

На правах рукописи



**Добрянский Василий Николаевич**

**ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОШКОВ ИЗ  
СПЛАВА AlSi10Mg НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА  
СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ**

Специальность 2.6.17. «Материаловедение»  
(технические науки)

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре 903 «Перспективные материалы и технологии аэрокосмического назначения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор **Рабинский Лев Наумович**

**Официальные оппоненты:** **Носова Екатерина Александровна**  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Самарский национальный  
исследовательский университет имени  
академика С.П. Королева»,  
заведующий кафедрой

**Чернышихин Станислав Викторович**  
PhD, ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский технический университет  
«МИСИС», заведующий лабораторией

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Балтийский государственный  
технический университет «ВОЕНМЕХ» им.  
Д.Ф. Устинова»

Защита состоится «19» декабря 2024 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 (Д 121.125.15) в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д.3., ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, учёному секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте [skvortsovasv@mai.ru](mailto:skvortsovasv@mai.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Университета

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета



Скворцова С.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы.

Аддитивное производство из порошковых материалов – одна из самых быстрорастущих технологий порошковой металлургии в настоящее время. Этому способствует высокий коэффициент использования материала, возможность создания полностью функциональных ответственных изделий с уникальной и технологически сложной, а иногда и невозпроизводимой для традиционных технологий геометрией, и повышенной массовой эффективностью.

Селективное лазерное плавление (СЛП) – это технология аддитивного производства, которая основана на послойном сплавлении порошкового материала по заданной цифровой модели. Подбор технологических параметров печати для получения изделий с оптимальными физико-механическими свойствами и минимальным уровнем остаточных напряжений является трудоемкой задачей, особенно при учёте вариативности и нестабильности свойств порошков, применяемых в аддитивном производстве. Под каждый новый порошок требуется проводить отдельные исследования, направленные на подбор оптимальных параметров его сплавления.

Практический интерес также представляет изготовление тонкостенных деталей, а учитывая послойность нанесения материала в технологии СЛП, возможность изготовления таких деталей напрямую зависит от размера частиц порошка. Наличие мелких частиц порошка улучшает кинетику консолидации из-за меньшего количества тепла, необходимого для расплавления частиц порошка. Кроме того, уменьшение размера частиц порошка приводит к увеличению удельной поверхности по отношению к объему, что, в свою очередь, повышает поглощательную способность порошкового слоя. Из-за высокой отражательной способности сплавов на основе Al ее повышение имеет высокое практическое значение. Средний размер частиц порошка может оказывать существенное влияние на качество получаемой поверхности изделия. Поэтому исследование параметров сплавления порошков различного гранулометрического состава является актуальной задачей.

При моделировании процессов лазерной обработки материалов широко используются аналитические и численные модели точечных и распределенных подвижных тепловых источников. В настоящей работе предлагается в том числе методика идентификации свойств порошкового слоя на основе этих моделей.

В ходе выполнения исследований процессов СЛП и применяемых в СЛП материалов в рамках реализации этапов государственного задания 2020-2023 гг. (FSFF-2023-0004) была выявлена и обоснована необходимость минимизации трудоёмкости процесса подбора оптимальных технологических параметров

обработки металлопорошковых композиций по технологии СЛП, что напрямую связано с идентификацией свойств порошков и выявлением зависимости этих свойств от их гранулометрического состава, а также разработкой математических моделей прогнозирования оптимальных параметров сплавления с учётом влияния свойств порошковых материалов. Решению этих задач в том числе посвящена данная работа.

**Цель диссертационной работы** заключается в изучении влияния гранулометрического состава порошка на его химический состав и параметры плавления, повышении достоверности оценок эффективных теплофизических свойств порошкового слоя на уровне исследования единичных треков на примере порошка сплава  $AlSi10Mg$  для повышения качества изделий, производимых с применением технологии селективного лазерного плавления.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести рассев стандартного порошка сплава  $AlSi10Mg$  на различные фракции и исследовать их гранулометрический и химический составы.

2. Провести анализ влияния гранулометрического состава порошков сплава  $AlSi10Mg$  и технологических параметров плавления на морфологию ванны расплава и структуру единичных треков, получаемых в результате селективного лазерного сплавления.

3. Провести анализ существующих моделей подвижных тепловых источников с целью описания тепловых процессов, реализующихся в процессе СЛП единичных треков из порошка  $AlSi10Mg$ . Провести безразмерный анализ результатов сплавления единичных треков с учетом основных критериев, входящих в рассматриваемые модели тепломассопереноса.

4. Разработать методику идентификации свойств порошкового слоя сплава  $AlSi10Mg$  (эффективных коэффициентов теплопроводности и поглощения) по результатам сплавления единичных треков с применением рассматриваемых аналитических моделей.

5. Определить основные зависимости морфологии ванны расплава и структуры единичных треков, получаемых в результате селективного лазерного плавления, от режимов сплавления, размеров частиц порошка и безразмерных критериев применяемых аналитических моделей.

### **Научная новизна.**

1. Показано, что для порошка  $AlSi10Mg$  при проведении отсева получаемые фракции обладают различным химическим составом. Установлено, что с увеличением размеров частиц содержание кремния в порошке возрастает с 11,5 вес.% для порошка со средним размером частиц 20,2 мкм до 13,1 вес.% для

порошка со средним размером частиц 73,4 мкм по данным энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии свободно насыпанных образцов порошка.

2. Предложена новая методика оценки эффективного коэффициента теплопроводности порошкового слоя сплава AlSi10Mg по результатам сплавления единичных треков и применения стандартных расчетных моделей для подвижных тепловых источников. Показано, что широко применяемые оценки для средней теплопроводности порошков в диапазоне рабочих температур процессов селективного лазерного плавления не позволяют достоверно описать имеющиеся экспериментальные данные. В частности, оценки по моделям последовательных ( $\lambda/100$ ) и параллельных ( $\lambda/2$ ) теплопроводящих фаз, соответственно, занижают и завышают значение среднего коэффициента теплопроводности, который для рассматриваемого порошка AlSi10Mg составил  $\lambda/4 \dots \lambda/5$  ( $\lambda$  – теплопроводность сплава).

3. Предложена новая методика оценки эффективного коэффициента поглощения порошкового слоя по результатам сплавления единичных треков и применения стандартных расчетных моделей для подвижных тепловых источников на примере порошков сплава AlSi10Mg. Показано, что коэффициент поглощения существенно зависит от размера частиц порошкового слоя и составляет для порошка сплава AlSi10Mg со средним размером частиц 20,2 мкм 0,45, а для порошка со средним размером частиц 73,4 мкм – 0,15.

4. Установлены закономерности влияния гранулометрического состава металлопорошковой композиции на морфологию ванны расплава и дефектность структуры единичных треков. Показано существенное влияние размера частиц порошка на величину энерговклада, необходимого для получения полностью сплавленного непрерывного единичного трека, при этом порошки с более крупным средним размером частиц требуют большего энерговклада. Установлено, что в режимах большого энерговклада (более 700 Дж/м) влияние размера частиц на морфологию ванны расплава нивелируется.

#### **Теоретическая и практическая значимость.**

1. Разработана методика оценки эффективных коэффициентов теплопроводности и поглощения порошкового слоя сплава AlSi10Mg по результатам плавления единичных треков и применения стандартных расчетных моделей для подвижных тепловых источников.

2. Определены безразмерные критерии аналитических моделей для прогноза морфологии ванны расплава и дефектности структуры единичных треков, получаемых в результате селективного лазерного плавления.

3. Разработана методика для прогноза морфологии ванны расплава и дефектности структуры единичных треков, получаемых в результате селективного лазерного плавления, без проведения экспериментальных

исследований.

4. Разработана методика учёта гранулометрического состава при подборе оптимальных параметров для процесса СЛП.

#### **Методология и методы исследования.**

Методологической основой исследования послужили работы ведущих российских и зарубежных ученых, государственные стандарты РФ.

При выполнении работы были использованы современные методы исследования: лазерная дифракция, порошковая рентгеновская дифракция, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, растровая электронная микроскопия, конфокальная лазерная сканирующая микроскопия, обработка цифровых изображений с помощью нейросетевых технологий, дифференциальная сканирующая калориметрия с термогравиметрией, аналитическое и численное моделирование.

#### **Основные научные положения, выносимые на защиту.**

1. Результаты исследования химического состава порошков сплава AlSi10Mg различного гранулометрического состава. Установленное повышение содержания кремния в фракциях порошка AlSi10Mg с большим средним размером частиц (11,5 вес.% для порошка со средним размером частиц 20,2 мкм и 13,1 вес.% для порошка со средним размером частиц 73,4 мкм).

2. Результаты исследования влияния размера частиц порошка на величину энергозатрат, необходимого для получения полностью сплавленного непрерывного единичного трека. Установленное повышение необходимого энергозатрат для порошков с более крупным средним размером частиц. Отсутствие влияния размера частиц порошкового слоя на морфологию ванны расплава для режимов с энергозатратом более 700 Дж/м.

3. Методика оценки эффективных коэффициентов теплопроводности и поглощения порошкового слоя сплава AlSi10Mg по результатам сплавления единичных треков и применения стандартных расчетных моделей для подвижных тепловых источников.

4. Результаты оценки эффективного коэффициента теплопроводности порошкового слоя для порошков различного гранулометрического состава.

5. Результаты оценки эффективного коэффициента поглощения порошкового слоя. Установленное снижение коэффициента поглощения для фракций порошка AlSi10Mg с большим средним размером частиц (0,45 для порошка со средним размером частиц 20,2 мкм и 0,15 для порошка со средним размером частиц 73,4 мкм).

6. Безразмерные критерии аналитических моделей для предиктивной оценки морфологии ванны расплава и структуры единичных треков, получаемых в результате селективного лазерного плавления.

7. Методика для предиктивной оценки морфологии ванны расплава и структуры единичных треков, получаемых в результате селективного лазерного плавления, без проведения экспериментальных исследований.

8. Оптимальные параметры плавления для процесса СЛП, полученные для отечественной установки AddSol D50 и металлопорошковых композиций сплава AlSi10Mg различного гранулометрического состава.

9. Методика учёта гранулометрического состава при подборе оптимальных параметров сплавления для процесса СЛП.

### **Степень достоверности результатов.**

Обоснованность и достоверность разработанных методик, полученных результатов и сформулированных выводов обеспечивается надежностью применяемых методов анализа и подтверждается сравнением с результатами из литературных источников.

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).

**Личный вклад автора** состоит в его непосредственном и активном участии в формировании цели и задач исследования, подготовке металлопорошковых композиций, в проведении экспериментальных исследований, анализе, обработке и систематизации полученных результатов, проведении расчётов, разработке методик, формулировке выводов по диссертации, а также подготовке публикаций по выполненной работе и личном участии в апробации результатов работы.

### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты работы доложены на 6 научно-технических конференциях и семинарах, в том числе: 1) 51 школа-конференция «Актуальные проблемы механики», Великий Новгород, 2024; 2) XIII всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 года; 3) XLIX Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения-2023», Москва, 2023; 4) 12-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, Москва, 2022; 5) XXVIII Международный симпозиума «динамические и технологические проблемы механики

конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова, Москва, 2022. 6) XIV Всероссийская научно-техническая студенческая школа-семинар. Симферополь, 2021.

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, из них 5 – в журналах, индексируемых в международной системе цитирования Scopus, 1 – свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Список основных публикаций по работе приведен в конце автореферата.

### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 128 наименований и 4 приложений. Материал диссертации изложен на 165 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка, 23 таблицы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

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

**В первой главе** приведен обзор работ по тематике исследования. Вводится понятие селективного лазерного плавления, характеризуются и классифицируются параметры процесса селективного лазерного плавления, их влияние на качество получаемых изделий. Обсуждаются проблемы, возникающие в процессе печати изделий из металлов и пути их решения. Приводятся подходы и методы моделирования процессов СЛП. Описываются методы идентификации свойств материалов, применяемых в технологиях СЛП. Подробно обсуждаются подходы исследования процессов СЛП, в том числе на основе анализа сплавления единичных треков. Обсуждаются принципы построения карт технологического процесса.

Литературными данными подтверждено, что гранулометрический состав металлопорошковой композиции может оказывать существенное влияние на качество получаемых с применением технологии СЛП изделий, а также оптимальные технологические параметры процесса и теплофизические свойства порошкового слоя. Показано, что исследование таких закономерностей является актуальной задачей. Установлено, что ранее влияние гранулометрии на химический состав порошка AlSi10Mg детально не исследовалось.

**Вторая глава** посвящена описанию процесса подготовки металлопорошковых композиций, методов экспериментальных исследований, а



также применяемого оборудования. Приведены результаты исследований гранулометрии, химического состава и теплофизических свойств металлопорошковых композиций различного гранулометрического состава. Выведены закономерности влияния среднего размера частиц на химический состав.

Для проведения экспериментальных исследований в качестве исходного сырья использовался алюминий-порошок марки АСП-45 AlSi10Mg/ASP-45 AlSi10Mg (ТУ 1791-011-49421776-2016), произведенный компанией «Российский алюминий» (ОК РУСАЛ, г. Москва, Россия). Порошок был изготовлен методом индукционной плавки электрода с распылением газом (Electrode Induction Gas Atomization, EIGA). Согласно спецификации от производителя, номинальный размер частиц лежит в диапазоне от 20 мкм до 63 мкм, средний размер 35 мкм, заявленный химический состав представлен в таблице ниже (табл. 1).

Таблица 1 – Химический состав исходного порошка сплава AlSi10Mg

Марка сплава	Содержание элементов, %							
	Al	Si	Mg	Fe	Ti	Cu	Mn	O
AlSi10Mg	87,5–89,7	9–11	0,2–0,45	≤0,35	≤0,15	≤0,05	≤0,45	≤0,08

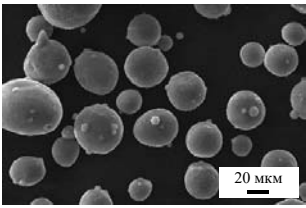
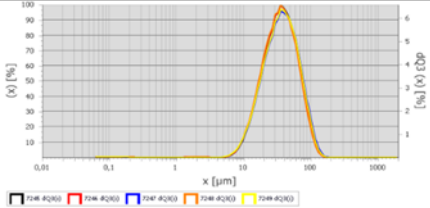
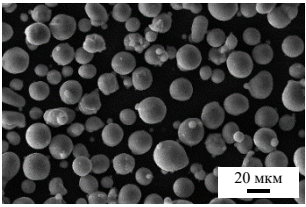
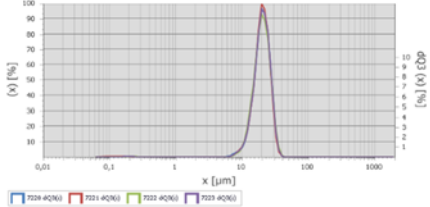
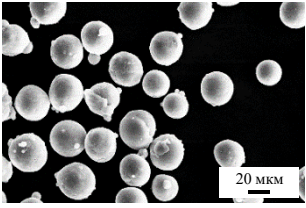
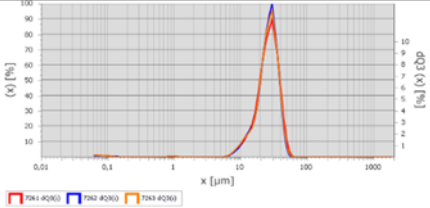
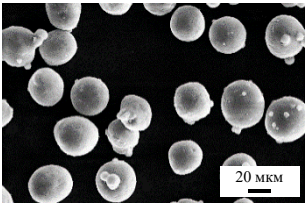
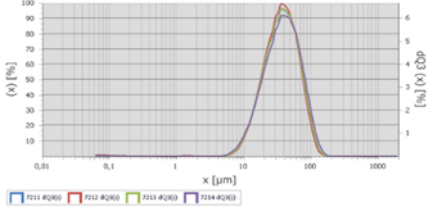
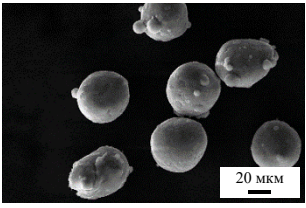
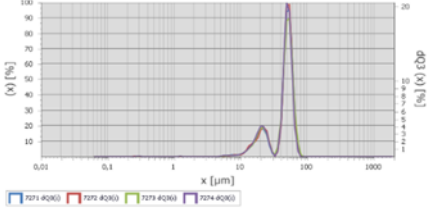
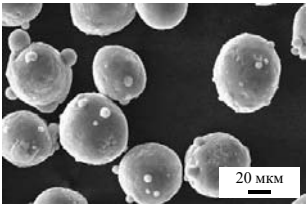
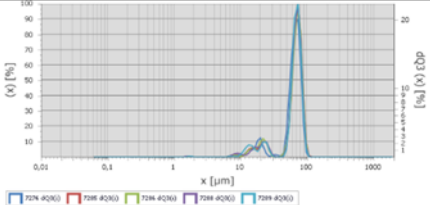
Для проведения дальнейших исследований исходный порошок был рассеян с помощью вибрационного грохота Analysette 3 (Fritsch, Германия) через комплектные сита на следующие фракции: до 20 мкм (20), 20-32 мкм (25), 32-40 мкм (35), 40-50 мкм (45) и более 50 мкм (50). В скобках указано принятое обозначение партии порошка. Порошок в состоянии поставки имеет условное обозначение «Стандарт».

Контроль размера частиц порошков, полученных после отсева, выполнялся с использованием лазерного анализатора частиц Analysette 22 (Fritsch, Германия) методом лазерной дифракции (ЛД). Также проводились растровая электронная микроскопия (РЭМ) и энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДС) с использованием микроскопа EVO-40 (Carl Zeiss, Германия), оснащённым рентгеновским энергодисперсионным спектрометром X-Max Oxford Instruments. Эти исследования подтвердили характерный средний размер частиц, полученный методом ЛД.

Для определения типовых форм частиц порошков дополнительно проводился микроскопический контроль частиц согласно ГОСТ 25894-83 «Статистика по составу и параметрам частиц типовых форм». Результаты исследования гранулометрии и морфологии приведены в табл. 2. Порошки имеют преимущественно сферическую или округлую форму, нормальное распределение и различный средний размер: 35,5 мкм (Стандарт), 20,2 мкм (20), 26,4 мкм (25), 36,9 мкм (35), 50,2 мкм (45), 73,4 мкм (50). Для порошков 45 и 50

наблюдается вторая мода, которая объясняется наличием мелких частиц-сателлитов, которые во время ультразвуковой обработки высвобождаются от контакта с более крупными частицами.

Таблица 2 – Гранулометрический состав и морфология частиц

Партия порошка	D10, мкм D50, мкм D90, мкм Ср., мкм SPAN	Микроснимки частиц (РЭМ)	Распределение частиц по размерам (ЛД)
Стандарт	15,8 35,5 73,2 40,61 1,61		
20	13,7 20,2 27,8 20,44 0,69		
25	14,8 26,4 39 26,68 0,91		
35	16 36,9 76 42,11 1,63		
45	19,4 50,2 81,5 49,46 1,24		
50	22,9 73,4 91,1 66,67 0,92		

Химический состав порошков был исследован с помощью трёх различных подходов: порошковой рентгеновской дифракции ПРД, ЭДС свободно насыпанного порошка и ЭДС поперечных шлифов порошинок. Данные ЭДС позволили уточнить содержание химических элементов в порошках, а также исследовать их распределение внутри частиц. Для этого частицы порошка были

залиты в проводящую полимерную смолу и зашлифованы. Таким образом были получены индивидуальные поперечные срезы частиц, на которых были построены карты распределения химических элементов. Исследования карт проводилось на трёх различных частицах для каждого типа порошка. Измерения состава методом ЭДС проводилось как внутри частиц, на срезах, так и снаружи, на свободно насыпанных образцах порошка.

ПРД проводилась на установке для структурного анализа ALR X'TRA (Thermo-Fisher Scientific, Швейцария). Были получены данные по содержанию алюминия и кремния. Магний и другие элементы в процессе ПРД не распознавались, так как применяемое оборудование имеет порог чувствительности, который не позволяет выявлять элементы с массовой долей менее 2%. Из полученных данных ПРД (табл. 3) видно, что с увеличением размеров частиц содержание кремния в порошке возрастает с 6,6 до 7,9 вес.%, а для порошка в состоянии поставки содержания кремния составляет 8,7 вес.%.

Исследования распределения основных химических элементов (Al, Si и Mg), сделанные на свободно насыпанных образцах порошка в состоянии поставки с использованием ЭДС, представлены на рис. 1, а, внутри частиц – на рис. 1, б. Здесь видно, что химический состав частиц является достаточно однородным, элементы примерно равномерно распределены по сечениям частиц.

Сводка результатов измерений массовой доли химических элементов (Al, Si и Mg) в порошках AlSi10Mg представлены на рис. 2. Здесь (для Al и Si) линией показаны данные ПРД, полученные для образцов порошка. Точками показаны данные, полученные с использованием ЭДС для индивидуальных частиц. Пунктиром показаны данные, соответствующие представленным производителем с учетом возможных разбросов для стандартного порошка. Содержание элементов, установленное для стандартного порошка, показано красным цветом. Видно, что имеется чёткий тренд на уменьшение содержания алюминия и увеличение содержания кремния в порошках с более крупным размером частиц, что подтверждается также исследованиями ЭДС для индивидуальных частиц. Реализуется зависимость, при которой для самого мелкодисперсного порошка в составе присутствует содержание Al / Si 90,36 % / 9,64 %, а в самом крупнодисперсном 86,53 % / 13,47 % (ЭДС\_Сечения). Более того, для крупного порошка реализующийся состав даже выходит за границы допусков, указанные производителем. Линия тренда на изменение содержания кремния в рассматриваемом диапазоне средних размеров частиц может быть описана следующим соотношением (с погрешностью не более 0,9 %):  

$$y = -0.0003x^2 + 0.00544x + 5.6724.$$
 Содержание магния практически не изменяется в порошках и лежит в пределах, указанных производителем.

Таблица 3 – Результаты измерений химического состава методом ПРД

Наименование порошка	Весовой % (ПРД)	
	Кремний	Алюминий
Стандарт	8,7	91,3
20	6,6	93,4
25	6,9	93,1
35	7,3	92,7
45	7,5	92,5
50	7,9	92,1

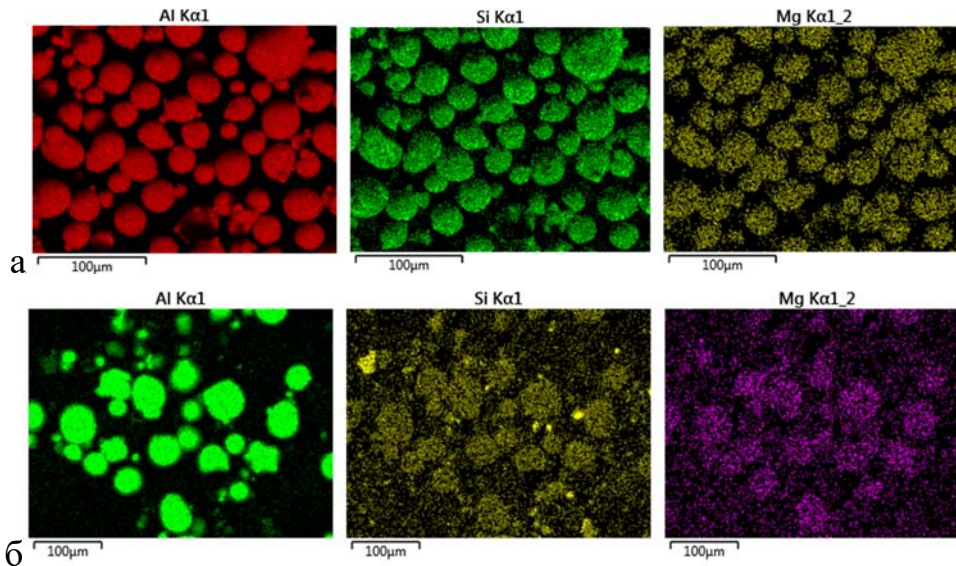


Рисунок 1 – Результаты ЭДС для поперечных сечений образцов порошка в состоянии поставки: свободно насыпанные частицы (а), поперечные шлифы частиц (б)

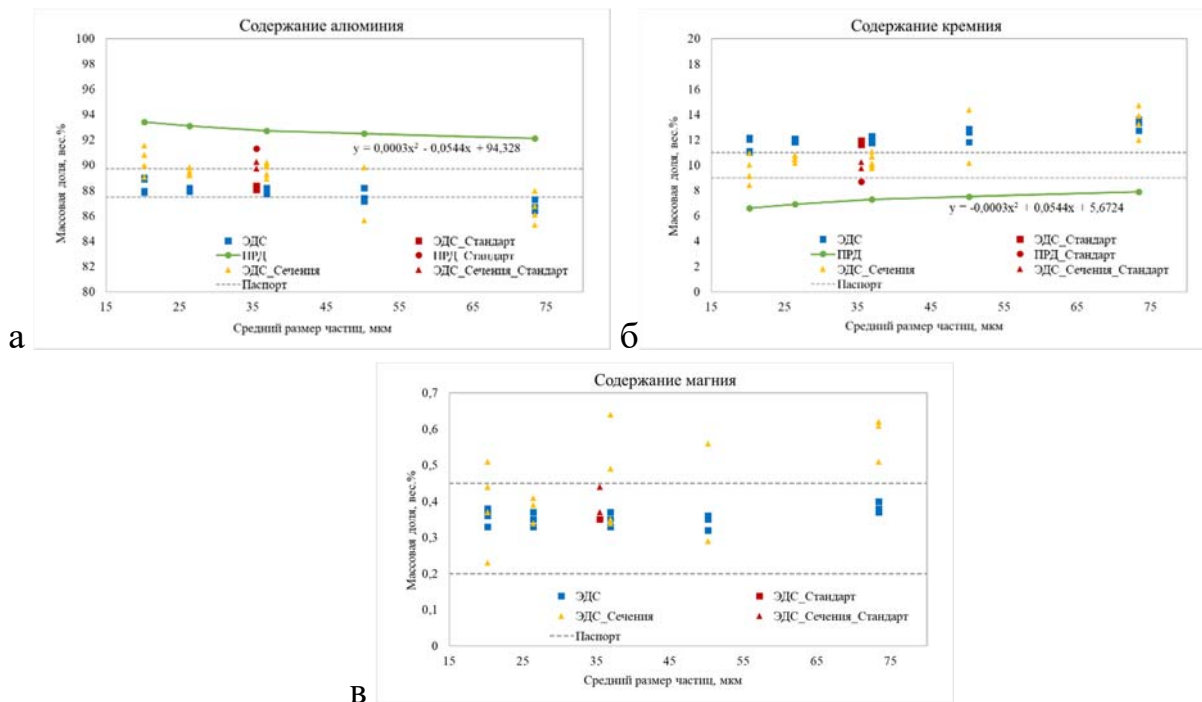


Рисунок 2 – Результаты измерений массовых долей алюминия (а), кремния (б) и магния (в) в порошках AlSi10Mg различного гранулометрического состава

Насыпная плотность порошков была исследована с использованием метода воронки согласно ГОСТ 19440-94 «Порошки металлические. Определение насыпной плотности». Текучесть порошков была исследована согласно ГОСТ 20899-98 «Порошки металлические. Определение текучести с помощью калиброванной воронки (прибора Холла)».

Использовался анализатор текучести металлических порошков с калиброванной воронкой (прибор Холла) HFLOW-1 (Bettersize Ltd., Китай). Для взвешивания образцов использовались весы лабораторные BM213M-II (0,001 г) (ОКБ Веста, Россия).

В результате исследования насыпной плотности порошков различного гранулометрического состава не обнаружено существенного влияния среднего размера частиц порошка на его насыпную плотность (рис. 3, а). Было отмечено незначительное увеличение насыпной плотности с увеличением среднего размера частиц (1,42 г/см<sup>3</sup> для порошка со средним размером 20,4 и 1,45 г/см<sup>3</sup> – для 66,7). В результаты исследования текучести порошков различного гранулометрического состава установлено существенное влияние среднего размера частиц на текучесть порошковой пробы (рис. 3, б). Порошок со средним размером частиц 26,4 истекал в течение 104,5 с, тогда как порошок со средним размером частиц 73,4 – в течение 48,5 с. Результаты измерений для порошка «20» были исключены, так как течение порошка во время исследования неоднократно останавливалось.

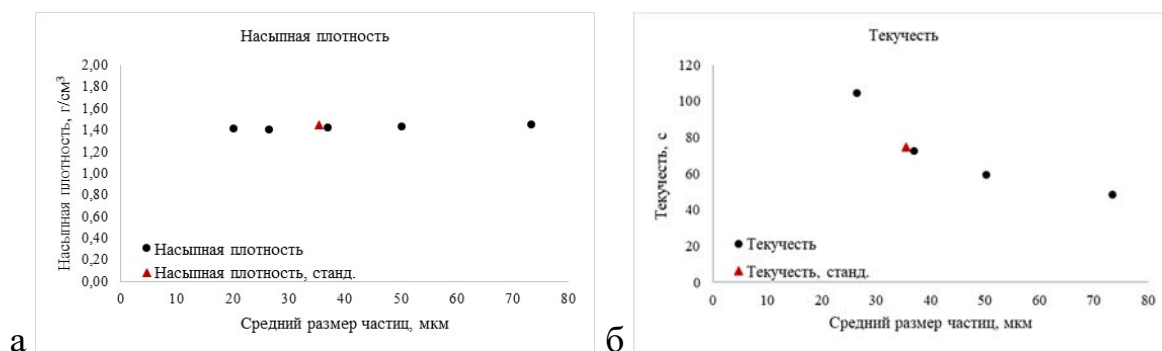


Рисунок 3 – Результаты исследования насыпной плотности (а) и текучести (б) порошков различного гранулометрического состава

Для оценки влияния содержания кремния и гранулометрического состава порошка на температуру плавления был проведен синхронный термический анализ (СТА) (совмещенная дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) с термогравиметрией (ТГ)) на установке NETZSCH STA 449 F1 Jupiter (Германия) образцов порошков в атмосфере инертного газа (аргона) в интервале температур от 25 до 700 °С со скоростью нагрева 10 °С /мин. В результате СТА было установлено, что в интервале температур от примерно 560 до 590 °С происходит плавление частиц порошка, сопровождаемое поглощением тепла –

пиком с центральным максимумом примерно при 570 °С. Такая картина наблюдалась для всех 6 образцов. Изменений массы для всех 6 образцов не наблюдалось. Существенного влияния гранулометрического и химического составов порошка на температуру плавления выявлено не было.

Темплоёмкость порошкового слоя была оценена по правилу смеси с учётом пористости порошкового слоя и при условии заполнения этих пор аргоном. Экспериментально теплоёмкость не оценивалась.

По результатам анализа литературных установлено, что широко применяемые оценки для средней теплопроводности порошков в диапазоне рабочих температур процессов селективного лазерного плавления не позволяют достоверно описать имеющиеся экспериментальные данные, разброс получаемых значений: от 0,016 Вт/(м·К) до 65,22 Вт/(м·К).

**Третья глава** посвящена описанию проводимых экспериментальных исследований по сплавлению единичных треков. Приводятся результаты СЛП единичных треков, микрофотографии шлифов их поперечных сечений, карты технологического процесса СЛП.

В настоящем исследовании рассматривается процесс СЛП на примере эксперимента по сплавлению единичных треков (*англ.* single track). Единичные треки были получены для порошков сплава AlSi10Mg с различным гранулометрическим составом при различных скоростях сканирования (0,1-1,98 м/с с шагом 0,235 м/с) и уровнях мощности (40-400 Вт с шагом 36 Вт) лазерного источника.

Эксперимент проводился на отечественной установке AddSol D50 (ООО «Титан-Авангард», Москва, Россия), укомплектованной непрерывным (CW) иттербиевым волоконным лазером IPG Photonics (Мальборо, Массачусетс, США). Максимальная мощность – 400 Вт, длина волны 1064 нм, размер лазерного пятна 80 мкм, профиль лазерного луча имел гауссово распределение плотности мощности. Для технологической подготовки всех управляющих программ, компоновки запусков и подробного планирования экспериментов использовался программный комплекс ПК ТПП (МАИ, Москва, Россия).

Экспериментальные исследования проводились, исходя из решения нескольких задач: 1) определение начала проплавления порошкового слоя толщиной 60 мкм (отыскание технологических параметров, при которых только начинает формироваться трек, сплавленный с материалом платформы, по виду сверху) для решения обратной задачи по идентификации свойств порошка; 2) анализ морфологии получаемых единичных треков (по виду сверху и на поперечных шлифах), качество трека и наличие дефектов (по виду сверху и на поперечных шлифах); 3) исследование влияние размера частиц на механизм теплопередачи, морфологию и качество получаемых единичных треков, а также

появление дефектов; 4) подбор оптимальных технологических параметров для сплавления порошков различного гранулометрического состава. Общая схема экспериментальных исследований приведена на рис. 4.

По результатам обработки экспериментов были получены значения мощности, скорости сканирования и соответствующего энерговклада, при которых произошло проплавление порошкового слоя толщиной 60 мкм, и сформировался единичный трек для каждого порошка. Было установлено, что 1) ключевым является значение линейного энерговклада, а не мощность или скорость источника; 2) для порошка различного гранулометрического состава требуется различное количество энергии для проплавления слоя (при одинаковой толщине слоя), что также находит подтверждение в литературных источниках; 3) эффект связан со свойствами порошкового слоя, т.к. алгоритм подготовки и проведения эксперимента был постоянным.

Для единичных треков, полученных для каждого из порошков, были исследованы наборы изображений вида сверху и поперечных шлифов. Пример набора изображений по виду сверху приведен на рис. 5, поперечных шлифов – на рис. 6. По результатам их анализа были составлены карты процесса (рис. 7-9).

При составлении карт по виду сверху треки разбивались на несколько групп: комкование, нерегулярный, непрерывный, нет проплавления и переплавленный. Примеры карт для порошка «Стандарт», «20» и «50» представлены на рис. 7.

По результатам обработки поперечных шлифов в зависимости от морфологии ванны расплава (глубины и ширины, их отношения), а также внешнего вида сечения треки разбивались на категории: глубокое проплавление, нормальный трек, нерегулярный трек, комкование и отсутствие проплавления. Примеры карт для порошка «Стандарт», «20» и «50» представлены на рис. 8.

На отдельной карте были отмечены треки с дефектом типа трещина с наложенными контурными графиками, отражающими отношение глубины ванны расплава к ее ширине. Примеры карт для порошка «Стандарт», «20» и «50» представлены на рис. 9. Были получены диапазоны отношений глубины и ширины ванны расплава, при которых появляется/отсутствует трещина (рис. 10).

По итогам исследования единичных треков установлено существенное влияние гранулометрического состава на сплавление, морфологию единичного трека и дефектность его структуры, а также оптимальные технологические параметры процесса.

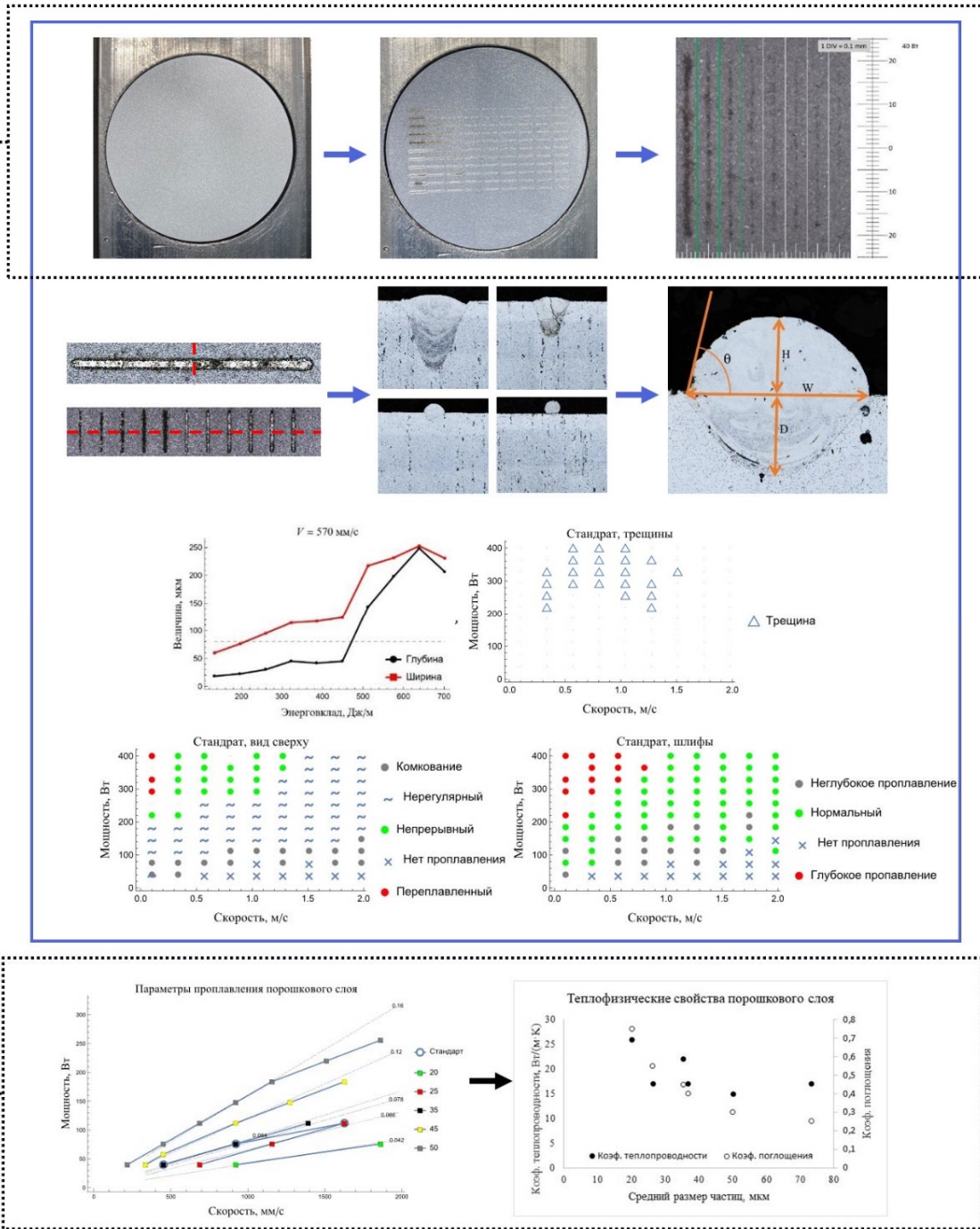


Рисунок 4 – Общая схема проведения экспериментальных исследований по сплавлению единичных треков

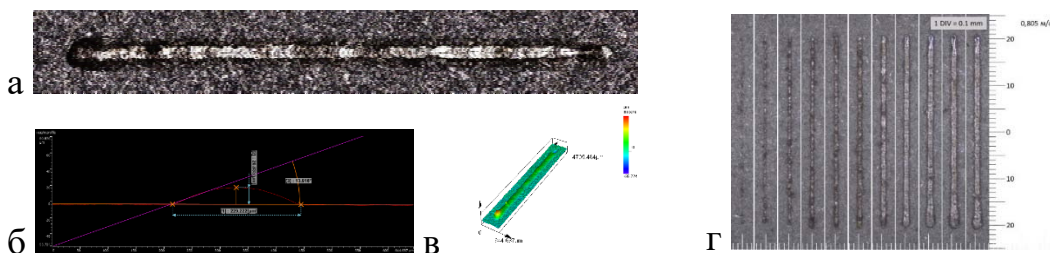


Рисунок 5 – Единичные треки, полученные на порошке «Стандарт»: микроснимок (а), поперечный контур надплатформенной части (б), 3D-модель (в), треки, полученные при различных параметрах процесса (г)



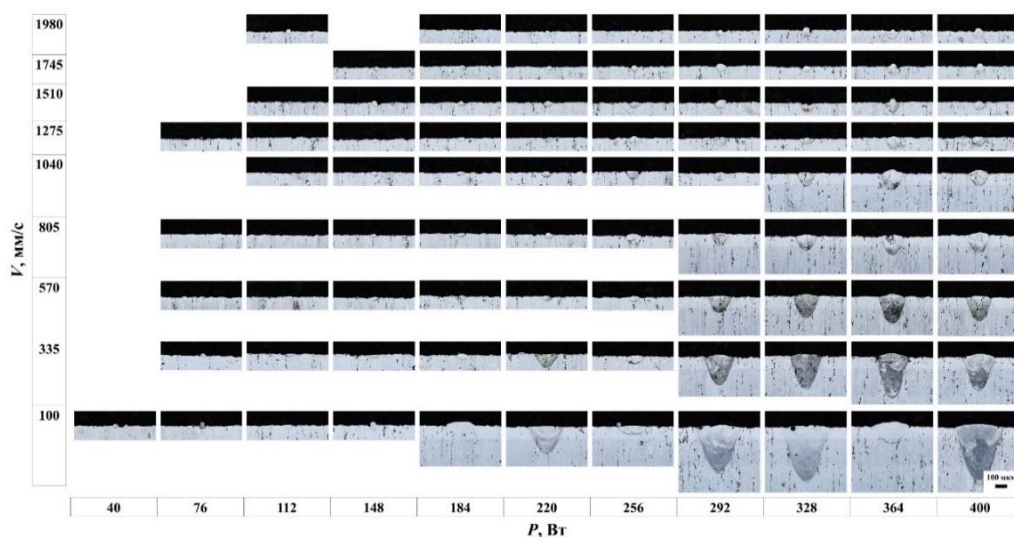


Рисунок 6 – Поперечные шлифы единичных треков, порошок «Стандарт»

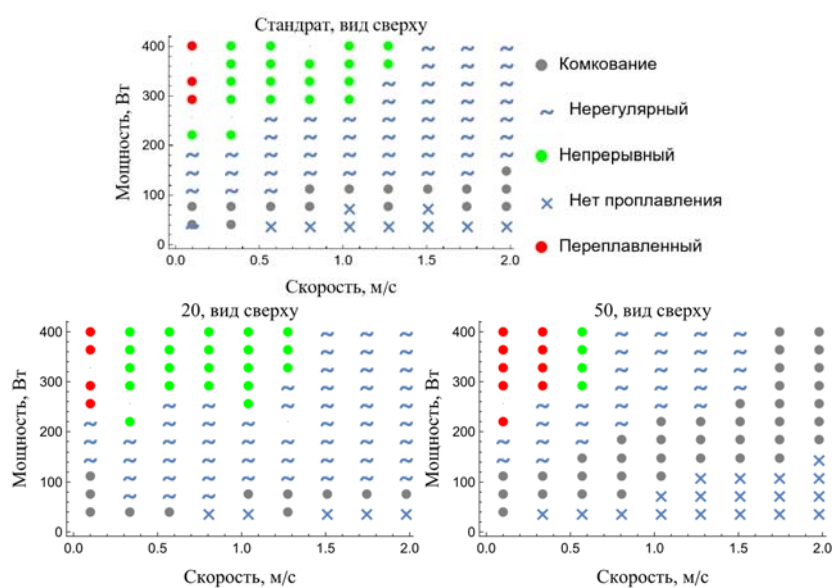


Рисунок 7 – Карты процесса СЛП (по виду трека сверху) для порошков «Стандарт» (а), «20» (б) и «50» (в)

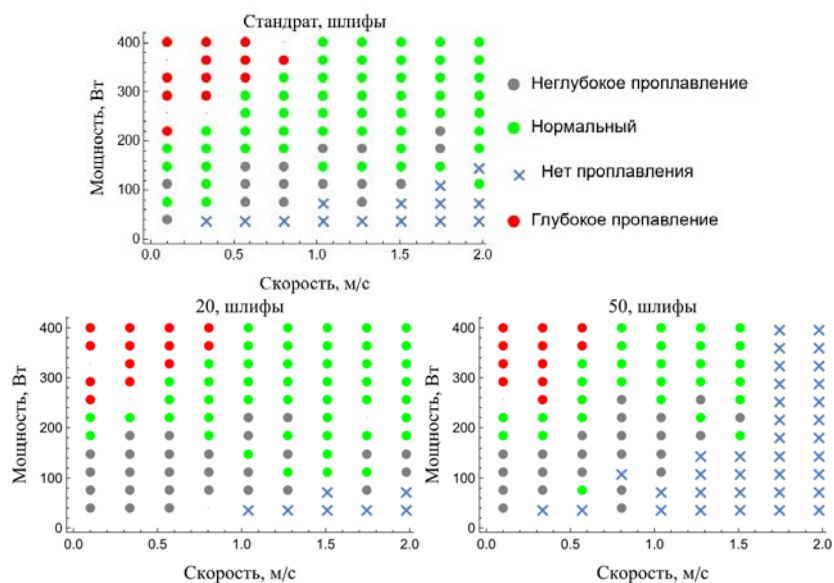


Рисунок 8 – Карты процесса СЛП (по результатам анализа поперечных шлифов) для порошков «Стандарт» (а), «20» (б) и «50» (в)

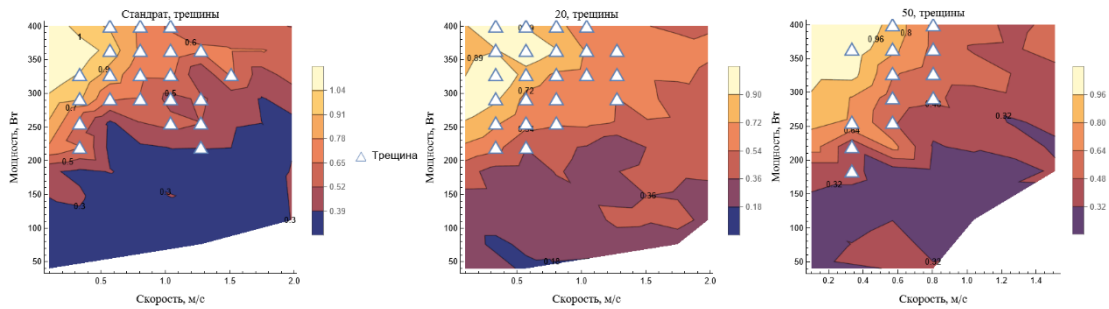


Рисунок 9 – Карты появления трещин для порошков «Стандарт» (а), «20» (б) и «50» (в), шкала – отношение глубины к ширине



Рисунок 10 – Отношения глубины ванны расплава к ее ширине при появлении трещины

В четвёртой главе показано применение моделей точечного (1) и подвижного (2) теплового источника, распределённого по Гауссу, в безразмерном виде для решения обратной задачи идентификации теплофизических свойств порошкового слоя (с дополнительным применением метода оптимизации, функция цели которого определялась как среднеквадратичная ошибка между теоретической и действительной глубиной проплавления) и определения безразмерных критериев аналитических моделей для прогноза морфологии ванны расплава и дефектности структуры единичных треков, получаемых в результате СЛП.

$$\theta = n \frac{1}{R} e^{-(\bar{\xi} + R)}, \quad (1)$$

$$\theta = n \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{v^2 t}{2\alpha}} \frac{1}{\sqrt{\tau}} e^{-\frac{\xi^2 + \bar{y}^2 + 2\xi\tau + \tau^2}{2\tau + 2Pe^2} - \frac{\bar{z}^2}{2\tau}} d\tau, \quad (2)$$

где  $\theta = \frac{T - T_0}{T_{пл} - T_0}$  – относительное изменение поля температуры, нормированное

на критическое значение, связанное с температурой плавления материала  $T_{пл}$ ,

$n = \frac{Pv}{4\pi\alpha^2 \rho C_p (T_{пл} - T_0)}$  – операционный параметр (параметр процесса),

$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$  – коэффициент температуропроводности [ $\text{м}^2/\text{с}$ ],  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности [ $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ],  $\rho$  – плотность [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ],  $C_p$  – теплоёмкость [ $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ];  $v$  – скорость движения источника в направлении оси  $x$  [ $\text{м}/\text{с}^2$ ],  $P$  – мощность источника [ $\text{Вт}$ ],  $\bar{\xi} = \frac{v\xi}{2\alpha}$ ;  $\bar{y} = \frac{vy}{2\alpha}$ ;  $\bar{z} = \frac{vz}{2\alpha}$  – безразмерные координаты точки в подвижной системе координат,  $\xi = x - vt$  – координата в направлении движения источника в подвижной системе координат (вдоль  $x$ ),  $\tau$  – безразмерное время,  $Pe = \frac{\sigma v}{2\alpha}$  – это стандартное определение критерия Пекле для рассматриваемой проблемы,  $\sigma$  – диаметр лазерного пучка.

Показано, что исследуемые модели применимы для решения обратной задачи идентификации свойств порошкового слоя. Установлено существенное влияние гранулометрии на эффективный коэффициент поглощения порошкового слоя, значительного влияния на эффективную теплопроводность не установлено (рис. 11, а). Показано, что эффективный коэффициент теплопроводности для порошка AlSi10Mg в диапазоне температур процесса СЛП составил  $\lambda/4 \dots \lambda/5$  ( $\lambda$  – теплопроводность сплава) (рис. 11, а). Пример сопоставление экспериментальных данных и теоретических оценок безразмерной глубины проплавления для стандартного порошка при подстановке найденных значений свойств приведено на рис. 11, б (сплошная линия – точечный источник, пунктир – распределенный источник, точки, цвет которых соответствует цвету пунктирных линий, – экспериментальные данные).

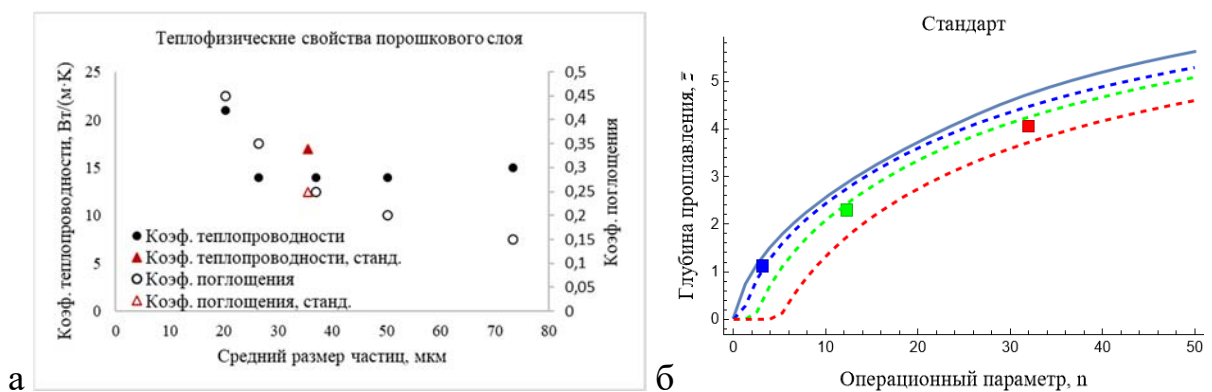


Рисунок 11 – Полученные значения эффективных коэффициентов поглощения и теплопроводности порошкового слоя (а), сопоставление экспериментальных данных и теоретических оценок безразмерной глубины проплавления для стандартного порошка (б)

Модели подвижных точечных и распределенных тепловых источников показали хорошую корреляцию с экспериментальными данными при анализе ширины и глубины ванны расплава при сплавлении единичных треков методами СЛП в широком диапазоне технологических параметров. Учёт влияния

порошкового слоя на морфологию ванны расплава может быть осуществлён путём вычитания энерговклада, требуемого для его проплавления, из номинального энерговклада, который может быть вычислен по формулам (3) – гипотеза № 3 или (4) – гипотеза № 6 (рис. 12).

$$P_n = E_n V, \quad (3)$$

$$P_n = C_{pn} \rho_n w h_n (T_{nl} - T_0) V, \quad (2)$$

где  $E_n$  – энерговклад, требуемый для проплавления порошкового слоя,  $C_{pn}$  – теплоемкость порошкового слоя,  $\rho_n$  – плотность порошкового слоя,  $w$  – ширина единичного трека,  $h_n$  – толщина порошкового слоя.

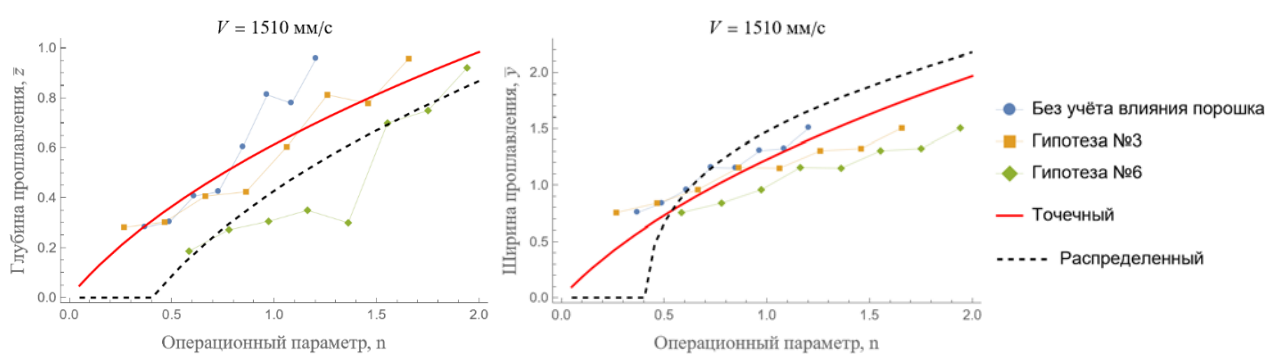


Рисунок 12 – Сопоставление теоретических оценок для параметров ванны расплава и обезразмеренных экспериментальных данных для порошка «20» для  $V = 1510 \text{ мм/с}$

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В ходе проведения исследований показано, что для порошка AlSi10Mg при проведении рассева получаемые фракции обладают различным химическим составом. Установлено, что с увеличением размеров частиц содержание кремния в порошке возрастает с 11,5 вес.% для порошка со средним размером частиц 20,2 мкм до 13,1 вес.% для порошка со средним размером частиц 73,4 мкм по данным энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии свободно насыпанных образцов порошка.

Установлены закономерности влияния гранулометрического состава порошка на морфологию ванны расплава и дефектность структуры единичных треков. Показано существенное влияние размера частиц порошка на величину энерговклада, необходимого для получения полностью сплавленного непрерывного единичного трека, при этом порошки с более крупным средним размером частиц требуют большего энерговклада.

Разработана и верифицирована методика оценки средних эффективных коэффициентов теплопроводности и поглощения порошкового слоя сплава AlSi10Mg в диапазоне температур процесса СЛП по результатам сплавления единичных треков и применения стандартных расчетных моделей для

подвижных тепловых источников. Показано, что широко применяемые оценки для средней теплопроводности порошков в диапазоне рабочих температур процессов селективного лазерного плавления не позволяют достоверно описать имеющиеся экспериментальные данные. В частности, оценки по моделям последовательных ( $\lambda/100$ ) и параллельных ( $\lambda/2$ ) теплопроводящих фаз, соответственно, занижают и завышают значение среднего коэффициента теплопроводности, который для рассматриваемого порошка AlSi10Mg составил  $\lambda/4 \dots \lambda/5$  ( $\lambda$  – теплопроводность сплава).

Разработана и верифицирована методика оценки эффективного коэффициента поглощения порошкового слоя по результатам сплавления единичных треков и применения стандартных расчетных моделей для подвижных тепловых источников на примере порошков сплава AlSi10Mg. Показано, что коэффициент поглощения существенно зависит от размера частиц порошкового слоя и составляет для порошка сплава AlSi10Mg со средним размером частиц 20,2 мкм 0,45, а для порошка со средним размером частиц 73,4 мкм – 0,15.

Проведён безразмерный анализ и определены безразмерные критерии аналитических моделей подвижных тепловых источников для прогноза морфологии ванны расплава и дефектности ее структуры.

Разработана и верифицирована методика учёта гранулометрического состава при подборе оптимальных параметров для процесса СЛП.

Получена обширная база результатов экспериментальных исследований сплавления единичных треков для порошков сплава AlSi10Mg различного гранулометрического состава.

**В заключении** обобщены основные результаты диссертационной работы.

**В приложении** приведены дополнительные таблицы и иллюстрации.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в журналах, индексируемых Scopus:**

1. Dobryanskiy V.N., Korobov K.S., Rabinskiy L.N. Single Tracks Obtained by Selective Laser Melting: Analysis of Digital Images //Russian Engineering Research. – 2024. – Т. 44. – №. 5. – С. 709-712.

2. Dobryanskiy V.N. et al. Generalized Unsteady Thermal Conductivity in a Half-Space //Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2023. – Т. 44. – №. 10. – С. 4429-4437.

3. Dobryanskiy V.N. et al. Estimation of finite heat distribution rate in the process of intensive heating of solids //Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2022. – Т. 43. – №. 7. – С. 1832-1841.

4. Belov P.A., Lurie S.A., Dobryanskiy V.N. Variational formulation of linear equations of coupled thermohydrodynamics and heat conductivity //Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2020. – Т. 41. – С. 1949-1963.

5. Dobryanskiy V.N., Rabinskiy L.N., Tushavina O.V. Validation of methodology for modeling effects of loss of stability in thin-walled parts manufactured using SLM technology //Periodico Tche Quimica. – 2019. – Т. 16. – №. 33.

#### **Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ:**

6. Рабинский Л.Н., Орехов А.А., Добрянский В.Н. Программа для расчета термонапряженного состояния тонкостенной конструкции цилиндрического типа, изготавливаемой методами аддитивных технологий. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020610096, 09.01.2020. Заявка № 2019666918 от 19.12.2019.

#### **Прочие публикации по теме диссертации:**

7. Добрянский В.Н., Соляев Ю.О. Влияние гранулометрического состава порошка на морфологию ванны расплава в процессе селективного лазерного плавления. 51 школа-конференция «Актуальные проблемы механики», Великий Новгород, 2024.

8. Добрянский В.Н., Соляев Ю.О., Рабинский Л.Н. Оценка и прогнозирование качества единичных треков (single track) в процессах селективного лазерного плавления металлических порошков (SLM). XIII всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 года.

9. Добрянский В.Н. Верификация решения Вилсона-Розенталя для движущихся точечного и распределенного источников тепла в задаче моделирования процесса селективного лазерного плавления. XLIX Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения-2023», Москва, 2023.

10. Добрянский В.Н., Соляев Ю.О. Исследование влияния гранулометрического состава на параметры сплавления порошка сплава AlSi10Mg. 12-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, Москва, 2022.

11. Соляев Ю.О., Добрянский В.Н., Брыкин В.А. Влияние размера и распределения частиц порошка на формирование одиночных треков AlSi10Mg при селективном лазерном плавлении. XXVIII Международный симпозиума «динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова, Москва, 2022.

12. Брыкин В.А., Добрянский В.Н. Методика технологического проектирования процессов аддитивного производства методом выборочной лазерной плавки металлопорошковых композиций. XIV Всероссийская научно-техническая студенческая школа-семинар. Симферополь, 2021



