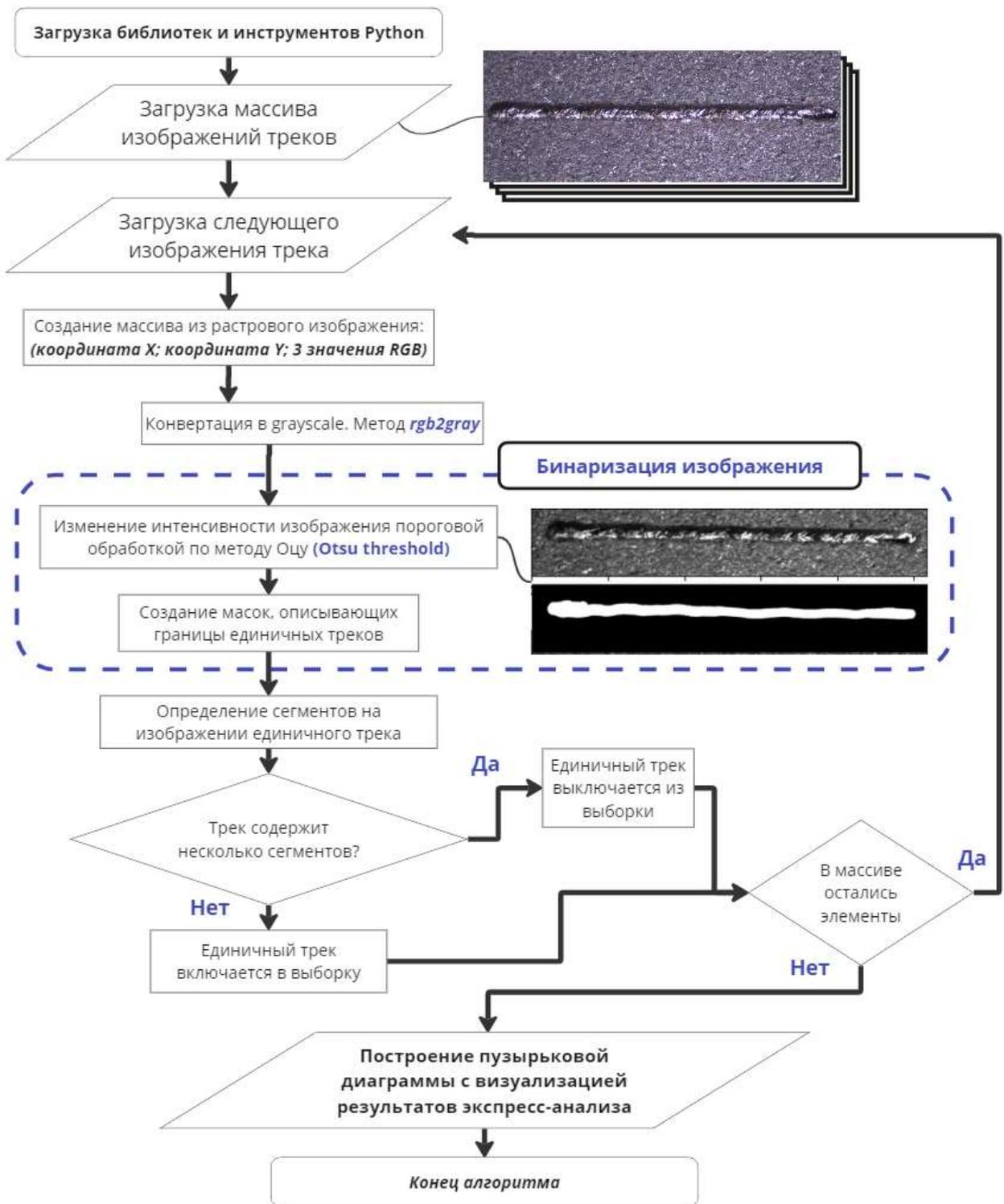


Рисунок 4.7 – Схема алгоритма компонента экспресс-анализа единичных треков

Автоматизированная обработка экспериментальных данных начинается с получения на «вход» программы набора изображений с единичными

треками. Для каждого изображения генерируется маска, отражающая площадь, которую занимает трек на изображении (Рисунок 4.8).

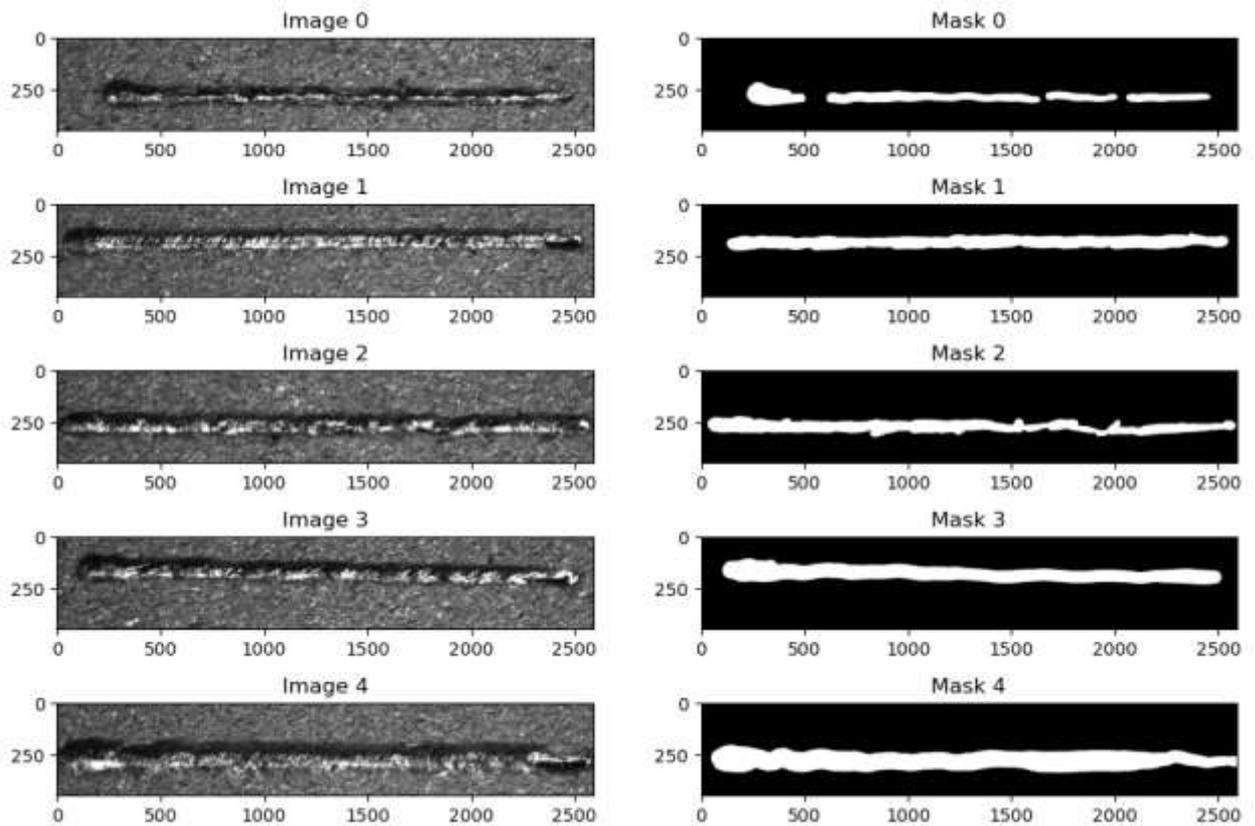


Рисунок 4.8 – Автоматически полученные маски единичных треков

В основе построения чёрно-белых изображений лежит метод бинаризации (пороговой обработки изображений), позволяющий при заданных пороговых значения, отделить трек от пластины. В процессе поиска подходящего алгоритма была испробовано множество методов.

В итоге по совокупности факторов для получения пороговых значений (масок, выделяющих трек на виде сверху) используется алгоритм Оцу. Для каждого снимка строится гистограмма распределения интенсивности полутонового изображения, а затем находится пороговое значение, при котором минимизируется внутриклассовая дисперсия, σ_w :

$$\sigma_w^2 = \frac{w_1^2 \sigma_1^2 + w_2^2 \sigma_2^2}{w_1^2 + w_2^2},$$

где w_1 и w_2 - веса классов, σ_1 и σ_2 - дисперсии классов.

После этого изображение разделяется на два класса, материал трека (белый цвет – 1) и задний фон (чёрный цвет – 0) с помощью найденного порогового значения. Для обработки маски трека, полученной методом Оцу используется морфологическая операция "открытия" и "закрытия" (эрозии и дилатации), позволяя более чётко разделить трек и задний фон, удаляя за счёт такой симметричной операции ненужный шум. Полученная маска трека применяется для выделения трека на изображении, а также для вычисления площади трека.

Разработан инструмент, позволяющий определить непрерывность трека на изображении. Маска, полученная на предыдущем шаге, сегментируется – выделяются «острова» маски (Рисунок 4.9).

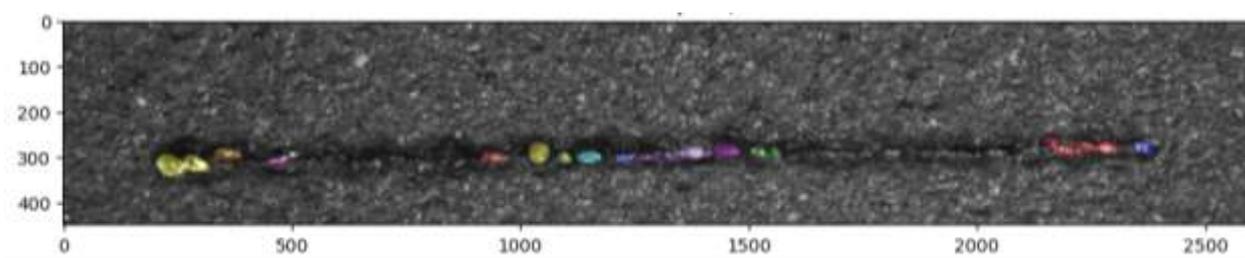


Рисунок 4.9 – Сегментация фрагментов маски для прерывистого трека

Фотографии прерывистых треков таким образом содержат несколько сегментов. Несплавление единичного трека – явный индикатор недостаточного энерговклада при воздействии лазером на слой металлического порошка. А значит, этот трек и пара параметров «мощность-скорость» исключаются из дальнейшего рассмотрения. Таким образом, во вторую часть работы ПКЭА ЕТ попадают непрерывные треки, у которых маска не дробится на отдельные, несвязанные друг с другом, сегменты.

На основе данных о непрерывности трека, а также известных значениях мощности и скорости строится пузырьковая диаграмма, позволяющая наглядно представить результаты эксперимента с единичными треками (Рисунок 4.10).

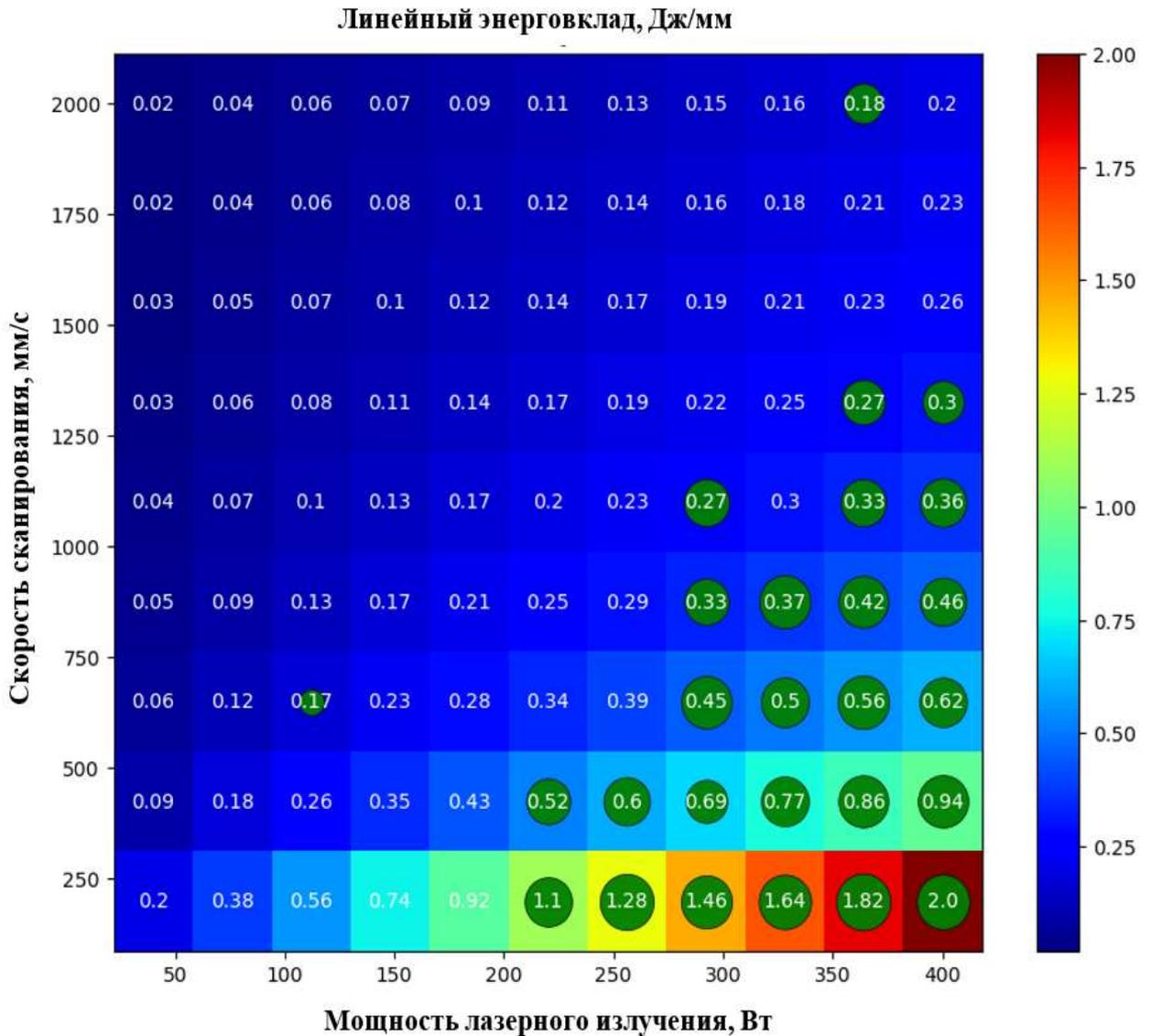


Рисунок 4.10 – Работа блока визуализации ПКЭА ЕТ, зелёными кругами выделены непрерывные единичные треки, отобранные методом исключения

Предложенный инструмент позволяет реализовать этапы анализа и визуализации данных эксперимента с единичными треками. Работа по сформированной методике позволяет оперативно проанализировать и систематизировать результаты начальных этапов ОТР без необходимости тщательного рассмотрения большого количества фотографий вручную.

4.4 Программный компонент экспресс-анализа объёмных образцов (ПКЭА ОО)

Разрабатываемый программный компонент позволяет осуществлять экспресс-анализ пористости объёмных образцов кубов и проводить визуализацию результатов этого экспресс-анализа.

4.4.1 Реализация ПКЭА ОО

Исходным материалом для работы программы-обработчика являются снимки, полученные методом рентгеновской компьютерной томографии, в формате «.raw». Ниже представлена логика реализации программного компонента и схема алгоритма его работы (Рисунок 4.11).

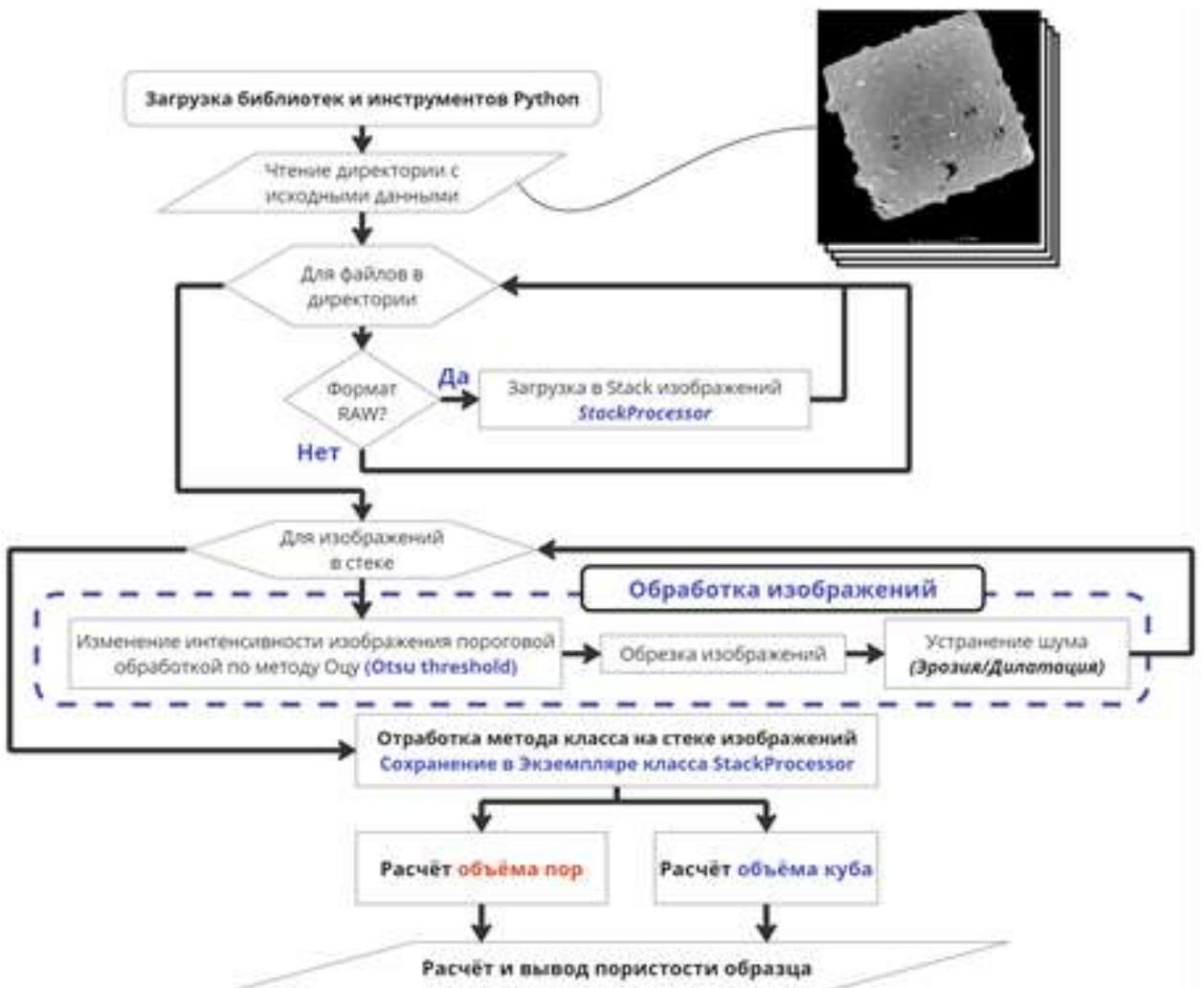


Рисунок 4.11 – Блок-схема алгоритма программного компонента

Для создания ПКЭА ОО, были использованы популярные библиотеки и модули инструментов для Python. Помимо уже описанных в [разделе 4.2](#) инструментов были применены также модули “OS”, “Pandas” и “warnings”.

Модуль OS предоставляет множество функций для работы с операционной системой, включая чтение или запись файлов, взаимодействие с файловой системой и так далее. Он нужен для работы с путями к файлам и директориям, содержащим результаты исследований (данные томографии и снимки шлифов).

Pandas – обширная библиотека для анализа данных в Python, предоставляющая структуры данных и функции, необходимые для работы с структурированными данными. В коде Pandas используется для создания и обработки таблиц DataFrame, с помощью которых можно хранить и манипулировать структурированными данными: добавлять, удалять или изменять как строки, так и столбцы, проводить группировку, агрегацию, слияние данных и многое другое. Помимо этого, данные можно экспортировать в CSV и XLSX файлы, что открывает дополнительные возможности для анализа данных в других программных комплексах.

4.4.2 Применение ПКЭА ОО для анализа экспериментов

После импорта необходимых библиотек и модулей Python (imageProcessor, Pandas, OS, Matplotlib и NumPy) программный модуль запрашивает адрес директории с raw-файлами, полученными с помощью РКТ. Файл сохраняется в переменной input_path. Дополнительно указывается ширина и высота изображений формата «.raw» в переменных width и height.

Создаётся пустая таблица формата DataFrame с названием df_towers, которая будет использоваться для хранения результатов анализа для каждого образца-кубика. Каждая строка таблицы представляет один образец и

содержит информацию о его объёме пор, объёме всего куба и относительной плотности.

Программа начинает итерацию (последовательный перебор) по всем файлам в указанном каталоге `input_path`. Для каждого файла с расширением «.raw» (предполагается, что это данные КТ) проводится набор операций, описанных в классах `StackReader`, `ImageProcessor` и `StackProcessor` – соответственно чтение КТ-снимка, обработка изображений и обработка стека изображений, принадлежащих одному кубу.

В первую очередь в стек (экземпляр класса `StackProcessor`) выгружаются все изображения, принадлежащие одному образцу. Далее работа проводится уже внутри стека.

Следующий в стеке КТ-снимок загружается и бинаризуется с помощью пороговой обработки – используется метод Отцу для получения порогового значения (Рисунок 4.12).

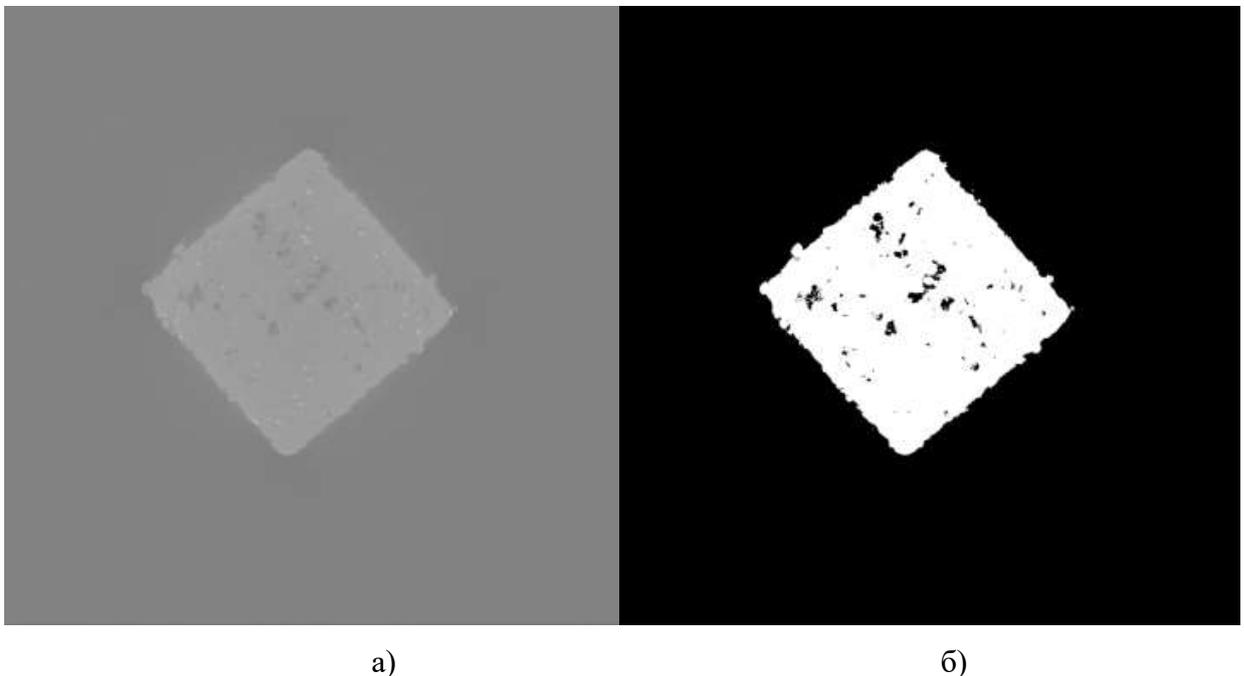
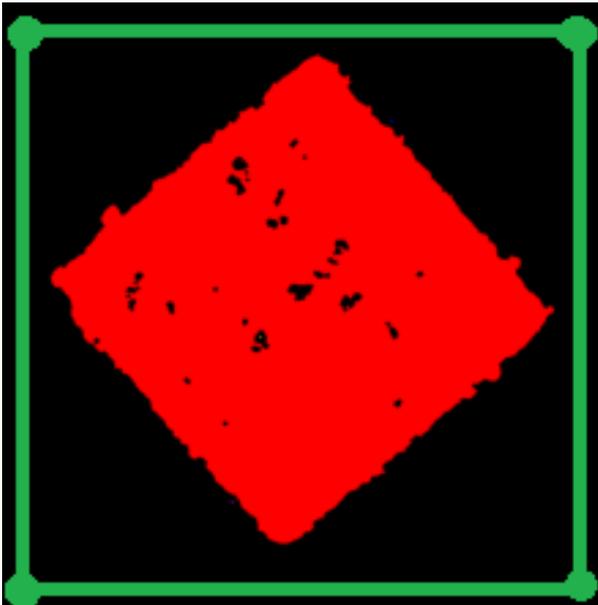


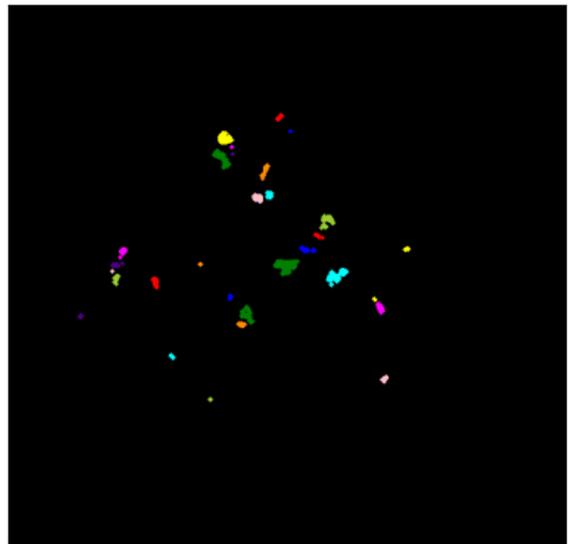
Рисунок 4.12 – Пример обработки одного из КТ-снимков куба с помощью метода Отцу: до (а) и после бинаризации (б)

Лишняя площадь снимка (черные фрагменты изображения вокруг слоя куба) отрезаются с помощью ограничивающего прямоугольника. Связанные

белые участки куба на изображении маркируются с помощью функции `skimage.Label()`. Маркировка (labeling) позволяет выделить отдельные площади бинаризованного изображения относящиеся к кубу без пор, и посчитать их площадь, необходимую для подсчёта объёма синтезированного материала (Рисунок 4.13, а). Точно таким же образом маркируются и области, которые относятся к порам в каждом отдельном сечении (Рисунок 4.13, б)



а)



б)

Рисунок 4.13 – Работа с бинаризованным изображением куба:

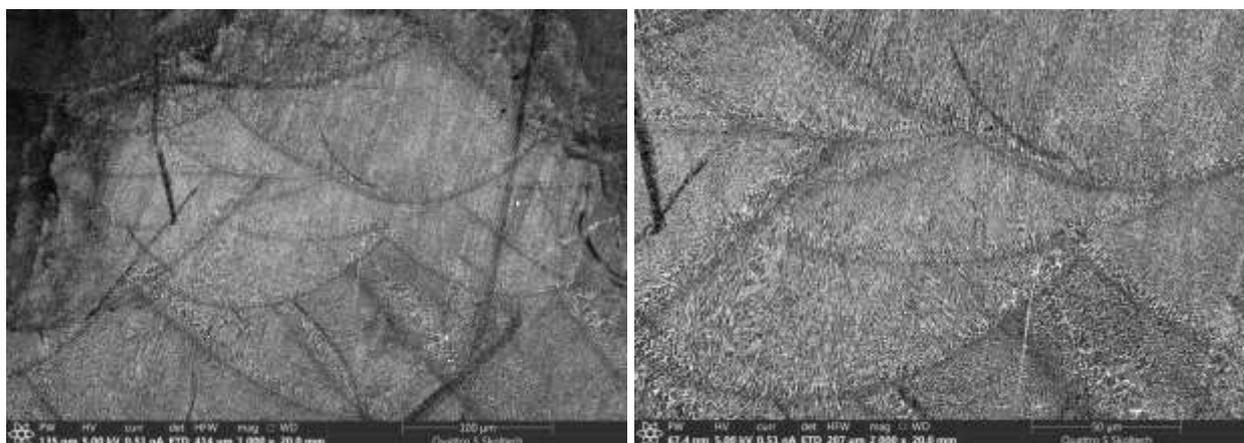
а) обрезка и маркировка областей; б) выделенные сегменты, относящиеся к порам образца

После завершения процедуры с отдельным слоем-картинкой стека, процесс повторяется, пока алгоритм не пройдет весь стек КТ-снимков. Результаты сохраняются, считается относительная плотность образца и выводится в таблицу Microsoft Excel, где с ней уже работает оператор или инженер-технолог установки аддитивного производства.

4.5 Исследование микроструктуры образцов

Для образцов, выращенных по предложенным векторам технологических параметров (Таблица 14), были изготовлены шлифы, изученные с помощью сканирующего электронного микроскопа. Таким образом, подготовлена библиотека изображений морфологии микроструктуры образцов, охватывающая 41,6% интервала всех допустимых параметров или 92,5% интервала параметров, дающих непрерывный единичный трек при селективной лазерной плавке металлопорошковой композиции сплава AlSi10Mg на отечественной установке Addsol D50.

Полученные изображения позволяют оценить морфологию структуры выращенных образцов, характер плавки треков материала в объемном образце, изготовленном методом селективной лазерной плавки из порошка сплава AlSi10Mg (Рисунок 4.14).



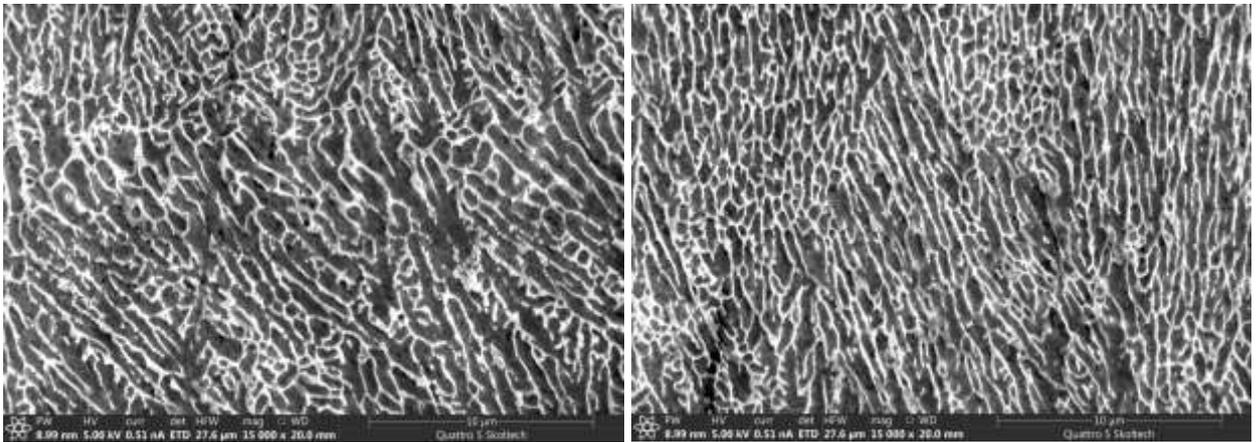
а)

б)

Рисунок 4.14 – СЭМ-снимки микроструктуры металлографического образца с увеличением в 1000 раз (а) и 2000 раз (б)

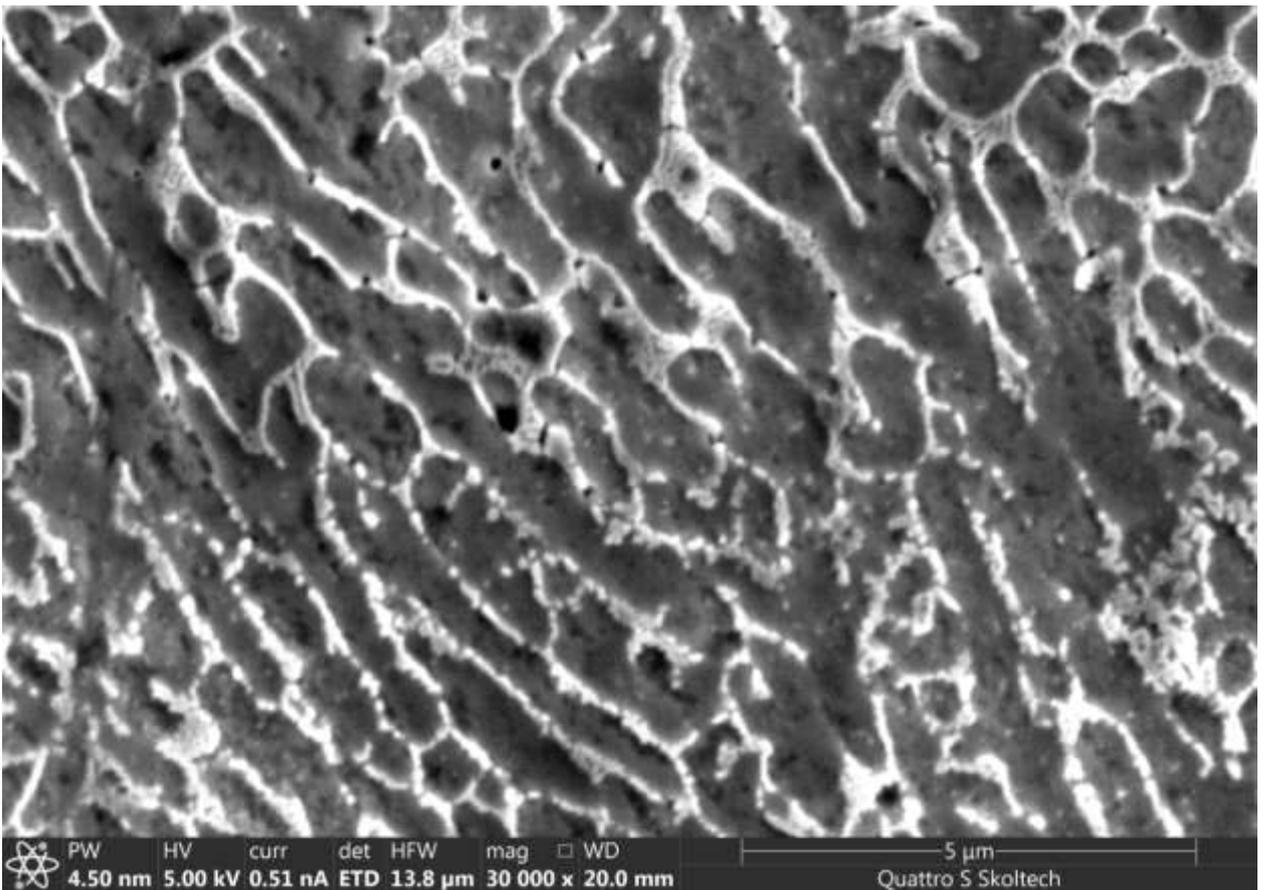
Изображения, полученные сканирующим электронным микроскопом при увеличении в 15 000 раз (Рисунок 4.15, а, б) и увеличении в 30 000 раз (Рисунок 4.15, в), позволяют измерить размер зерна фазы алюминия, а также позволяют отчетливо увидеть направление роста зёрен в сплаве, что позволяет сделать предварительные выводы об анизотропии механических свойств. Как следует из анализа литературных источников, прочностные свойства изделий

выравниваются вдоль направления роста зёрен – почти всегда в направлении выращивания и, как следствие, направлении охлаждения ванны расплава. Это подтверждается для ряда параметров, для которых были изготовлены образцы для испытаний на растяжение.



а)

б)



в)

Рисунок 4.15 – СЭМ-снимки микроструктуры шлифов, снятые с увеличением в 10 000 раз с наведением на границу ванны расплава (а), на центр ванны расплава (б), а также снимок, полученный с увеличением в 30 000 раз (в)

Всего подготовлено по 5 изображений на каждый образец (в общей сложности 100 снимков со сканирующего электронного микроскопа).

4.6 Определение зависимости между технологическими параметрами процесса СЛП и критериями качества выращенных образцов

Результаты исследований пористости, микроструктуры и механических свойств были сопоставлены с соответствующими технологическими параметрами (мощности, скорости и высоты слоя) с целью сделать качественный вывод о связи между параметрами технологического процесса и критериями качества выращенных образцов и изделий.

Из исследованных объемных образцов, обладающих пористостью от 0,3% до 11,4%, были отобраны три вектора параметров процесса СЛП, дающие высокую относительную плотность – выше 98,5% (Таблица 15).

Таблица 15 – Образцы, отобранные по критерию относительной плотности (выше 98,5%)

№	Вектор технологических параметров					Относит. плотность
	Мощность, Вт	Скорость сканирования, мм/с	Высота слоя, мкм	Шаг штриховки, мкм	Энерговклад, Дж/мм ³	
10.1	350	1500	30	80	97,222	99,5%
3.1	325	900			150,463	99,7%
8.1	350	900			162,037	98,85%

Результат анализа литературы позволяет заключить, что пористость не ниже 97% обеспечивает воспроизводимость результатов механических характеристик (для предела прочности – не ниже 270 МПа). Таким образом возможно использовать дополнительно параметры, обеспечивающие баланс между более высокой скоростью синтеза (за счёт увеличения высоты слоя) и механическими характеристиками изделий (Таблица 16).

Таблица 16 – Образцы, отобранные по критерию относительной плотности (выше 97%)

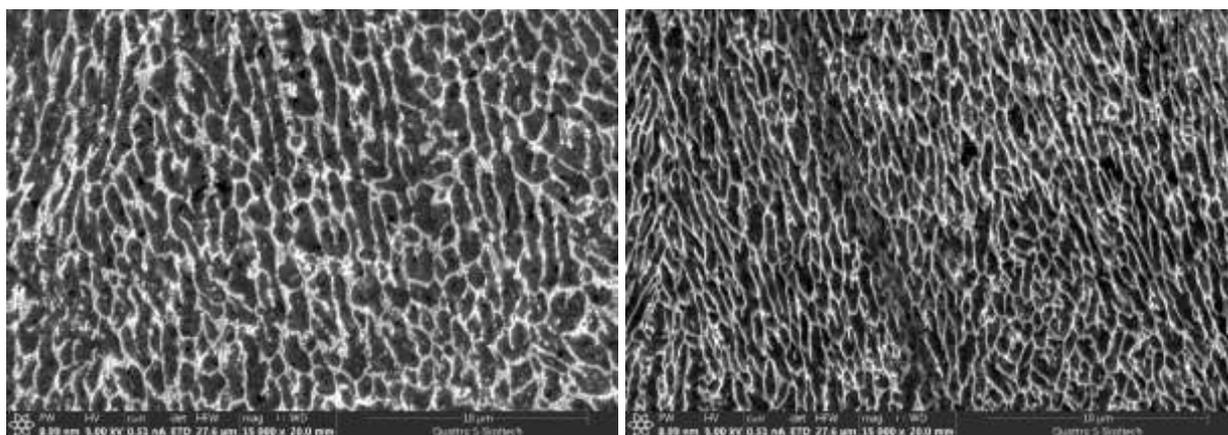
№	Вектор технологических параметров					Относит. плотность
	Мощность, Вт	Скорость сканирования, мм/с	Высота слоя, мкм	Шаг штриховки, мкм	Энерговклад, Дж/мм ³	
6.3	350	300	70	80	208,333	97,52%
6.4	350	300	90		162,037	97,15%
8.2	350	900	50		97,22	97,01%
3.2	325	900	50		90,278	97,78%

Результаты механических испытаний (Таблица 17) показывают, что для образцов для испытаний на растяжение, изготовленных по параметрам, обеспечивающим пористость не выше 3%, полученных по установленным технологическим режимам СЛП, среднее значение предела прочности не опускается ниже 282,6 МПа, среднее значение предела текучести – не ниже 203,4 МПа.

Таблица 17 – Механические свойства образцов, выращенных по отобранным параметрам

№	Вектор параметров		Относит. плотность	Механические характеристики		
	[Мощность, Вт; Скорость мм/с; Высота слоя, мкм]	Энерговклад, Дж/мм ³		Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Среднее относит. удлинение
10.1	[350; 1500; 30]	97,222	99,5%	$\frac{318,2 - 326,9}{321,7}$	$\frac{235,5 - 242,8}{238,8}$	1,78%
3.1	[325; 900; 30]	150,463	99,7%	$\frac{317,8 - 327,2}{323,0}$	$\frac{225,6 - 236,2}{230,3}$	2,65%
8.1	[350; 900; 30]	162,037	98,85%	$\frac{319,4 - 324,4}{320,9}$	$\frac{240,3 - 246,3}{242,9}$	2,06%
6.3	[350; 300; 70]	208,333	97,52%	$\frac{295,5 - 300,3}{297,3}$	$\frac{206,8 - 212,0}{210,3}$	4,80%
3.2	[325; 900; 50]	90,278	97,78%	$\frac{295,3 - 300,6}{297,8}$	$\frac{218,5 - 232,9}{226,1}$	5,91%
8.2	[350; 900; 50]	97,222	97,01%	$\frac{281,3 - 284,5}{282,6}$	$\frac{211,0 - 225,3}{219,7}$	5,44%
6.4	[350; 300; 90]	162,037	97,15%	$\frac{286,8 - 297,4}{292,8}$	$\frac{200,8 - 206,3}{203,4}$	6,57%

Так, для образцов с минимальной пористостью – ниже 1% (3.1 и 10.1, Таблица 15) – характерна сплошная однородная дендритно-ячеистая микроструктура с незначительной ориентировкой зёрен в направлении роста образцов. Средний размер зёрен не превышает 1-2 мкм, что видно на снимках, полученных СЭМ (Рисунок 4.16). Такая микроструктура свидетельствует о высокой прочности изделий, изготовленных по соответствующим параметрам, что подтверждается результатами испытаний на растяжение.



а)

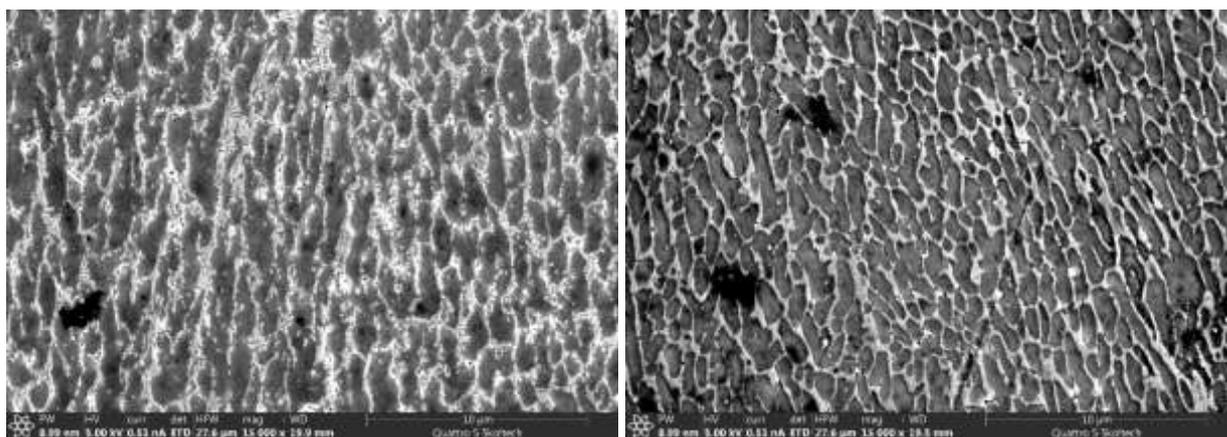
б)

Рисунок 4.16 – СЭМ-снимки микроструктуры образцов с пористостью не выше 1%:

а) **образец 3.1:** 325 Вт, 900 мм/с, слой 30 мкм, 150,5 Дж/мм³, отн. плотность – 99,7%.
Предел прочности (средн.) – 323,0 МПа ; относительное удлинение (средн.) – 2,65%.

б) **образец 10.1:** 350 Вт, 1500 мм/с, слой 30 мкм, 97,2 Дж/мм³, отн. плотность – 99,5%.
Предел прочности (средн.) – 321,7 МПа; относительное удлинение (средн.) – 1,78%.

С другой стороны, образцы с более высокой пористостью (6.3 и 3.2, Таблица 16) характеризуются увеличенным размером зёрен – вплоть до 2-4 мкм. Также на шлифах заметна преимущественная ориентация зёрен в направлении выращивания (Рисунок 4.17). Образцы с такой микроструктурой обладают меньшей прочностью, но более высокой пластичностью. Увеличенная протяженность зёрен и их ориентация обеспечивают более высокие значения относительного удлинения в направлении роста, что также подтверждено результатами механических испытаний.



а)

б)

Рисунок 4.17 – СЭМ-снимки микроструктуры образцов с пористостью не выше 3%:

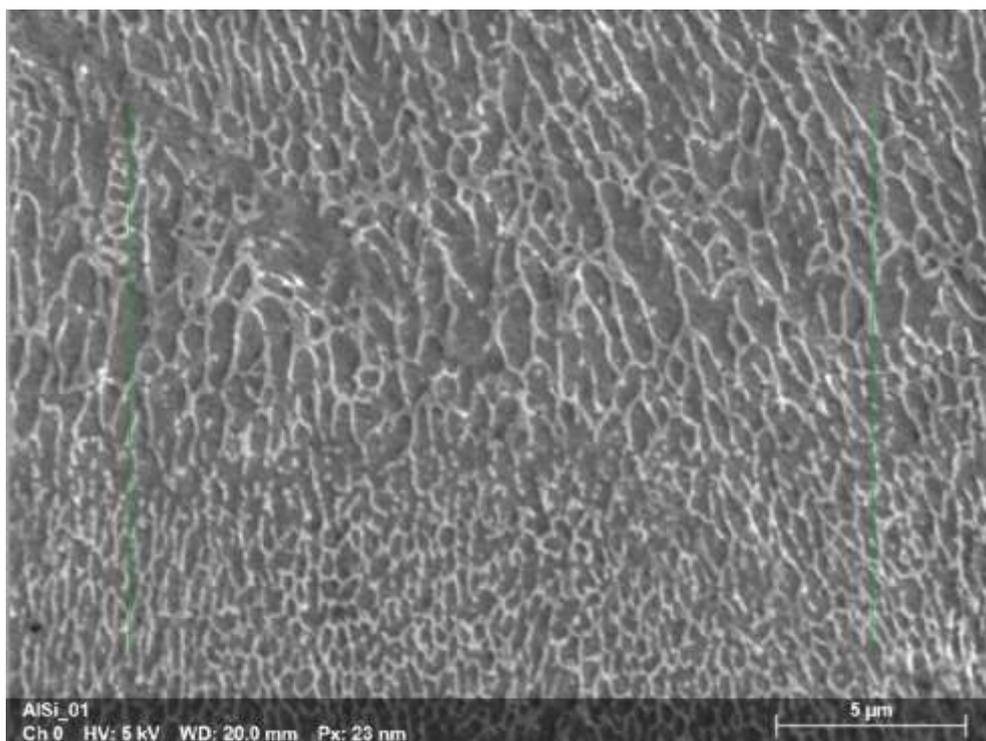
а) **образец 6.3:** 350 Вт, 300 мм/с, слой 70 мкм, 208,3 Дж/мм³, относит. плотность – 97,52%
Предел прочности (средн.) – 297,3 МПа; относительное удлинение (средн.) – 4,80%.

б) **образец 3.2:** 325 Вт, 900 мм/с, слой 50 мкм, 90,3 Дж/мм³, относит. плотность – 97,78%
Предел прочности (средн.) – 297,8 МПа; относительное удлинение (средн.) – 5,91%.

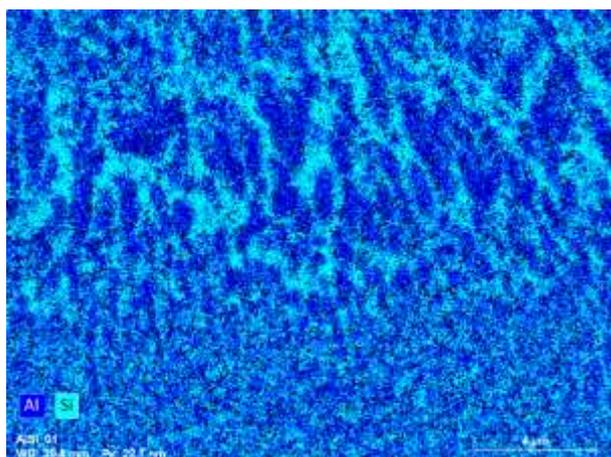
Увеличение высоты слоя порошка при выращивании изделий приводит к росту размеров ванны расплава, что обуславливает уменьшение температурных градиентов в процессе лазерной экспозиции порошка сплава AlSi10Mg и, как следствие, способствует укрупнению зёрен твердого раствора на основе алюминия (α -Al). Фаза кремния содержится преимущественно в эвтектике (Al + Si), окаймляющей зерна α -Al (светлые области на рисунках 4.16 и 4.17).

Дополнительно был проведен локальный анализ химического состава выращенных образцов с помощью системы энергодисперсионной спектроскопии. Результат, хотя и не является полной картой состава образца, позволяет оценить распределение основных структурных составляющих (Al-Si-Mg) на отдельном участке подготовленных шлифов (Рисунок 4.18).

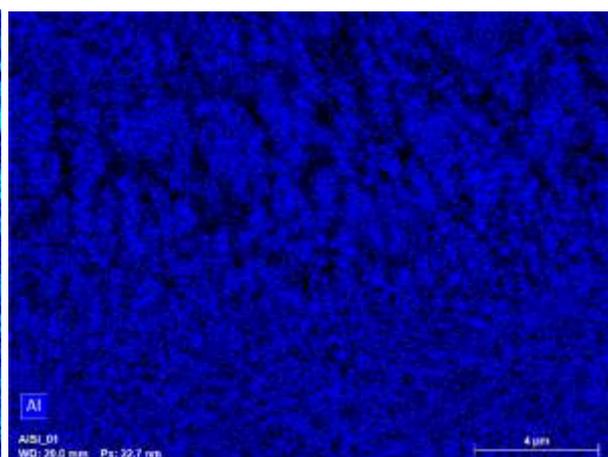
Для образца №10.1 выращенного по вектору технологических параметров [350 Вт, 1500 мм/с, 30 мкм] распределение структурных составляющих Al, Si и Mg на участке поверхности подготовленного шлифа показано на рисунке 4.18, б-д:



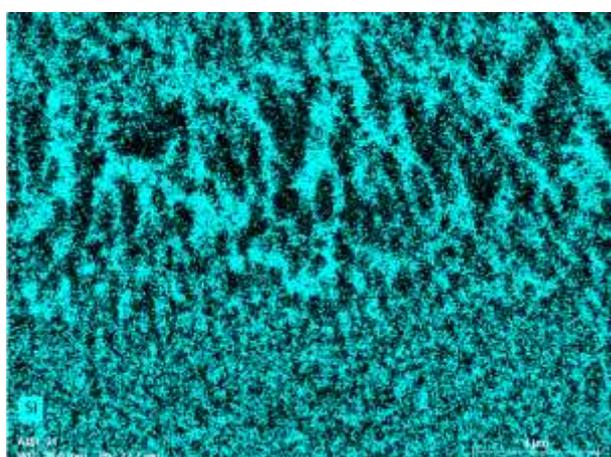
а)



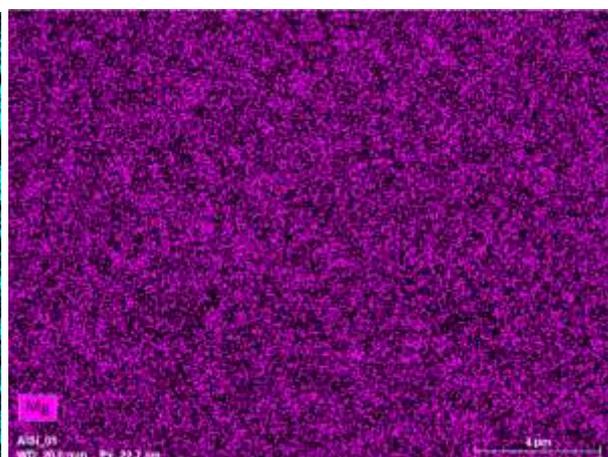
б)



в)



г)



д)

Рисунок 4.18 – СЭМ-снимок микроструктуры участка шлифа (а), а также карты распределения по участку структурных составляющих Al + Si (б), Al (в), Si (г) и Mg (д).

Можно заключить, что в отличие от зёрен α -Al и эвтектики (Al + Si), где сосредоточены компоненты Al и Si, компонент Mg распределён равномерно по исследуемому участку и изменение технологических параметров энерговыклада в СЛП не влияет на характер этого распределения. Это доказывают и исследования, проведенные для образцов с номерами 6.1, 6.4 и 10.4 (Таблица 14). Карты распределения компонента Mg по участкам соответствующих образцов представлены на рисунке 4.19.

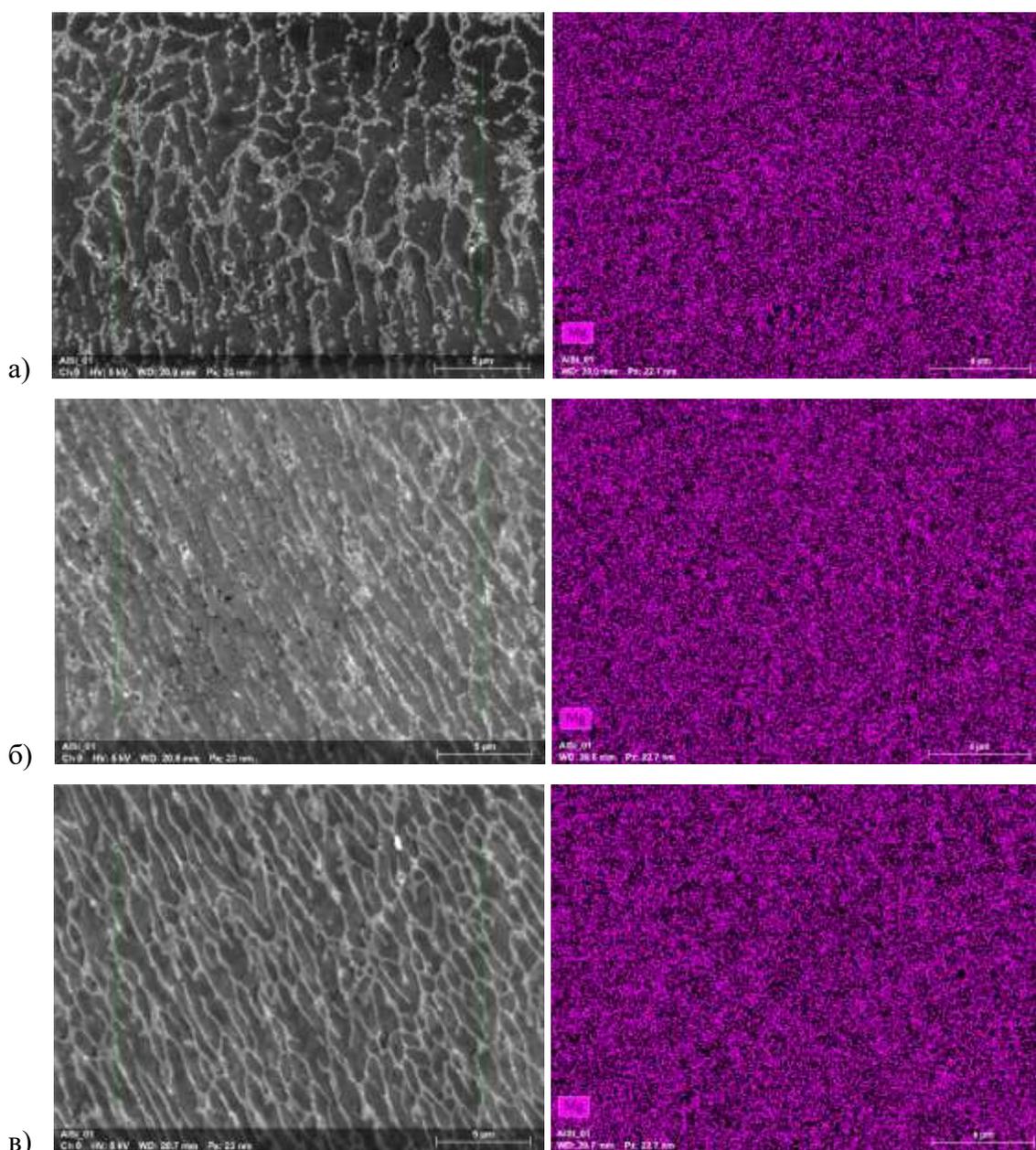


Рисунок 4.19 – Карты распределения составляющей Mg по участку поверхности шлифа:

- а) образец 6.1: 350 Вт, 300 мм/с, слой 30 мкм, 486,1 Дж/мм³, относит. плотность – 96,32%.
- б) образец 6.4: 350 Вт, 300 мм/с, слой 90 мкм, 162,0 Дж/мм³, относит. плотность – 97,15%.
- в) образец 10.4: 350 Вт, 1500 мм/с, слой 90 мкм, 32,4 Дж/мм³, относит. плотность – 88,78%.

С помощью системы ЭДС получены элементные карты состава исследуемых участков поверхности шлифа (Таблица 18). Они позволяют определить номенклатуру состава, абсолютное количество атомов, концентрацию и массовую долю каждого отдельного компонента на снимке.

Таблица 18 – Элементная карта состава участка поверхности шлифа образца №10.1

Элемент	Атомный номер	Нетто	Доля компонента (норм.), % масс.	Концентрация компонента, % ат.	Абсолютная погрешность (1σ), %	Относительная погрешность, (1σ), %
Al	13	1315558	78,69	79,27	3,38	4,79
Si	14	143391	20,60	19,93	0,88	4,78
Mg	12	14262	0,71	0,79	0,06	9,16

Полученные данные могут быть полезны при дальнейшем изучении влияния технологических параметров процесса СЛП на распределение структурных составляющих в выращиваемых образцах и изделиях.

4.7 Определение эффективности предлагаемой методики

Для оценки эффективности разработанных программных компонентов по автоматическому анализу результатов экспериментов и эффекта от предложенных конструктивно-технологических решений по организации работ был дополнительно проведен анализ результатов вручную и оценка времени исследования объёмных образцов без оптимизации компоновки.

Для рассмотренного в [разделе 3.1](#) эксперимента входного контроля партии порошка сплава AlSi10Mg применение средств экспресс-анализа позволяет сократить этап обработки данных (изображений просеянных порошков во вторичных электронах) – статистический учёт размеров гранул порошка вручную занимает на 30 минут дольше. Экспресс-анализ позволяет получить данные не более чем за 10 минут и оперативно сделать выводы о распределении частиц по размерам (Рисунок 4.20).

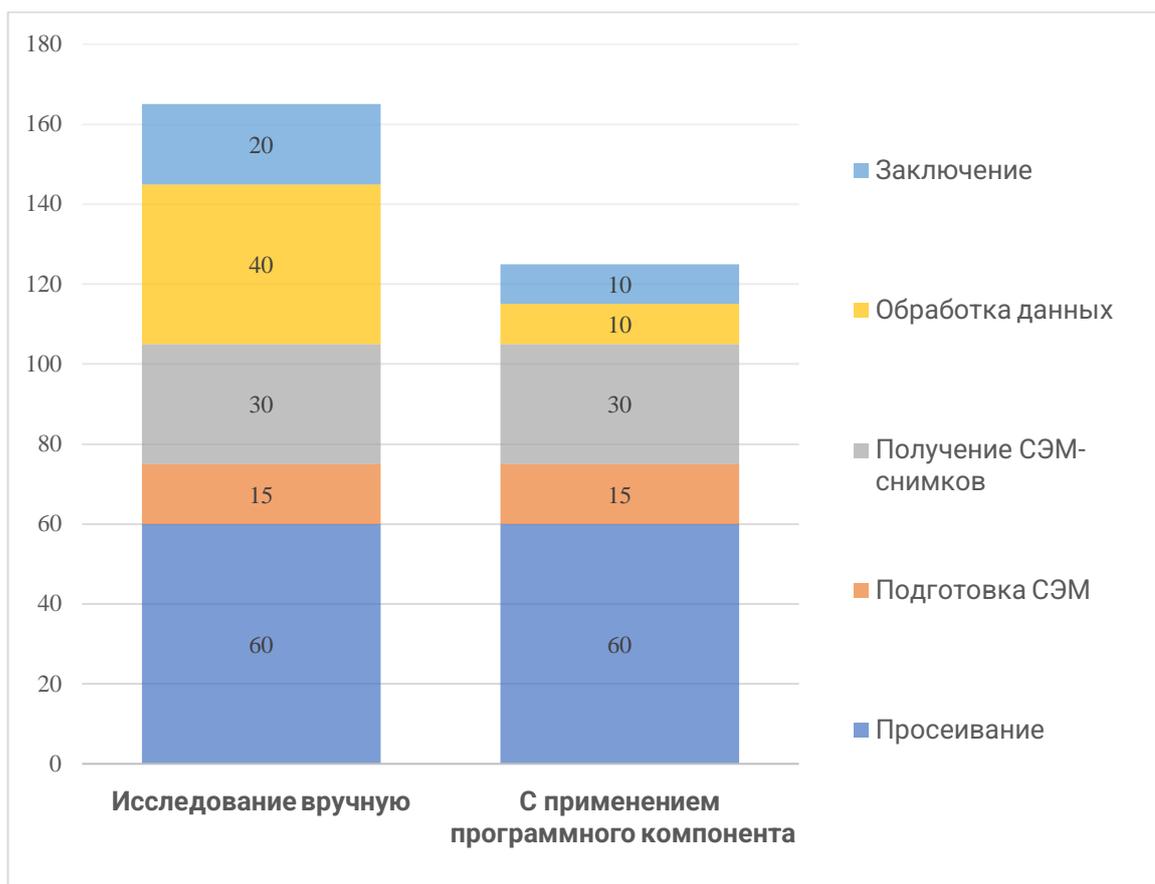


Рисунок 4.20 – Время проведения одного цикла экспериментов по входному контролю: вручную и с применением автоматизированных инструментов анализа

С увеличением объёма данных для анализа (количества просеянного порошка) разница во времени обработки между ручным и автоматическим методами будет только увеличиваться (в т.ч. и из-за увеличения влияния человеческого фактора на вероятность ошибки). Несмотря на то, что существуют более эффективные методы входного контроля порошковых материалов (в т.ч. лазерная дифракция), программный экспресс-анализ позволяет сделать оперативные выводы о применимости порошка для печати уже за 125 минут рабочего времени специалиста, что на 24% меньше времени ручной обработки теми же методами.

Для рассмотренного эксперимента с печатью единичных треков и полученного набора данных (99 изображений треков) использование предложенной методики позволяет на 45 минут (25%) сократить время, потраченное на анализ и систематизацию данных эксперимента по

исследованию непрерывных единичных треков, в сравнении с исследованием, проведенным вручную (Рисунок 4.21).

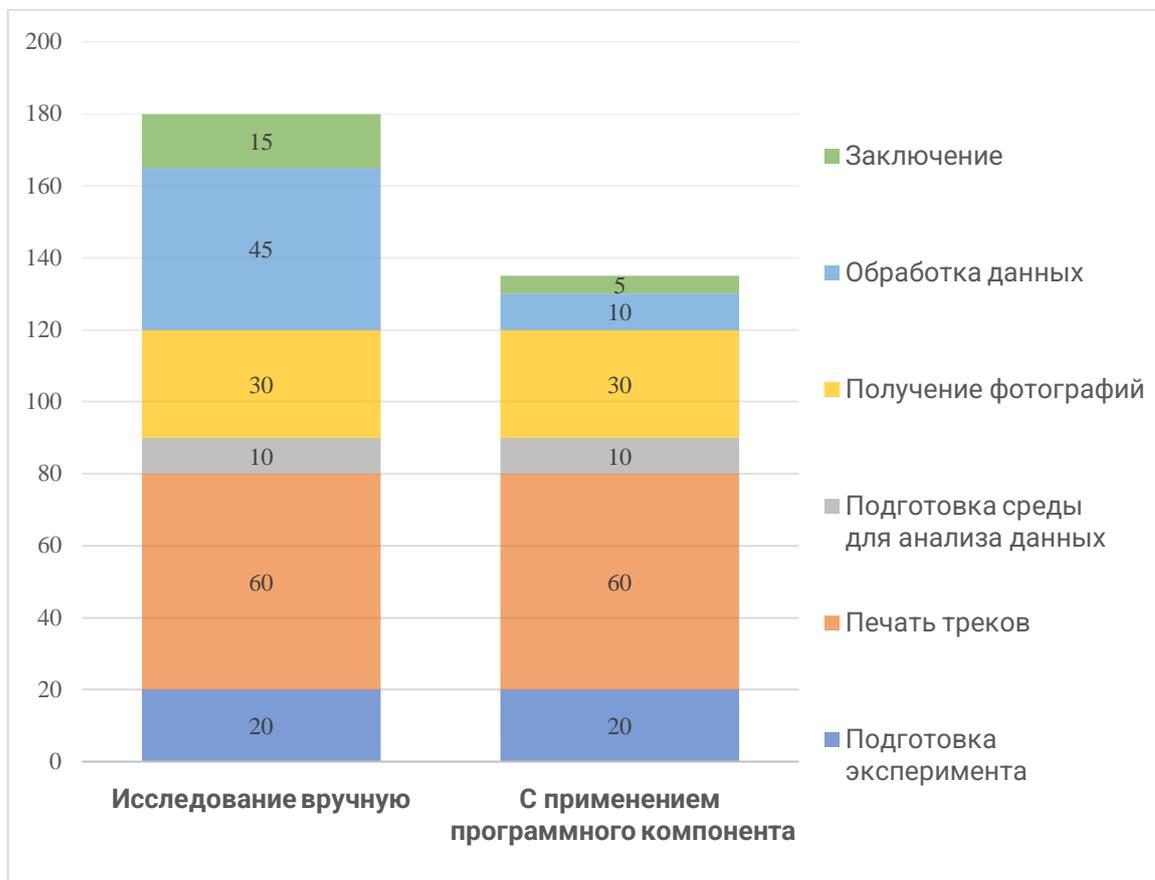


Рисунок 4.21 – Время проведения одного цикла экспериментов с единичными треками: вручную и с применением автоматизированных инструментов анализа

Аналогично экспресс-анализу порошкового материала, чем больше данных представлено к анализу (чем больше изготовлено и отснято единичных треков и чем меньше шаг варьируемых параметров), тем сильнее эффект от внедрения автоматизированного компонента в процесс поиска наиболее точного интервала параметров. При достижении определенного объема данных просмотр большого набора визуального схожих изображений вида трека сверху становится не только неэффективным с точки зрения затраченного времени и точности поиска, но и попросту невозможным.

Для эксперимента с выращиванием объёмных образцов применение предложенного конструктивно-технологического решения (компоновки) при печати объёмных образцов друг над другом позволило изготовить 4 партии

образцов в одном запуске установки Addsol D50, разместив их на небольшой платформе диаметром 50 мм. 4 запуска установки позволили бы изготовить такое же количество образцов за 7 часов работы вместо 5 часов работы установки. Основной эффект, связанный с компоновкой, достигается за счёт более удачной установки образцов в зажим рентгеновского компьютерного томографа. Особенности камеры РКТ позволяют производить съёмку двух образцов за один раз, что существенно (в 3 раза) сокращает время на получение снимков внутренней структуры образца (Рисунок 4.22)

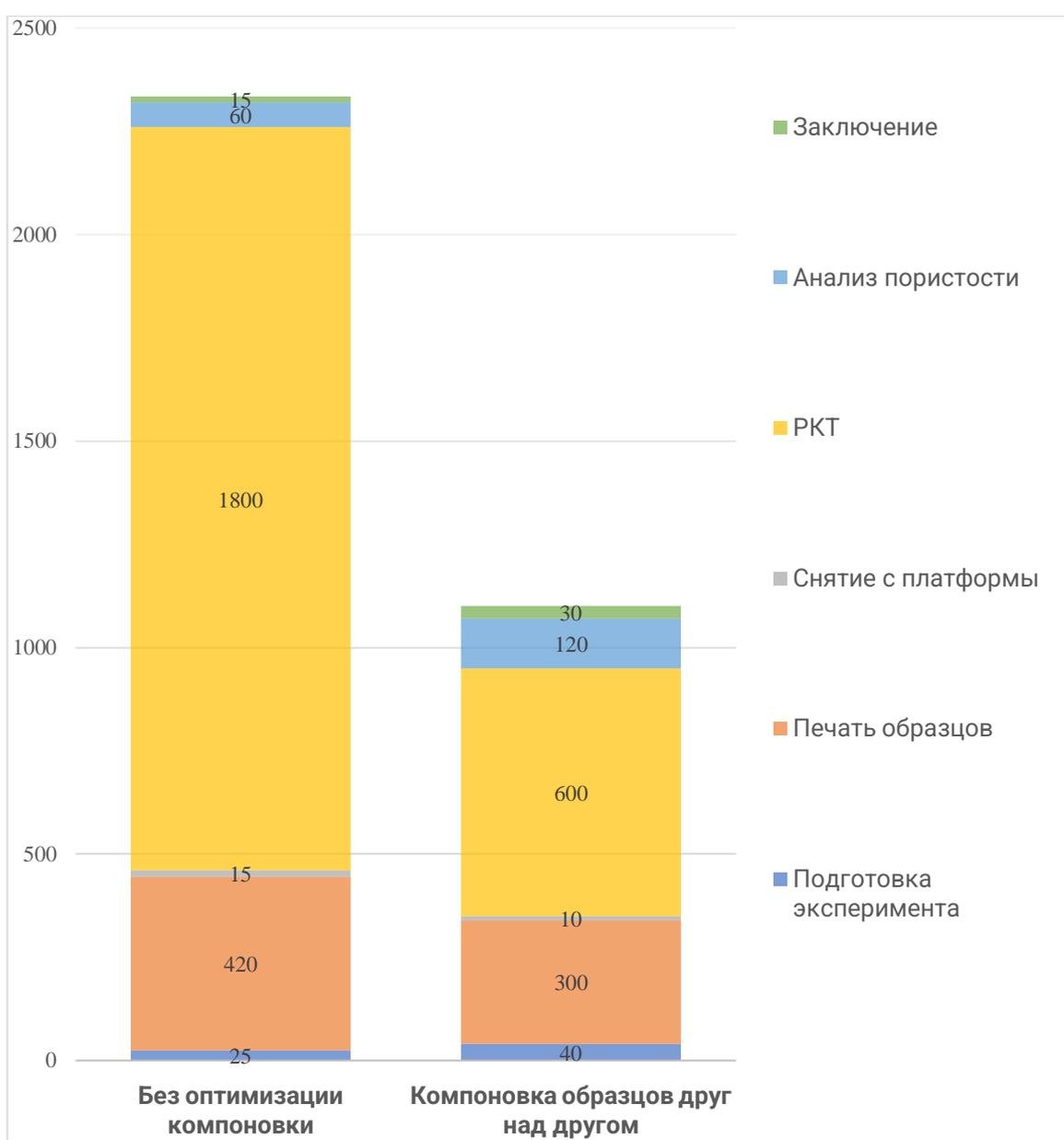


Рисунок 4.22 – Время проведения цикла экспериментов с объёмными образцами: без оптимизации компоновочных решений и с размещением кубов друг над другом

Если сравнивать данный этап ОТР с точки зрения анализа данных (Рисунок 4.23), то применение программных средств экспресс-анализа позволяет сократить время анализа на 80 минут (7%). Особенное значение приобретает использование разработанного отечественного программного комплекса для обработки RAW-данных компьютерной томографии. Это не только обеспечивает независимость от иностранных программных решений, таких как MyVGL, но и дает полное понимание и контроль над процессом обработки данных, что является критически важным для обеспечения большей точности и надежности результатов в будущих работах.

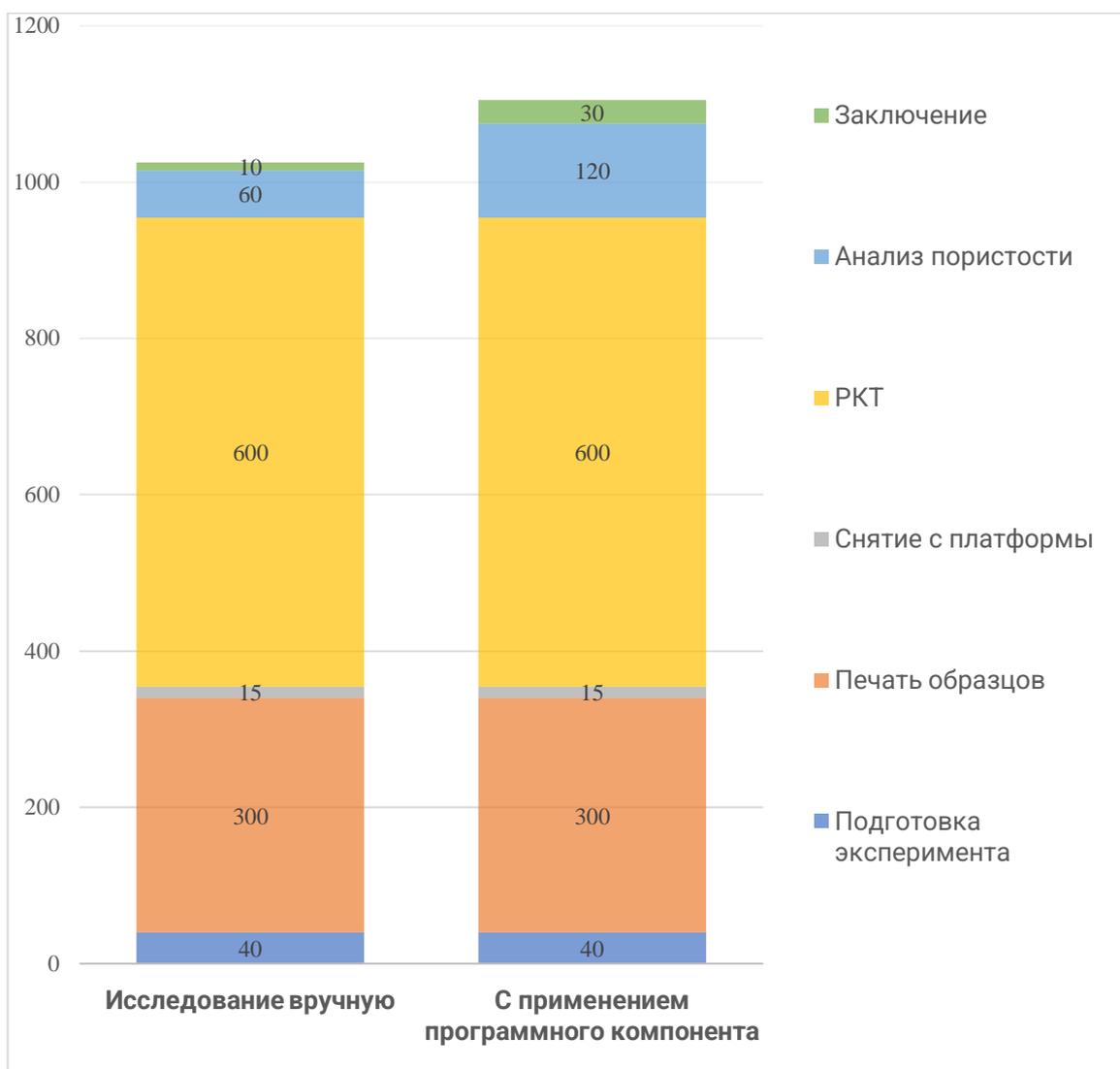


Рисунок 4.23 – Время проведения цикла экспериментов с объёмными образцами: вручную и с применением автоматизированных инструментов анализа

Предложенное сравнение для конкретной установки и порошкового материала позволяет оценить эффективность предлагаемой методики и конструктивно-технологических решений и в рамках всего цикла работа по поиску эффективного набора параметров СЛП (Рисунок 4.24).

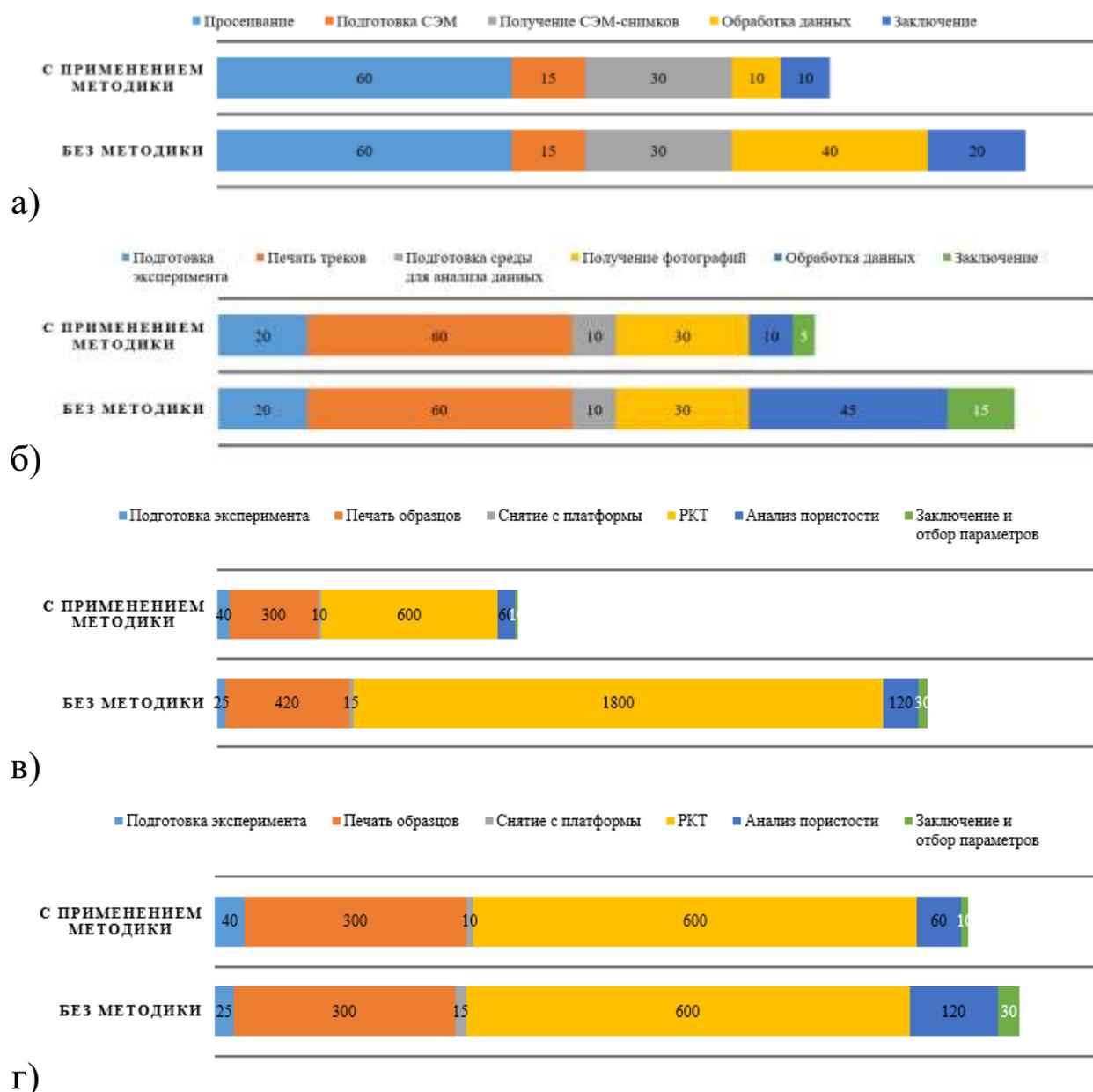


Рисунок 4.24 – Сравнение времени, затрачиваемого на цикл экспериментов по поиску эффективного вектора параметров процесса СЛП:

- а) входной контроль порошкового материала;
- б) анализ непрерывности единичных треков;
- в) анализ пористости объёмных образцов (оптимизированная компоновка);
- г) анализ пористости объёмных образцов (одинаково эффективные компоновки).

Таким образом, применение программных компонентов в сочетании с оптимизированной компоновкой объёмных образцов-кубов способно сократить весь 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.

4.8 Выводы по главе

В данной главе описан процесс разработки программных средств экспресс-анализа результатов экспериментов из цикла опытных работ по поиску эффективных параметров процесса селективной лазерной плавки металлопорошковых композиций. Предложена концепция комплекса программных средств как научно-методического обеспечения, решающего задачу оптимизации времени, затрачиваемого на проведение опытных технологических работ.

Разработан программный компонент экспресс-анализа результатов входного контроля металлопорошковых композиций, осуществляющий пороговую обработку изображений гранул порошкового материала, полученных с помощью СЭМ, анализ и систематизацию данных о размерах частиц порошка, а также визуализацию в виде гистограмм распределения частиц по диапазонам размеров.

Разработан программный компонент экспресс-анализа единичных треков, позволяющий обработать массив изображений, полученных съёмкой треков с помощью оптического микроскопа. На основе данных о непрерывности трека, а также заданных значениях мощности и скорости, программный компонент систематизирует результаты эксперимента в виде пузырьковой диаграммы, визуализирующей уточненный диапазон эффективных параметров процесса СЛП.

Разработан программный компонент экспресс-анализа объёмных образцов, который позволяет оценить пористость образцов по данным, полученным методом рентгеновской компьютерной томографии.

Проведено исследование морфологии микроструктуры образцов кубов, отобранных в ходе цикла экспериментов разработанными программными компонентами экспресс-анализа. Установлены векторы параметров для достижения однородной мелкозернистой (1-2 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].

Приведены результаты механических испытаний образцов на растяжение, изготовленных по отобранным технологическим параметрам – мощности излучения, скорости сканирования и высоты слоя при печати. Приведено сопоставление механических свойств и параметров процесса СЛП.

Проведен локальный анализ химического состава выращенных образцов с помощью системы энергодисперсионной спектроскопии. Результат

исследования позволяет оценить распределение основных компонентов системы используемого сплава (Al-Si-Mg) на исследуемом участке шлифа. Сделан вывод о инвариантности характера распределения компонента Mg в исследованных образцах – вне зависимости от параметров энергоклада структурная составляющая распределена равномерно по рассмотренному участку поверхности шлифа. Получены элементные карты состава исследуемых участков для ряда образцов.

Проведена оценка эффективности предложенных технологических решений по организации экспериментов, а также разработанных программных компонентов автоматизированного анализа результатов экспериментов в сравнении с исследованием без предложенного научно-методического обеспечения (вручную) для решения задачи оперативного поиска эффективного вектора технологических параметров процесса СЛП. Сделан вывод о возможности существенно (до 53,5%) сократить сроки процесса опытных работ с использованием предлагаемой методики. Сделан предварительный вывод о снижении влияния человеческого фактора на результат поиска с внедрением средств автоматизации.

Заключение

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 свойства образцов, полученных из порошка сплава AlSi10Mg. Предложены рекомендации по совершенствованию технологического процесса производства, выраженные в практических результатах работы:

1. Проведена 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. Осуществлен входной контроль металлопорошковой композиции AlSi10Mg производства ОК «РУСАЛ». Установлено нормальное одномодальное распределение размеров частиц порошка при просеве через сита с ячейкой 30 и 60 мкм с модами 25,5 и 35,3 мкм соответственно, что позволяет говорить о насыпной плотности 2,67 г/см³.

3. Проведен эксперимент по селективной лазерной плавке 99 единичных треков порошка AlSi10Mg и исследованию их непрерывности с привлечением методов оптической микроскопии. Результат исследования позволил определить эффективные диапазоны параметров для отечественной установки Addsol D50 – мощность лазерного излучения [220:400] Вт и скорость сканирования [200:1400] мм/с.

4. Предложено компоновочное решение, позволяющее синтезировать 120 образцов-кубов при широком варьировании параметров процесса СЛП в рамках одного запуска установки Addsol D50. Предложенное решение

позволяет значительно (до 200%) ускорить процесс синтеза объёмных образцов на установках с малой областью построения (до 50 мм).

5. 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%.

6. Разработан программный компонент экспресс-анализа результатов рентгеновской компьютерной томографии объёмных образцов, позволяющий определить наиболее эффективные с точки зрения сплошности структуры образцы и соответствующие им векторы технологических параметров процесса СЛП. Установлены векторы параметров для достижения однородной мелкозернистой (1-2 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].

Разработанные программные инструменты экспресс-анализа успешно применены для решения задач опытных технологических работ по подбору параметров процесса выращивания методом селективной лазерной плавки металлопорошковых композиций на установке М-350 (АО «Лазерные Системы», Россия), в частности, для автоматизации анализа результатов экспериментальных исследований.

Помимо снижения времени, затраченного на опытные работы по поиску эффективных параметров СЛП порошка сплава $AlSi10Mg$, предложенная методика автоматизации имеет преимущество в снижении влияния человеческого фактора на результат поисковых работ.

Получена библиотека результатов эксперимента для дальнейшего анализа влияния технологических параметров на свойства и структуру образцов и изделий, полученных методом СЛП из металлопорошковых композиций.

Направление дальнейших исследований лежит в совершенствовании программного комплекса, переложении разработанных методик и программных средств к другим порошковым материалам, установкам и технологиям аддитивного производства, оценке реальной эффективности в снижении влияния человеческого фактора на результат опытных технологических работ, а также внедрении результатов исследования на участки аддитивного производства с целью увеличения эффективности опытного производства и пуско-наладочных работ с установками 3D-печати.

Библиографический список

1. Alberth S. Forecasting technology costs via the experience curve—myth or magic? //Technological Forecasting and Social Change. – 2008. – Т. 75. – №. 7. – С. 952-983.
2. Миронов Д. Р., Асылгужин Т. Р., Скорынина С. Е. Обзор рынка аддитивных технологий //Интеллектуальная собственность и инновации. —Екатеринбург, 2018. – 2018. – С. 132-137.
3. Yap C. Y. et al. Review of selective laser melting: Materials and applications //Applied physics reviews. – 2015. – Т. 2. – №. 4. – С. 041101.
4. Agrawal R. Sustainable design guidelines for additive manufacturing applications //Rapid Prototyping Journal. – 2022.
5. Чемодуров А. Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – №. 8-2. – С. 210-217.
6. Huang R., Riddle M.E., Graziano D., Das S., Nimbalkar S., Cresko J. et al. Environmental and economic implications of distributed additive manufacturing: The case of injection mold tooling // Journal of Industrial Ecology. 2017. № 21 (S1). P. 130 – 143.
7. Tiwari S. K. et al. Selection of selective laser sintering materials for different applications //Rapid prototyping journal. – 2015. – Т. 21. – №. 6. – С. 630-648.
8. Абрамов И. В., Абрамов В. И. Перспективы и проблемы использования аддитивных технологий в России в условиях антироссийских санкций //Техника и технология современных производств. – 2022. – С. 3-7.
9. Song B. et al. Process parameter selection for selective laser melting of Ti6Al4V based on temperature distribution simulation and experimental sintering //The international journal of advanced manufacturing technology. – 2012. – Т. 61. – С. 967-974.

10. Kempen K. et al. Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel //Physics Procedia. – 2011. – Т. 12. – С. 255-263.
11. Trevisan F. et al. On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure, and mechanical properties //Materials. – 2017. – Т. 10. – №. 1. – С. 76.
12. Yadroitsev I. et al. Single track formation in selective laser melting of metal powders //Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – Т. 210. – №. 12. – С. 1624-1631.
13. Yadroitsev I., Bertrand P., Smurov I. Parametric analysis of the selective laser melting process //Applied surface science. – 2007. – Т. 253. – №. 19. – С. 8064-8069.
14. Samal P., Newkirk J. Powder metallurgy methods and applications //ASM handbook of powder metallurgy. – 2015. – Т. 7.
15. Kianian B. Comparing acquisition and operation life cycle costs of powder metallurgy and conventional wrought steel gear manufacturing techniques //Procedia Cirp. – 2019. – Т. 81. – С. 1101-1106.
16. Jones P. K. The technical and economic advantages of powder-forged products //Powder Metallurgy. – 1970. – Т. 13. – №. 26. – С. 114-129.
17. Senthilvelan T., Raghukandan K., Venkatraman A. Testing and quality standards for powder metallurgy products //Materials and manufacturing processes. – 2003. – Т. 18. – №. 1. – С. 105-112.
18. Маранц А. В. и др. СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ СТАЛЬ–TiC, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ //Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – №. 1. – С. 22-26.
19. Казаченко С. И., Парфенова Ю. В. К ВОПРОСУ О ПРЕИМУЩЕСТВАХ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ //Перспективы инновационного развития угольных регионов России. – 2018. – С. 309-312.
20. Бальшин М. Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. – Рипол Классик, 1972.

21. Пат. 2492028 RU. Способ получения металлического порошка / Е.Н. Каблов, А.Г. Евгенов, С.В. Неруш, А.Н. Афанасьев-Ходыкин, А.И. Шербаков, А.М. Рогалев. – Оpubл. – Бюл. №25.
22. Павлов В. А., Ляшенко А. П., Носенко М. И. Перспективные технологические процессы порошковой металлургии //Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2008. – №. 1. – С. 30-33.
23. Ильющенко, А.Ф. Демпфирующие свойства высокопористых материалов на основе титана / А.Ф. Ильющенко, О.Л. Сморого, А.И. Марукович // Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе: материалы докл. IV Междунар. симпоз., 27-28 окт. 2011 г., г. Минск. - Мн.: Ин-т порошковой металлургии, 2011. - С. 76-79.
24. Савич В. В. Порошковая металлургия в дентальных и ортопедических имплантатах //Актуальные проблемы порошкового материаловедения. – 2018. – С. 176-189.
25. Агеев С. В., Гиршов В. Л. Горячее изостатическое прессование в порошковой металлургии //Металлообработка. – 2015. – №. 4 (88). – С. 56-60.
26. Витязь П. А., Ильющенко А. Ф., Савич В. В. Порошковая металлургия и металлургические аддитивные технологии. По материалам европейского конгресса порошковой металлургии EuroPM2017 //Порошковая металлургия. – 2017. – С. 5-14.
27. Пиляева О. В. ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА. – 2019.
28. Гуляев Б. Б. Синтез литейных сплавов: учебное пособие. – 1991.
29. Гини Э. Ч. Технология литейного производства. – 2005.
30. Шинский О. И. и др. Экономика, экология, организация производств литья по газифицируемым моделям //Литьё и металлургия. – 2017. – №. 4 (89). – С. 53-59.
31. Иванько Е. К. К вопросу о теоретических основах центробежного литья //Литейное производство. – 2010. – №. 2. – С. 37-40.

32. Левчук В. В. и др. Способы литья тонкостенной детали из Al сплава типа силумин (обзор) // Труды ВИАМ. – 2018. – №. 6 (66). – С. 30-38.
33. Довбыш В. М., Забеднов П. В., Зленко М. А. Аддитивные технологии и изделия из металла //Библиотечка литейщика. – 2014. – Т. 9. – С. 14-71.
34. Эртесян А. Р. и др. Аддитивные технологии 3D-печати металлов в стоматологии //Polish journal of science. – 2020. – №. 34-1. – С. 16-24.
35. Ильющенко А. Ф. Порошковые материалы для 3D-печати //Наноструктурные материалы: технологии, свойства, применение. – 2017. – С. 304-312.
36. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutyilina I.N. Additivnyie tehnologii v mashinostroenii [Additive manufacturing in mechanical engineering]. SPbGU Publ., 2013, 221 p.
37. Кузнецов П.А., Терещенко А.В., Савин В.И. и др. Технологии лазерного синтеза порошковых материалов для создания, восстановления и ремонта изделий сложной формы. Сборник докладов 8-го Международного симпозиума “Инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка”, Минск, 10 – 12 апреля 2013 г. Минск: Беларус. Навука, 2013, с. 117 – 123.
38. Kareem M. A., Harshitha V. A direct metal deposition 3d printer: Review on future prospects //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2019. – Т. 2200. – №. 1.
39. Волосова М.А., Окунькова А.А. Пути оптимизации процесса селективного лазерного плавления при помощи выбора стратегии обработки лазерным лучом. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2012, т. 14, №4 (2), с. 587 – 591.
40. Назаров А. П. Перспективы быстрого прототипирования методом селективного лазерного спекания/ плавления. Вестник МГТУ “Станкин”, 2011, № 4, с. 46 – 51.
41. Назаров А. П. Особенности конструкции машин для селективного лазерного спекания. Вестник МГТУ “Станкин”, 2013, № 1, с. 76 – 79.

42. Yadroitsev I., Smurov I. Selective laser melting technology: From the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape. *Physics Procedia*, 2010, v. 5, no. 2, p. 551 – 560.
43. Смуров И.Ю., Мовчан И.А., Ядройцев И.А. и др. Аддитивное производство с помощью лазера. *Вестник МГТУ “Станкин”*, 2011, т. 2, № 4, с. 144 – 146
44. Валиев А. А., Мифтахов К. Р., Кульга К. С. Применение SLM-технологий в современном машиностроении //ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ XXI ВЕКА. – 2019. – С. 130-132.
45. СОКОЛОВ Д. А. и др. АЭРОКОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА, ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИННОВАЦИИ //АЭРОКОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА. – 2021. – Т. 2. – С. 189-193.
46. Власенко А. Н., Догадкин Н. С. Сравнение свойств деталей из сплавов на основе Al-Si, полученными методами фасонного литья и селективного лазерного плавления //Гагаринские чтения 2017. – 2017. – С. 444-445.
47. Wang L. et al. Characterisation of structural properties for AlSi10Mg alloys fabricated by selective laser melting //Materials Science and Technology. – 2017. – Т. 33. – №. 18. – С. 2274-2282.
48. Караваев А. К., Пучков Ю. А. Исследование структуры и свойств сплава ALSI10MG, полученного методом селективного лазерного сплавления //Вестник МГТУ им. НЭ Баумана. Серия «Машиностроение». – 2020. – №. 5 (134). – С. 71-85.
49. Остроброд Б. Е. и др. Исследование свойств сплава AlSi10Mg, полученного методом селективного лазерного сплавления //Достижения современной науки и образования. – 2017. – С. 21-25.
50. Бабайцев А. В., Орехов А. А., Рабинский Л. Н. Свойства и структура образцов из AlSi10Mg, полученных методом лазерного спекания порошка. – 2020.

51. Диаграммы состояния двойных металлических систем ред. Лякишева Н.П. Машиностроение, 1996-2000 г.
52. Zyguła K. et al. Mechanical properties and microstructure of AlSi10Mg alloy obtained by casting and SLM technique //World Scientific News. – 2018. – №. 104. – С. 456-466.
53. Каблов Е. Н. и др. Металлопорошковые композиции жаропрочного сплава ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ в технологиях селективного лазерного сплавления, лазерной газопорошковой наплавки и высокоточного литья полимеров, наполненных металлическими порошками //Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – №. 9 (678). – С. 62-80.
54. Yan Q., Song B., Shi Y. Comparative study of performance comparison of AlSi10Mg alloy prepared by selective laser melting and casting //Journal of Materials Science & Technology. – 2020. – Т. 41. – С. 199-208.
55. Aboulkhair N. T. et al. The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment //Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Т. 667. – С. 139-146.
56. Trevisan F. et al. On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure, and mechanical properties //Materials. – 2017. – Т. 10. – №. 1. – С. 76.
57. Chen B. et al. Comparison study on additive manufacturing (AM) and powder metallurgy (PM) AlSi10Mg alloys //Jom. – 2018. – Т. 70. – С. 644-649.
58. Gutmanas E. Y. Materials with fine microstructures by advanced powder metallurgy //Progress in Materials Science. – 1990. – Т. 34. – №. 4. – С. 261-366.
59. ISO 6983-1-2009: Автоматизированные системы и интеграция. Числовое программное управление станком. Формат программы и определение адресных слов. Часть 1. Формат данных для систем управления

- позиционированием, прямолинейным перемещением и перемещением по контуру. – 2009
60. Bonnard R. An advanced STEP-NC Platform for Additive Manufacturing //Indus. Addit. Manuf. – Proceed. of Addit. Manuf. in Prod. and Apps. AMPA2017. – 2017
 61. Ripetskii A. V. Preliminary Geometric Verification of the Electronic Model in Additive Manufacturing //Russian Engineering Research. – 2019. – Т. 39. – №. 9. – С. 789-792.
 62. Baumann F., Eichhoff J., Roller D. Unified storage file format for additive manufacturing. – 2016.
 63. Zhang Z., Joshi S. An improved slicing algorithm with efficient contour construction using STL files //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Т. 80. – №. 5-8. – С. 1347-1362."
 64. Baturynska I. Statistical analysis of dimensional accuracy in additive manufacturing considering STL model properties //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Т. 97. – №. 5-8. – С. 2835-2849.
 65. Xu H. et al. A slicing model algorithm based on STL model for additive manufacturing processes //2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). – IEEE, 2016. – С. 1607-1610.
 66. A. Ripetskiy et al., "Current Issues of Developing Methodology and Software Solutions Used in Different Phases of Modelling Additive Production Processes", Key Engineering Materials, Vol. 771, pp. 97-102, 201897-102
 67. Ripetskiy A.V., Zelenov S.V., Vucinic D., Rabinskiy L.N., Kuznetsova E.L. Automatic errors correction method based of the layer-by-layer product representation which parallel algorithms are developed for multiprocessor computer hardware. International Journal of Pure and Applied Mathematics, 2016, 111(2), 343-355.

68. Anamova, R.R., Zelenov, S.V., Kuprikov, M.U., Ripetskiy, A.V. Multiprocessing and Correction Algorithm of 3D-models for Additive Manufacturing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 140 (1), art. no. 012003
69. Rabinskiy L.N., Ripetskiy A.V., Zelenov S.V., Kuznetsova E.L. Analysis and management of the location of the object in the problems of the virtual camera setting in the technologies of additive production. International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2017, 116(3), 789-797.
70. Pei, E., Ressin, M.: Investigating the Impact of CAD Data Transfer Standards for 3DP-RDM. Brunel University London, UK. – 2017
71. Анамова Р. Р. Автоматизация подготовки аддитивного производства изделий авиационной техники //Труды МАИ. – 2015. – №. 82. – С. 36.
72. Malik A. et al. 3D printing towards implementing Industry 4.0: sustainability aspects, barriers and challenges //Industrial Robot: the international journal of robotics research and application. – 2022. – Т. 49. – №. 3. – С. 491-511.
73. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 9001-2015 "Системы менеджмента качества. Требования".
74. Attene M. As-exact-as-possible repair of unprintable STL files //Rapid Prototyping Journal. – 2018.
75. Gaikwad A. et al. Heterogeneous sensing and scientific machine learning for quality assurance in laser powder bed fusion—A single-track study //Additive Manufacturing. – 2020. – Т. 36. – С. 101659.
76. Kruth J-P, Mercelis P, Froyen L, Rombouts M (2004) Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. In: Annual international solid freeform fabrication symposium, Texas, USA. University of Texas in Austin
77. Over C, Meiners W, Wissenbach K, Lindemann M, Hammann G (2001) Selective laser melting: a new approach for the direct manufacturing of metal parts and tools. In: International conference on laser assisted net shape engineering, Germany

78. Brandl, E., Heckenberger, U., Holzinger, V., & Buchbinder, D. (2012). Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials and Design*, 34, 159–169.
79. Buchbinder, D., Schleifenbaum, H., Heidrich, S., Meiners, W., & Bültmann, J. (2011). High power Selective Laser Melting (HP SLM) of aluminum parts. *Physics Procedia*, 12(PART 1), 271–278.
80. Kempen, K., Thijs, L., Humbeeck, J. Van, & Kruth, J. P. (2015). Processing AlSi10Mg by selective laser melting: Parameter optimisation and material characterisation. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 31(8), 917–923.
81. Maskery, I., Aboulkhair, N. T., Corfield, M. R., Tuck, C., Clare, A. T., Leach, R. K., Wildman, R. D., Ashcroft, I. A., & Hague, R. J. M. (2016). Quantification and characterisation of porosity in selectively laser melted Al-Si10-Mg using X-ray computed tomography. *Materials Characterization*, 111, 193–204.
82. Babaytsev, A. V., Orekhov, A. A., & Rabinskiy, L. N. (2020). Properties and microstructure of AlSi10Mg samples obtained by selective laser melting. *Nanoscience and Technology*, 11(3).
83. Amato, K. N., Gaytan, S. M., Murr, L. E., Martinez, E., Shindo, P. W., Hernandez, J., Collins, S., & Medina, F. (2012). Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting. *Acta Materialia*, 60(5), 2229–2239.
84. Dehoff, R. R., Kirka, M., Sames, W. J., Bilheux, H., Tremsin, A. S., Lowe, L. E., & Babu, S. S. (2015). Site specific control of crystallographic grain orientation through electron beam additive manufacturing. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 31(8), 931–938.
85. Li, S., Wei, Q., Shi, Y., Chua, C. K., Zhu, Z., & Zhang, D. (2015). Microstructure Characteristics of Inconel 625 Superalloy Manufactured by

- Selective Laser Melting. *Journal of Materials Science and Technology*, 31(9), 946–952.
86. Parimi, L. L., Ravi, G., Clark, D., & Attallah, M. M. (2014). Microstructural and texture development in direct laser fabricated IN718. *Materials Characterization*, 89, 102–111.
 87. Brandl, E., Baufeld, B., Leyens, C., & Gault, R. (2010). Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: Comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications. *Physics Procedia*, 5(PART 2), 595–606.
 88. Edwards, P., & Ramulu, M. (2014). Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering A*, 598, 327–337.
 89. Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J. Van, & Kruth, J. P. (2010). A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al4V. *Acta Materialia*, 58(9), 3303–3312.
 90. Yu, J., Rombouts, M., Maes, G., & Motmans, F. (2012). Material Properties of Ti6Al4 v Parts Produced by Laser Metal Deposition. *Physics Procedia*, 39, 416–424.
 91. Vandenbroucke, B. and Kruth, J. (2007), "Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 13 No. 4, pp. 196-203.
 92. Xin, Xz., Xiang, N., Chen, J. et al. Corrosion characteristics of a selective laser melted Co–Cr dental alloy under physiological conditions. *J Mater Sci* 47, 4813– 4820 (2012).
 93. Murr, L. E. et al. Microstructures and properties of 17-4 PH stainless steel fabricated by selective laser melting. *J. Mater. Res. Technol.* 1, 167–177 (2012).
 94. Niendorf, T., Leuders, S., Riemer, A. et al. Highly Anisotropic Steel Processed by Selective Laser Melting. *Metall Mater Trans B* 44, 794–796 (2013).

95. Yasa, E. & Kruth, J. P. Microstructural investigation of selective laser melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting. *Procedia Eng.* 19, 389–395 (2011).
96. Spierings, A. B., Schoepf, M., Kiesel, R. & Wegener, K. Optimization of SLM productivity by aligning 17-4PH material properties on part requirements. *Rapid Prototyp. J.* 20, 444–448 (2014).
97. Starr, T. L., Rafi, K., Stucker, B., & Scherzer, C. M. (2012). Controlling phase composition in selective laser melted stainless steels. Paper presented at the 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - an Additive Manufacturing Conference, SFF 2012, 439-446.
98. Yadollahi, A., Shamsaei, N., Thompson, S. M., Elwany, A., Bian, L., & Mahmoudi, M. (2015). Fatigue behavior of selective laser melted 17–4 PH stainless steel. *Proceedings of the 26th International Solid Freeform Fabrication Symposium*, , 721-731.
99. Casalino, G., Campanelli, S. L., Contuzzi, N. & Ludovico, A. D. Experimental investigation and statistical optimisation of the selective laser melting process of a maraging steel. *Opt. Laser Technol.* 65, 151–158 (2015).
100. Kempen, K., Yasa, E., Thijs, L., Kruth, J. P. & Van Humbeeck, J. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted 18Ni-300 steel. *Phys. Procedia* 12, 255–263 (2011).
101. Marchese G. et al. The role of texturing and microstructure evolution on the tensile behavior of heat-treated Inconel 625 produced via laser powder bed fusion //Materials Science and Engineering: A. – 2020. – T. 769. – C. 138500.
102. Ansari M. J., Nguyen D. S., Park H. S. Investigation of SLM process in terms of temperature distribution and melting pool size: Modeling and experimental approaches //Materials. – 2019. – T. 12. – №. 8. – C. 1272.
103. M. Quian and F.H. Froes. *Titanium Powder Metallurgy*. Elsevier Butterworth-Heinemann (2015)

104. J. Dawes, R. Bowerman, R. Trepleton. Introduction to the additive manufacturing powder metallurgy supply chain *Johns. Matthey Technol. Rev.*, 59 (3) (2015), pp. 243-256
105. R.M. German. *Powder Metallurgy Science*. (Second ed.), Metal Powder Industries Federation (1994), p. 167
106. Pinkerton, A. J., & Li, L. (2005). Direct additive laser manufacturing using gas- and water-atomised H13 tool steel powders. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(5-6), 471-479.
107. R.J. Herbert. Viewpoint: metallurgical aspects of powder bed metal additive manufacturing *J. Mater. Sci.*, 51 (2016), pp. 1165-1175
108. Cabanettes F. et al. Topography of as built surfaces generated in metal additive manufacturing: A multi scale analysis from form to roughness // *Precision Engineering*. – 2018. – T. 52. – C. 249-265.

Приложения

Приложение А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2021662544

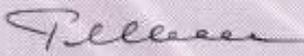
Программа для управления процессом выборочной лазерной плавки и проверки технологических режимов аддитивного производства

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (RU)*

Авторы: *Бабайцев Арсений Владимирович (RU), Рипецкий Андрей Владимирович (RU), Брыкин Вениамин Андреевич (RU)*

Заявка № **2021661350**
Дата поступления **16 июля 2021 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **30 июля 2021 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Г.И. Иванов

Приложение Б. Акт внедрения



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор


Д.Н. Васильев
«12» марта 2024г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Брыкина Вениамина Андреевича на тему:
«Метод автоматизации подготовки электронной модели изделия в
аддитивном производстве» в АО «Лазерные Системы»

Настоящим актом подтверждается использование результатов, полученных в диссертационной работе Брыкина В. А. на тему «Влияние параметров селективной лазерной плавки металлопорошковой композиции AlSi10Mg на пористость, морфологию микроструктуры и механические свойства выращенных изделий» в деятельности АО «Лазерные Системы».

Разработанные Брыкиным В.А. инструменты технологической подготовки применены для решения ряда задач опытных технологических работ по подбору параметров процесса выращивания методом выборочной лазерной плавки металлопорошковых композиций на установке **M-350** разработки компании АО «Лазерные Системы», в частности, для автоматизации анализа результатов экспериментальных исследований.

Директор департамента
управления качеством
АО «Лазерные системы»



Е.В. Ченцова

Приложение В. Листинги программных компонентов

Листинг 1. Программный компонент экспресс-анализа пористости объёмных образцов

Main.py

```
1. import imageProcessor as ip
2. import pandas as pd
3. import os
4. import trimesh
5. import matplotlib.pyplot as plt
6. import numpy as np
7.
8. input_path = "./input/towers/"
9. width = 1024
10. height = 1024
11.
12. df_towers = pd.DataFrame(columns=["Tower", "Pores Volume", "Cube
    Volume", "Relative Pores Volume"])
13.
14. for root, dirs, files in os.walk(input_path):
15.     for file in files:
16.         if files[0].endswith(".raw"):
17.             s_tower = ip.StackProcessor(root, width, height)
18.             s_tower.read()
19.             s_tower.binarize(mask_strength=1.5)
20.             s_tower.find_bbox()
21.             s_tower.crop()
22.             # s_tower.erode_dilate(iterations=2)
23.             # Copying to make pores
24.             s_tower_p = s_tower.copy()
25.             s_tower_p.extract_pores()
26.             pores_vol = s_tower_p.calculate_total_volume() * 10**-9 # mm3
27.             cube_vol = s_tower.calculate_total_volume() * 10**-9 # mm3
28.             rel_pores_vol = pores_vol / cube_vol
29.             # Name of the tower
30.             file_name = root.split("/")[-1]
31.             file_name = file_name.split("\\")
32.             # Join the file name using _
33.             file_name = "_".join(file_name)
34.             # Save pores_vol, cube_vol, rel_pores_vol in a dataframe
35.             df_towers = df_towers.append({"Tower": file_name, "Pores
    Volume": pores_vol, \
36.                                           "Cube Volume": cube_vol, \
37.                                           "Relative Pores Volume":
    rel_pores_vol}, ignore_index=True)
38.             break
39. df_towers.to_excel("./towers.xlsx")
```

imageProcessor.py

```
1. import numpy as np
2. from scipy.ndimage import rotate
3. import matplotlib.pyplot as plt
4. import skimage
5. import os
6. import trimesh
7.
8.
9. class StackReader:
10.     def __init__(self, directory_path, width, height):
11.         self.directory_path = directory_path
12.         self.width = width
13.         self.height = height
14.         self.stack = None
15.         self.z = None # Initialize z to None
16.
17.     def read(self):
18.         try:
19.             stack_list = []
20.             for root, dirs, files in os.walk(self.directory_path):
21.                 for file in files:
22.                     if file.endswith(".raw"):
23.                         file_path = os.path.join(root, file)
24.                         with open(file_path, 'rb') as file:
25.                             rawData = np.fromfile(file, dtype=np.int16)
26.                             slice_data = np.reshape(rawData,
27. (self.width, self.height))
28.                             stack_list.append(slice_data)
29.
30.                 if stack_list:
31.                     self.z = len(stack_list) # Determine z based on the
32. number of slices read
33.                     self.stack = np.stack(stack_list, axis=0) # Stack slices
34. along the depth axis
35.                 else:
36.                     print("Error: No .raw files found in the directory.")
37.                     return None
38.             except Exception as e:
39.                 print(f"Error: {e}")
40.                 return None
41.
42. class ImageProcessor:
43.     def __init__(self, file_path, width, height):
44.         self.file_path = file_path
45.         self.width = width
46.         self.height = height
47.         self.image_data = None
48.         self.binary_image = None
49.         self.bbox = None
50.         self.labels = None
51.         try:
52.             with open(self.file_path, 'rb') as file:
```

```
50.         rawData = np.fromfile(file, dtype=np.int16)
51.         self.image_data = np.reshape(rawData,
    (self.width, self.height))
52.     except:
53.         print("Error: cannot open file")
54.         print(f"Check the path\n{self.file_path}")
55.
56.
57.     def rotate(self, angle, reshape=False):
58.         if self.binary_image is not None:
59.             self.binary_image = rotate(self.binary_image, angle,
    reshape=reshape)
60.         else:
61.             print("Error: no binary image")
62.
63.     def show(self):
64.         plt.imshow(self.image_data, cmap='gray')
65.         plt.grid(False)
66.         plt.xticks([])
67.         plt.yticks([])
68.         plt.show()
69.
70.     def show_binary(self):
71.         plt.imshow(self.binary_image, cmap='gray')
72.         plt.grid(False)
73.         plt.xticks([])
74.         plt.yticks([])
75.         plt.show()
76.
77.     def binarize(self, soft_mask = 1.2):
78.         if self.image_data is not None:
79.             threshold_value =
    skimage.filters.threshold_otsu(self.image_data)
80.             self.binary_image = self.image_data > threshold_value *
    soft_mask
81.         else:
82.             print("Error: no image data")
83.
84.     def find_bbox(self, offset=1.1):
85.         if self.binary_image is not None:
86.             self.bbox =
    skimage.measure.regionprops(self.binary_image.astype(int))[0].bbox
87.             self.bbox = [
88.                 # top
89.                 max(0, int(self.bbox[0] - (self.bbox[2] - self.bbox[0]) *
    (offset - 1) / 2)),
90.                 # left
91.                 max(0, int(self.bbox[1] - (self.bbox[3] - self.bbox[1]) *
    (offset - 1) / 2)),
92.                 # bottom
93.                 min(self.height, int(self.bbox[2] + (self.bbox[2] -
    self.bbox[0]) * (offset - 1) / 2)),
94.                 # right
```

```
95.         min(self.width, int(self.bbox[3] + (self.bbox[3] -
self.bbox[1]) * (offset - 1) / 2))
96.     ]
97.     else:
98.         print("Error: no binary image")
99.
100.    def crop(self):
101.        if self.bbox is not None:
102.            self.image_data =
self.image_data[self.bbox[0]:self.bbox[2], self.bbox[1]:self.bbox[3]]
103.            self.binary_image =
self.binary_image[self.bbox[0]:self.bbox[2], self.bbox[1]:self.bbox[3]]
104.        else:
105.            print("Error: no bbox")
106.
107.    def erode_dilate(self, iterations=2):
108.        if self.binary_image is not None:
109.            for i in range(iterations):
110.                self.binary_image =
skimage.morphology.binary_dilation(self.binary_image)
111.            for i in range(iterations):
112.                self.binary_image =
skimage.morphology.binary_erosion(self.binary_image)
113.        else:
114.            print("Error: no binary image")
115.    def label(self):
116.        if self.binary_image is not None:
117.            self.labels = skimage.measure.label(self.binary_image)
118.        else:
119.            print("Error: no binary image")
120.    def show_labels(self):
121.        if self.labels is not None:
122.            # Use color to rgb mapping to show labels
123.            plt.imshow(skimage.color.label2rgb(self.labels,
bg_label=0))
124.            plt.grid(False)
125.            plt.xticks([])
126.            plt.yticks([])
127.            plt.show()
128.        else:
129.            print("Error: no labels")
130.    def clean_labels(self):
131.        if self.labels is not None:
132.            self.labels =
skimage.morphology.remove_small_objects(self.labels, min_size=64,
connectivity=1)
133.        else:
134.            print("Error: no labels")
135.
136.    def get_region_props_table(self,
props=('label', 'area', 'bbox_area', 'centroid', 'bbox')):
137.        if self.labels is not None:
138.            return skimage.measure.regionprops_table(self.labels,
properties=props)
```

```
139.         else:
140.             print("Error: no labels")
141.     def leave_max(self):
142.         # Use max area to leave only one label
143.         if self.labels is not None:
144.             props = self.get_region_props_table()
145.             max_area = props['area'].max()
146.             # Use remove_small_objects to leave only one label
147.             self.labels =
                skimage.morphology.remove_small_objects(self.labels, min_size=max_area,
                connectivity=1)
148.         else:
149.             print("Error: no labels")
150.     def extract_pores(self):
151.         if self.labels is not None:
152.             inverted_binary_image = np.invert(self.binary_image)
153.             inverted_labels =
                skimage.measure.label(inverted_binary_image)
154.             self.labels =
                skimage.segmentation.clear_border(inverted_labels)
155.         else:
156.             print("Error: no labels")
157.
158.     class StackProcessor(StackReader):
159.         def __init__(self, directory_path, width, height):
160.             super().__init__(directory_path, width, height)
161.             self.mesh = None
162.             self.stack_binary = None
163.             self.bbox = None
164.
165.         def reconstruct(self, voxel_size=(0.79, 1, 1)):
166.             if self.stack_binary is not None:
167.                 # Perform surface reconstruction using marching cubes
168.                 vertices, faces, _, _ =
                    skimage.measure.marching_cubes(self.stack_binary, level=0)
169.
170.                 # Scale the vertices based on the voxel size ratio
171.                 scaled_vertices = vertices * np.array(voxel_size)
172.
173.                 # Create a 3D mesh
174.                 self.mesh = trimesh.Trimesh(vertices=scaled_vertices,
                    faces=faces)
175.             else:
176.                 print("Error: no binary stack")
177.
178.         def save_mesh(self, file_path, extension='.stl'):
179.             if self.mesh is not None:
180.                 self.mesh.export(file_path + extension)
181.             else:
182.                 print("Error: no mesh")
183.
184.
185.         def rotate(self, angle, reshape=False):
186.             if self.stack is not None:
```

```
187.         self.stack = rotate(self.stack, angle, reshape=reshape)
188.     else:
189.         print("Error: no stack")
190.
191.     def show(self, slice_number):
192.         """
193.         Shows the slice at the specified slice number.
194.         """
195.         if slice_number is not None:
196.             plt.imshow(self.stack[slice_number], cmap='gray')
197.             plt.grid(False)
198.             plt.xticks([])
199.             plt.yticks([])
200.             plt.show()
201.         else:
202.             print("Error: no slice number")
203.
204.     def show_binary(self, slice_number):
205.         plt.imshow(self.stack_binary[slice_number], cmap='gray')
206.         plt.grid(False)
207.         plt.xticks([])
208.         plt.yticks([])
209.         plt.show()
210.     def show_labels(self, slice_number):
211.         if self.labels is not None:
212.             # Use color to rgb mapping to show labels
213.             plt.imshow(skimage.color.label2rgb(self.labels[slice_number],
214.         bg_label=0))
215.             plt.grid(False)
216.             plt.xticks([])
217.             plt.yticks([])
218.             plt.show()
219.         else:
220.             print("Error: no labels")
221.
222.     def binarize(self, mask_strength=1.2):
223.         if self.stack is not None:
224.             threshold_value =
225.                 skimage.filters.threshold_otsu(self.stack)
226.             self.stack_binary = self.stack > threshold_value *
227.                 mask_strength
228.         else:
229.             print("Error: no stack")
230.
231.     def find_bbox(self, offset=1.2):
232.         if self.stack_binary is not None:
233.             self.bbox =
234.                 skimage.measure.regionprops(self.stack_binary[int(len(self.stack)/2)].astype(int))[0].bbox
235.             self.bbox = [
236.                 # top
237.                 max(0, int(self.bbox[0] - (self.bbox[2] -
238.                 self.bbox[0]) * (offset - 1) / 2)),
239.                 # left
```

```
235.             max(0, int(self.bbox[1] - (self.bbox[3] -
self.bbox[1]) * (offset - 1) / 2)),
236.             # bottom
237.             min(self.height, int(self.bbox[2] + (self.bbox[2] -
self.bbox[0]) * (offset - 1) / 2)),
238.             # right
239.             min(self.width, int(self.bbox[3] + (self.bbox[3] -
self.bbox[1]) * (offset - 1) / 2))
240.         ]
241.     else:
242.         print("Error: no binary stack")
243.
244.     def crop(self):
245.         if self.bbox is not None:
246.             self.stack =
self.stack[:, self.bbox[0]:self.bbox[2], self.bbox[1]:self.bbox[3]]
247.             self.stack_binary =
self.stack_binary[:, self.bbox[0]:self.bbox[2], self.bbox[1]:self.bbox[3]]
248.         else:
249.             print("Error: no bbox")
250.
251.     def erode_dilate(self, iterations=2):
252.         if self.stack is not None:
253.             for i in range(iterations):
254.                 self.stack_binary =
skimage.morphology.binary_dilation(self.stack_binary)
255.                 for i in range(iterations):
256.                     self.stack_binary =
skimage.morphology.binary_erosion(self.stack_binary)
257.         else:
258.             print("Error: no stack")
259.     def label(self):
260.         if self.stack_binary is not None:
261.             self.labels = skimage.measure.label(self.stack_binary)
262.         else:
263.             print("Error: no binary stack")
264.     def copy(self):
265.         """
266.         Create a copy of the current StackProcessor instance.
267.
268.         Returns:
269.             StackProcessor: A new StackProcessor instance with the
same attributes.
270.         """
271.         # Create a new instance of the StackProcessor class
272.         copied_instance =
StackProcessor(self.directory_path, self.width, self.height)
273.
274.         # Copy the attributes from the current instance to the copied
instance
275.         copied_instance.stack = np.copy(self.stack) if self.stack is
not None else None
276.         copied_instance.stack_binary = np.copy(self.stack_binary) if
self.stack_binary is not None else None
```

```
277.         copied_instance.bbox = self.bbox
278.         copied_instance.mesh = self.mesh
279.         copied_instance.z = self.z # Copy the z attribute
280.
281.         return copied_instance
282.
283.     def calculate_total_volume(self, voxel_height=15.29,
voxel_width=15.29, voxel_depth=12.5):
284.         """
285.         Calculate the total volume of the binary stack.
286.
287.         Args:
288.             voxel_height (float): Height of each voxel in micrometers
289.             (um). Default is 12.5 um.
290.
291.         Returns:
292.             float: Total volume in cubic micrometers.
293.         """
294.         if self.stack_binary is not None:
295.             total_volume = 0.0
296.             for slice_binary in self.stack_binary:
297.                 area = np.sum(slice_binary * (voxel_height *
voxel_width))
298.                 slice_volume = area * voxel_depth
299.                 total_volume += slice_volume
300.             return total_volume
301.         else:
302.             print("Error: no binary stack")
303.     def invert(self):
304.         if self.stack_binary is not None:
305.             self.stack_binary = np.invert(self.stack_binary)
306.         else:
307.             print("Error: no binary stack")
308.     def extract_pores(self):
309.         if self.stack_binary is not None:
310.             inverted_binary_stack = np.invert(self.stack_binary)
311.             inverted_labels =
skimage.measure.label(inverted_binary_stack)
312.             self.labels =
skimage.segmentation.clear_border(inverted_labels)
313.             self.stack_binary = self.labels > 0
314.         else:
315.             print("Error: no binary stack")
```