

На правах рукописи

Шустова Людмила Александровна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С
ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗ
ОТЕЧЕСТВЕННОЙ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ**

Специальность 2.5.5 – Технология и оборудование механической и
физико - технической обработки

Автореферат диссертации на соискание

ученой степени кандидата наук



Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:

Григорьянц Александр Григорьевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Горунов Андрей Игоревич
доктор технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, Научно-
образовательный центр «Конструкционные
и функциональные материалы», профессор
Петровский Виктор Николаевич
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры лазерной физики
Института лазерных и плазменных
технологий НИЯУ МИФИ, Руководитель
Лазерного центра Национального
исследовательского ядерного университета
«МИФИ»

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский
политехнический университет»

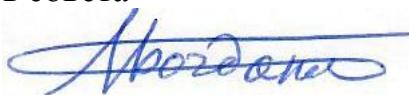
Защита диссертации состоится «___» 2025 г. в ___
часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 в ФГБОУ
ВО «Московский государственный технический университет имени
Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им.
Н.Э. Баумана) по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью
организации, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте
www.bmstu.ru.

Телефон для справок: +7 (499) 263-66-33 доб.36-28
Автореферат разослан «___» 2025 г.
Ученый секретарь совета

к.т.н., доцент



А.В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Актуальность данного исследования связана с необходимостью получения деталей сложной конфигурации из металлопорошковой композиции (МПК) 28Х3СНМВФА (СП28), изготовление которой позволяет снизить время производства и объем последующей обработки заготовки до получения детали и изделия в целом. Данная металлопорошковая композиция выбрана близкой к материалу деталей двигательной установки (ДУ).

Новая технология на основе аддитивных методов позволяет сделать процесс изготовления деталей более точным, что решит задачу экономии производственных ресурсов.

Выполнена отработка и внедрение данной технологии на предприятии Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Конструкторское бюро машиностроения» (АО «НПК «КБМ») – в крупном конструкторском и научно-производственном центре, где проводятся работы по проектированию, изготовлению, испытанию и в целом комплексной отработке техники различных направлений.

Цель работы: Разработка технологии и исследование процесса выращивания деталей двигательной установки (ДУ) методом селективного лазерного плавления и коаксиального лазерного плавления из металлопорошковой композиции 28Х3СНМВФА.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработка технических условий на металлопорошковую композицию деталей ДУ;
2. Разработка технологии выращивания изделий методом коаксиального лазерного плавления (КЛП) на отечественном оборудовании из отечественной МПК;
3. Разработка технологии выращивания изделий методом селективного лазерного плавления (СЛП) на отечественном оборудовании из отечественной МПК;
4. Проведение моделирования и использование модели оценки напряжений и деформаций;
5. Проведение испытаний (прочность, герметичность, огневые стендовые);
6. Изготовление деталей ДУ сложной конфигурации методом КЛП и СЛП.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлено, что для выращивания деталей ДУ, следует использовать МПК 28Х3СНМВФА с размером частиц в диапазоне 63-100 мкм для коаксиального лазерного плавления и с размером частиц в диапазоне 10-40 мкм для селективного лазерного плавления.

2. Установлено, что для изготовления образцов из МПК 28Х3СНМВФА необходимо соблюдать параметры режима, которые должны варьироваться в пределах удельной энергии для коаксиального лазерного плавления от 238 до 261 Дж/мм³ и для селективного лазерного плавления от 89 до 94 Дж/мм³, основываясь на экспериментальных исследованиях, а также компьютерном моделировании.
3. Технология СЛП позволяет достичь более высокой точности полученных изделий (≈ 20 мкм) по сравнению с КЛП (≈ 80 мкм), однако уступает по производительности (СЛП - 30 см³/час, КЛП - 400 см³/час).

Практическая значимость работы заключается в следующем:

Разработана и реализована технология выращивания деталей ДУ методом селективного лазерного плавления и коаксиального лазерного плавления из металлопорошковой композиции 28Х3СНМВФА. Выявлены наилучшие параметры и стратегии плавления, обеспечивающие производство ответственных деталей сложной конфигурации.

Из МПК 28Х3СНМВФА для коаксиального лазерного плавления - мощность лазерного излучения 660 Вт, скорость обработки 400 мм/мин, подача порошка 12 г/мин, шаг по вертикали 0,7 мм, шаг штриховки 0,9 мм и для селективного лазерного плавления - мощность лазерного излучения 250 Вт, скорость обработки 722,5 мм/сек, шаг штриховки – 92 мкм, высота слоя 40 мкм, так как данные режимы обеспечивают наименьшее значение пор, трещин и несплавлений вблизи подложки. Эти параметры обеспечивают отсутствие пористости на 99,5%.

Методы исследования. Поставленные задачи решались с использованием теоретических и экспериментальных методов исследования. В данной работе использовался метод моделирования, в котором первоначально исследуется история нагрева, а ее результаты используются в качестве файла тепловой нагрузки для последующего моделирования механической реакции напряженно-деформированного состояния. Все образцы единичных сплавленных дорожек, единичных слоёв, кубических образцов, подпорок, образцов на механические испытания и заготовок деталей выращены на отечественной установке для коаксиального лазерного плавления «КЛП-400» и селективного лазерного плавления «СЛП-250», разработанных в МГТУ им. Н. Э. Баумана. Исследования микроструктуры проводились с применением оптических микроскопов по стандартным металлографическим методикам.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Разработана металлопорошковая композиция 28Х3СНМВФА и выполнен анализ характеристик материала.
2. Определены оптимальные режимы выращивания для ответственных сложных деталей из МПК СП28 с высокой точностью.

3. Проведен сравнительный анализ между традиционным методом и аддитивным.
4. Разработана технология выращивания заготовок деталей из МПК СП28.

Достоверность полученных результатов исследований, прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях, опубликованы в рецензируемых научных журналах, что подтверждает их научную новизну и практическую значимость. Методология исследований разработана с учетом современных достижений в области лазерной техники и математического моделирования, что позволило сократить время проведения экспериментов и повысить эффективность исследований, а также обеспечивает высокую точность полученных данных.

Апробация работы

1. Всероссийская школа-конференция с международным участием «Аддитивные технологии в цифровом производстве. Металлы, сплавы, композиты». (Москва, 2019).
2. VI Международная конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее». (Москва, 2020).
3. Всероссийская научно-техническая конференция студентов. Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии. (Москва, 2022).
4. Всероссийская научно-техническая конференция студентов. Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии. (Москва, 2023).

Публикации

Основное содержание и результаты диссертационной работы изложены в 4-х статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, четырёх глав, общих выводов и заключения, списка литературы. Работа содержит 131 страницу, в том числе 29 таблиц и 58 рисунков, список литературы из 68 наименований.

Во **Введении** обоснованы актуальность темы, указаны цель работы, научная новизна, практическая ценность, сведения об апробации работы и публикациях.

В **Главе 1** рассмотрены современные подходы применения аддитивных технологий. В настоящее время использование аддитивных технологий (АТ) представляет собой одну из ведущих тенденций в мировой инженерной индустрии. Инновационная технология дает возможность развивающимся промышленным компаниям применять новые методы при создании и изготовлении деталей. Эти методы значительно сокращают время, необходимое для последующей обработки, и в то же время повышают качество продукции. Они также способны производить детали, близкие по форме к исходной компьютерной модели. Аддитивные технологии представляют собой настоящий прорыв сразу в нескольких практических

несмежных отраслях человеческой деятельности, тем не менее, их объединяет одно серьезное достоинство – возможность построить максимально точную модель детали с меньшими затратами по времени, а зачастую и материала. Также рассмотрены направления АТ. В современном мире аддитивные технологии имеют огромные преимущества, и прежде всего это гибкость процесса производства. Изменение размеров изделия, его увеличение или уменьшение, - задача, которая традиционно требует полной перестройки производственного процесса. Однако при использовании аддитивного производства эта задача упрощается. Можно легко изменить размеры изделия в цифровой модели системы управления и скорректировать необходимые параметры, избежав полной замены технологического процесса.

В **Главе 2** рассмотрено используемое оборудование для аддитивного выращивания в отечественных условиях. Исследования проводились на технологических комплексах «КЛП-400», «СЛП-250». Комплексы этого типа были впервые разработаны и изготовлены в России сотрудниками ООО «МЦЛТ» и МГТУ им. Н.Э. Баумана. Основные характеристики для «КЛП-400» проведены в Таблице 1 и для «СЛП-250» в Таблице 2 соответственно.

Таблица 1.
Основные характеристики КЛП-400

Характеристика параметров	Значение
Максимальная мощность	3000 Вт
Количество осей робота	5 (линейный/ вращательные)
Ось наклон стола	-160 до +160°
Производительность процесса выращивания	400 см ³ /час
Габариты установки (ДхШхВ)	2000 мм ×2000 мм ×3000 мм
Габариты выращиваемого изделия	400×400×400 мм
Масса установки	2500 кг
Изменение диаметра пятна	0,5 до 3,5 мм
Максимальная скорость перемещения	1000 мм/мин
Максимальная подача порошка	200 г/мин
Фокусное расстояние	200 мм
Зазор между соплом и подложкой	11,5 мм

Таблица 2.
Основные характеристики СЛП-250

Технические данные	СЛП-250
Объем построения (ДхШхВ)	250мм x 250мм x300 мм
Тип лазера	Иттербийевый волоконный лазер; 400 Вт
Оптика	Подвижный телескоп (3D сканатор)
Скорость построения	До 30см ³ /час (в зависимости от материала и режима построения)
Диаметр луча в фокусе	80-200 мкм
Среднее потребление газа	2л/мин (Аргон)
Среднее потребление газа при очистке камеры	10л/мин (Аргон)
Метод очистки камеры	Предварительное вакуумирование
Габариты установки (ДхШхВ)	2450 мм x1550 мм x1930 мм
Вес (без порошка/с порошком)	1200/1250 кг

Для качественного выполнения технологического процесса аддитивного производства необходимо использовать дополнительное оборудование, а именно: рентгенофлуоресцентный анализатор Olympus Vanta, который обеспечивает быстрый и высокоточный элементный анализ состава. Для измерения гранулометрического состава порошка - измерительный прибор «Лазерный анализатор размеров частиц LA-350». Для фракционного отбора порошка нужного размера - установка «Виброгрохот OCTAGON 200 CL», снабженная набором сетчатых сит. Для смешивания до однородного состояния порошков, используемых в аддитивном процессе – «Смеситель турбулентный C2.0». Для прокалки порошков - лабораторная электропечь сопротивления «SNOL 60/300». Для компьютерной томографии образцов-метрологический компьютерный томограф GE v|tome|x m300. Для определения шероховатости поверхности изготовленных деталей - измеритель шероховатости TR110. Для сбора и очистки камеры после выращивания от порошка - пылесос DWSE 2235T ATEX22.

В Главе 3 рассмотрен технологический процесс отработки режимов изготовления деталей. Это первоначальная задача, так как производство деталей ДУ является сложным и дорогостоящим технологическим процессом. Традиционная технология изготовления стартового двигателя является трудоемкой и длительной. Аддитивные технологии имеют явные преимущества, требующие дальнейшего исследования для последующего

изготовления комплексов для промышленного использования. Поэтому в соответствии с технологическими возможностями существующих аддитивных комплексов, было принято решение о изготовлении элементов стартового двигателя, а именно деталей «Камера» методом КЛП на установке КЛП-400 и «Крышка» методом СЛП на установке СЛП-250. Также предварительные расчеты показывают, что переход с традиционной технологии на аддитивные позволяют существенно сократить производственный цикл изготовления деталей, проработать бионический дизайн (в том числе уменьшить вес деталей). В качестве материала для исследований была разработана металлопорошковая композиция МПК-ПР-28Х3СНМВФА (фракционный состав 63-100 мкм), так как данный состав подходит для метода КЛП и (10-40 мкм), который необходим для метода СЛП. Данная МПК является конструкционной высокопрочной сталью, обладает хорошими технологическими свойствами. Однако, так как деталь имеет важное значение в изделии, необходимо провести исследование МПК на химический состав. Традиционно, процесс КЛП начинается с получения качественного единичного валика за один проход луча в пределах одного слоя.

В ходе исследования, были получены единичные дорожки варированием следующих параметров – скорость процесса ($V_{var}=200..1500$ мм/мин), мощность излучения ($P_{var}=500..1500$ Вт) и количество подаваемого порошка ($W_{var}=9..25$ г/мин). Оценив качество валиков, был выбран режим ($V_{var}=250..1300$ мм/мин), мощность излучения ($P_{var}=540..990$ Вт) и количество подаваемого порошка ($W_{var}=9..21$ г/мин), так как на данных режимах получался наиболее равномерный валик. Был проведен тщательный анализ внешней формы валика. На заключительном этапе были выращены образцы в виде кубиков. На выращенных кубиках, проводилась металлографическая пробоподготовка. Далее проводилось исследование пористости, трещин и несплавлений. Графически полученные данные о пористости в исследованных образцах представлены на (Рис. 1).

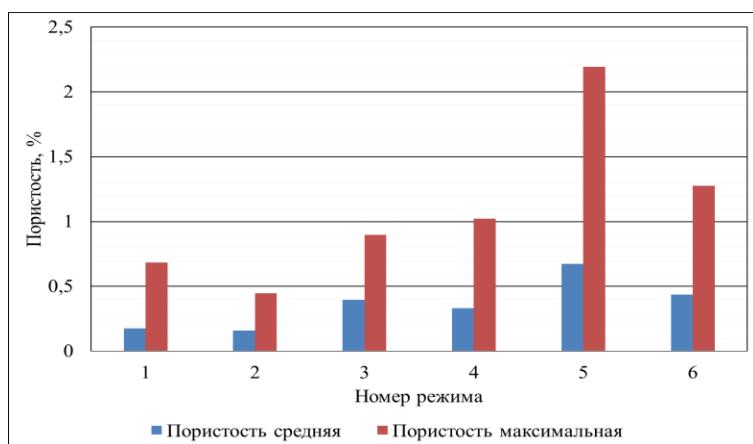


Рис. 1.

Результаты определения средней и максимальной пористости в исследованных образцах.

Исходя из вышеперечисленных экспериментов можно сделать вывод, что подобран оптимальный режим для выращивания детали: скорость процесса ($V_{var}=400$ мм/мин), мощность излучения ($P_{var}=660$ Вт) и количество подаваемого порошка ($W_{var}=12$ г/мин) и были выращены 8 образцов для механических испытаний. В результате была получена первая партия образцов, геометрические размеры которых соответствовали заданным в техническом задании (Рис. 2).

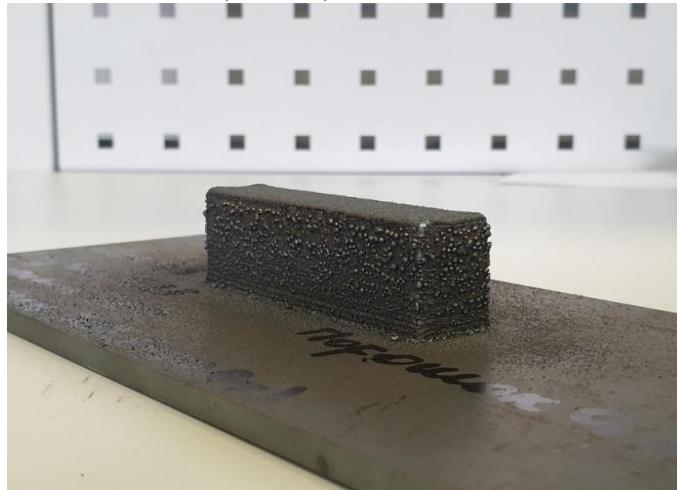


Рис. 2.
Заготовка под образцы на механические испытания.

Далее рассмотрим метод СЛП.

Методом СЛП было выращено и изучено 36 образцов. Режимы выращивания варьировались в следующих параметрах – скорость процесса ($V_{var}=722,5; 850; 1062,6$ мм/сек), мощность излучения ($P_{var}=165; 180; 220; 250$ Вт), шаг штриховки=0,092, 0,115, 0,138 мм, высота слоя $h=4$ мм, диаметр пятна в фокусе $d=0,08$ мм. Проведен полнофакторный эксперимент с варьированием мощности лазерного излучения, скорости перемещения лазерного луча по обрабатываемой поверхности и шага штриховки лазерным излучением площади слоя (Рис. 3). Такая высота слоя обеспечивает оптимальное соотношение точности и производительности процесса выращивания.

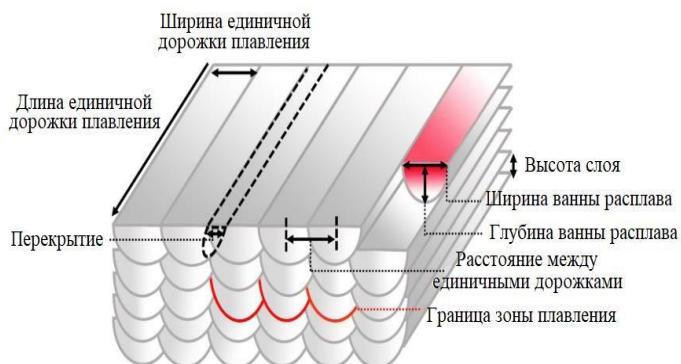


Рис. 3.
Схема процесса селективного лазерного плавления и основные параметры обработки.

При изготовлении опытных образцов применялась многонаправленная стратегия сканирования лазерным излучением, сущность которой заключается в следующем. Каждое сечение изготавляемой детали разбивается на элементарные квадратные ячейки в шахматном порядке (Рис. 4). Отличие двух соседних ячеек выращивания состоит во взаимно перпендикулярной ориентации векторов сканирования. В нашем случае размер одной ячейки 4x4 мм.

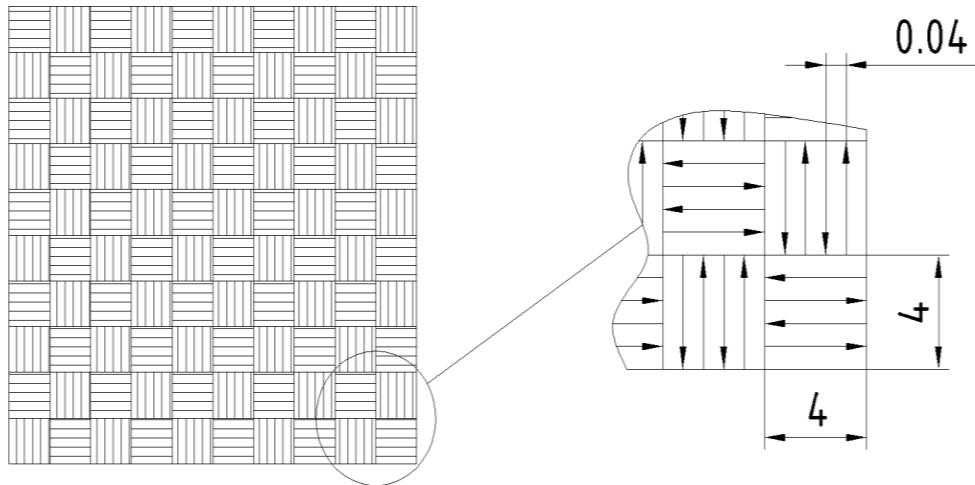


Рис. 4.
Многонаправленная стратегия сканирования (слой n).

Образцы были выполнены по режимам, которые описывались выше. Полученные данные о пористости в исследованных образцах представлены на (Рис. 5), как функция зависимости от погонной энергии.

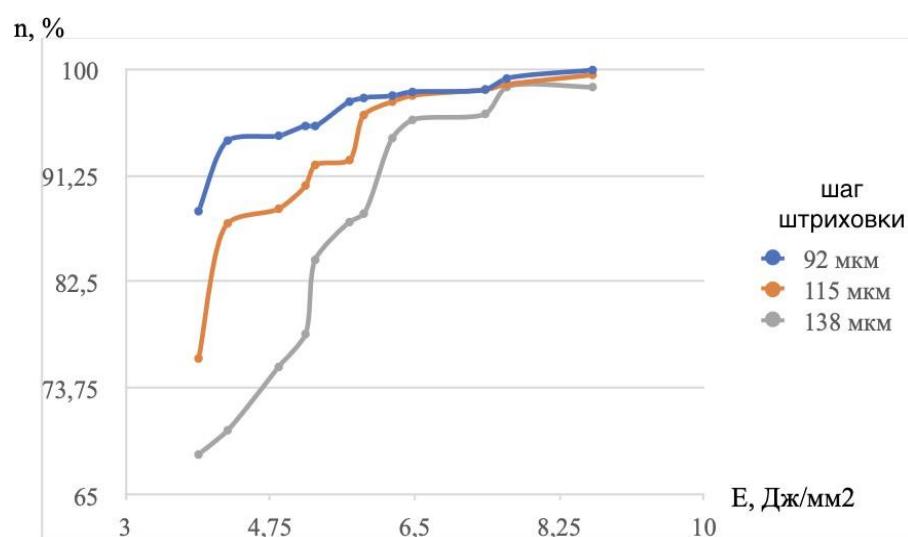


Рис.5.
Значения сплошности материала n от погонной энергии E.

На графике хорошо видно, что уменьшение шага штриховки положительно сказывается на снижении пористости, при сохранении скорости и мощности лазерного излучения неизменными.

Исходя из вышеперечисленных экспериментов был выбран режим для дальнейшего выращивания образцов и подобран оптимальный режим для выращивания детали. Для дальнейшей работы выбран режим - скорость 722,5 мм, мощность 250 Вт, шаг штриховки 0,092 мм, высота слоя 0,04 мм, диаметр пятна в фокусе 0,08.

Однако, для исследования напряженно- деформированного состояния детали при выращивании и после выращивания, проведение экспериментов не представляется возможным. Нужно множество итераций выращивания для подбора оптимальных параметров и расположения детали в зоне построения. К тому же возможности экспериментальных методов определения напряжений и деформаций при выращивании крайне ограничены, поэтому необходимо использовать моделирование. Моделирование является важной составляющей при разработке технологий, а также оно позволяет быстро и достоверно предсказать результат выращивания. В этой работе в основе метода моделирования, в котором первоначально исследуется история нагрева, а ее результаты используются в качестве файла тепловой нагрузки для последующего моделирования напряжений и деформаций. Термовая модель, используемая в этой работе, и основные уравнения, необходимые для расчета температурных полей, а также необходимых тепловых граничных условий, включены в трехмерный расчетный термомеханический модуль Autodesk Netfabb Local Simulation. Тепловое равновесие рассчитывается с помощью уравнения:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = - \frac{\partial (q_i(x_j, t))}{\partial x_i} + Q(x_j, t) \quad (1),$$

где T – температура, t – интересующий момент времени, C_p – теплоемкость изотропного тела, ρ – постоянная плотность, переменные Q – мощность источника тепла, x_j – координата источника тепла и q_i – вектор теплового потока. В данной работе за температуру окружающей среды было взято значение 25°C , а температура предварительного подогрева составляла 200°C .

$$T_0 = T_{\infty} \quad (2),$$

Было исследовано влияние скорости на температурные градиенты, историю изменения температуры и напряженное состояние.

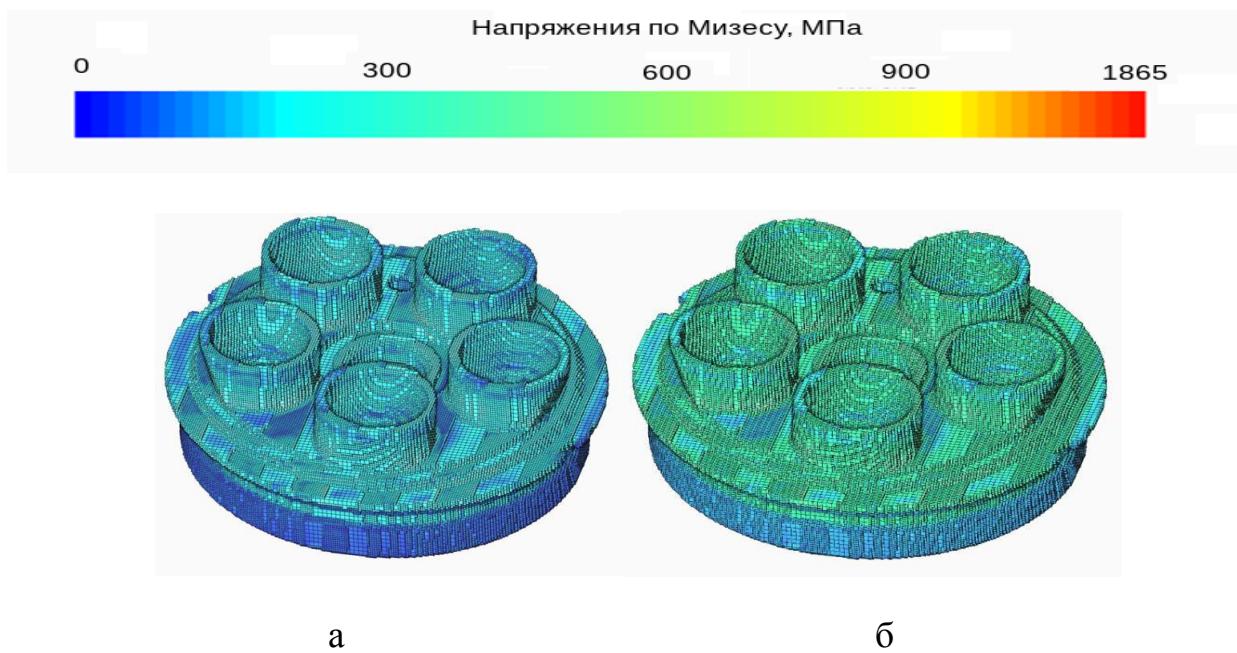


Рис. 6.
Объемное распределение напряжений в изделии до отделения от подложки и удаления подпорок: а - режим 1, б - режим 2.

Анализ напряжений по данным расчета, представленных на (Рис. 6) показывает, что на режиме 2 уровень остаточных напряжений выше, чем на режиме 1. Это связано с увеличением скорости на режиме 2, что приводит к увеличению температурных градиентов, которые в свою очередь приводят к увеличению остаточных напряжений.

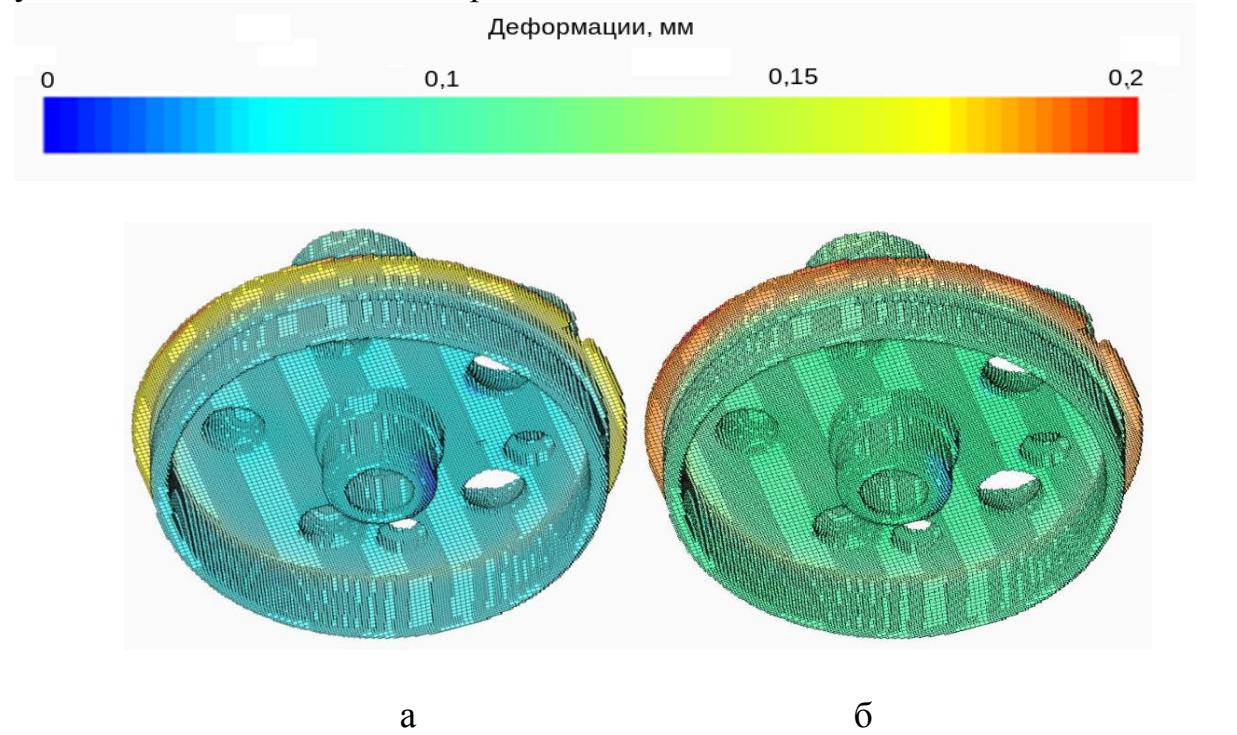


Рис. 7.
Объемное распределение деформаций в изделии после удаления подпорок: а - режим 1, б - режим 2.

При моделировании поэтапно удалялись подпорки путем удаления конечных элементов, при этом на каждом временном шаге шел пересчет напряженного состояния с учетом новых граничных условий. Анализ деформаций после отделения подпорок по результатам расчета, представленных на (Рис. 7) показывает релаксацию напряжений за счет деформирования напряженных областей. Закономерно при режиме 2, на котором уровень напряжений был выше, выше и уровень образующихся деформаций.

Как и следовало ожидать, большие напряжения при режиме 2 приводят и к большим значениям деформаций после отделения изделия от подложки и удаления подпорок, которые обеспечивали жесткость конструкции и предотвращали коробление элементов детали.

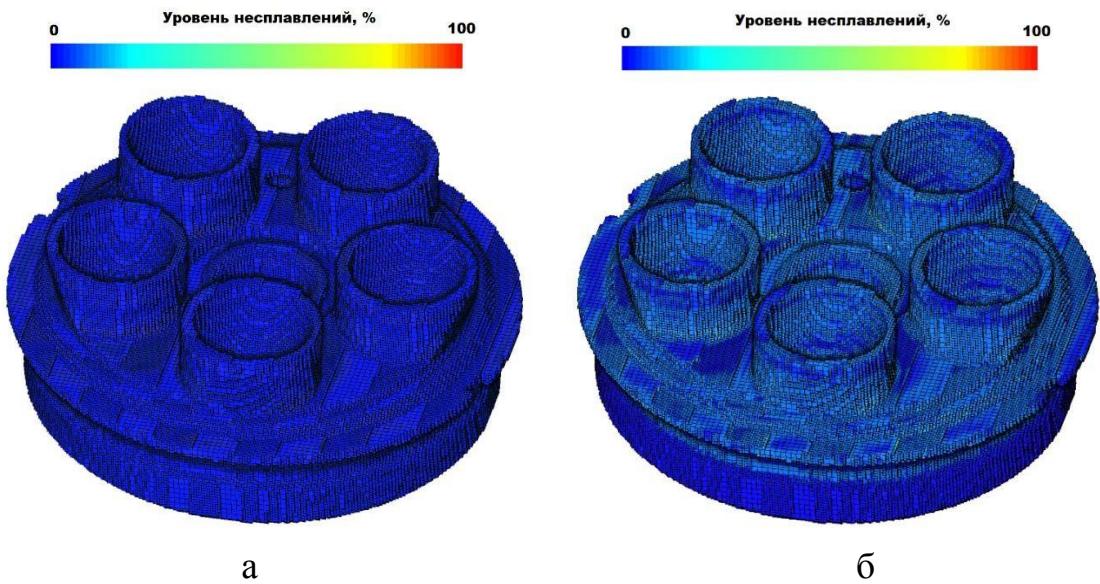


Рис. 8.
Доля несплавления: а - режим 1, б - режим 2.

Для полного расплавления порошкового материала в элементарном объеме требуется определённое количество энергии, которое определяется по теплофизическим характеристикам сплава в расчётной программе Autodesk Netfabb. Исследуемые режимы процесса СЛП обеспечивают определённое значение удельной энергии, вводимой в элементарный объем. Исходя из геометрии и условия теплоотвода, введенной энергии может быть недостаточно для переплавления всего материала в элементарном объеме, что приведет к несплавлениям, и энергии может быть с избытком, что приведет к испарению материала и образованию газовых пор. Анализ уровня несплавления, представленного на (Рис. 8), позволяет определить, насколько заданный режим обеспечивает полное переплавление материала. Можно сделать вывод, что режим 2 не обеспечивает полное переплавление материала, и приведет к образованию пор и несплавлений. Таким образом, режим 2 не подходит по уровню остаточных напряжений, деформаций и уровню несплавления материала в процессе СЛП.

В результате совмещения компьютерного моделирования, позволившего отобрать режимы с минимальными напряжениями и

деформациями в выращиваемых деталях, и экспериментальных исследований, определивших режимы с минимальной пористостью и отсутствием трещин, была достигнута основная цель работы – выращивание качественных бездефектных деталей. Таким образом, впервые на отечественном оборудовании для коаксиального лазерного плавления КЛП-400, а также для селективного лазерного плавления СЛП-250 была отработана и реализована технология выращивания заготовок деталей ДУ. Исходя из полученных результатов стоит отметить, что СЛП позволяет достичь более высокой точности получаемых изделий (≈ 20 мкм) по сравнению с КЛП (≈ 80 мкм), однако уступает КЛП по производительности (СЛП - 30 см³/час, КЛП - 400 см³/час). Для изделий, рассмотренных в данной работе, время и трудоёмкость последующей механической обработки заготовок, полученных методом КЛП нивелирует высокую производительность этой аддитивной технологии. В силу относительно небольших размеров изделий, высоким требованиям к точности, для них лучше подходит технология селективного лазерного плавления.

Результат работы показал принципиальную возможность изготовления заготовок деталей методами КЛП и СЛП из отечественной металлопорошковой композиции 28Х3СНМВФА.

В Главе 4 рассмотрено использование результатов работы на предприятии. В ходе работы на оптимальном режиме по производственному заданию были выращены детали из высокопрочной стали 28Х3СНМВФА. Для подтверждения работоспособности крышек и камер была произведена сборка двигательной установки. В соответствии с программой и методикой проведения испытаний крышки и камеры, разработанной в рамках данной работы, были проведены огневые стендовые испытания (ОСИ) двигательной установки по следующим температурным режимам в соответствии с требованиями технологических условий (ТУ):

- минус (50 ± 3) °C;	- плюс (55 ± 3) °C;
- минус (55 ± 3) °C;	- плюс (50 ± 3) °C.

Измеряемые и регистрируемые параметры – давление в камере двигателя стартового, время работы τ_p и полный импульс J_p .

Так как целостность материальной части (камеры и крышки) в ходе испытаний не нарушена, можно говорить, что ОСИ проведено успешно.

Так же были проведены лабораторно-стендовые испытания и натурный пуск изделия. Изделия в сборке подвергались испытанию на воздействие механических ударов многократного действия, проводились проверки на соответствие требованиям (внешний осмотр). Оба изделия соответствовали требованиям указанных пунктов ТУ.

Изделия подвергались испытанию на воздействие циклического изменения температуры среды от минус (60 ± 2) °C до (65 ± 2) °C в соответствии с ТУ в количестве трех циклов с выдержкой при каждой температуре 4 ч. Пуск изделия проводился в светлое время суток.

По результатам осмотра установлено:

-рамка из состава трубы находится в удовлетворительном состоянии (отсутствие механических повреждений);

-крышка из состава двигательной установки находится в удовлетворительном состоянии (отсутствие трещин, сколов, аналогично штатным крышкам ДС).

Выводы по результатам испытаний

1. Изделие выполнило штатный (безопасный) выход из трубы, функционировало штатно.

2. Изделие при попадании в щит в контактном режиме функционировало штатно и соответствует требованиям ТУ.

3. Камера и крышка из состава двигательной установки обеспечили штатное (безопасное) функционирование изделия.

В результате проведённых испытаний установлено, что испытываемые образцы изделий соответствуют требованию по сохранности эксплуатационных характеристик после однократного падения в парковой укупорке с определенной высоты на бетонное основание.

Для заключительной оценки данной технологии было проведено сравнение традиционного метода изготовления деталей с аддитивными, а именно КЛП и СЛП. Исходя из выбранных режимов, которые рассматривались ранее, мы можем получить деталь требуемой геометрии, в частности, образцов для механических испытаний, оптимальное соотношение производительности.

С экономической точки зрения это может быть выгодным, что подтверждают данные Таблиц, приведенных ниже.

Таблица 3.
Сравнительный анализ изготовления камер СД
Трудоемкость, н/ч (традиционный метод)

Базовая технология изготовления камеры	
Втулка	0,17
Корпус	4
Упор	0,17
Трубка	7
Гайка	0,33
Камера	3,6
Камера	0,6
Итого:	15,87

Таблица 4.
Трудоемкость, н/ч (аддитивный метод)

Аддитивная технология изготовления камеры	
Коаксиальное лазерное плавление	4
Отжиг	1,5
Механическая обработка и испытания на герметичность	4
Итого:	9,5

Примечание: Фактическое время по операциям может быть сокращено по результатам отработки технологии.

Исходя из экономических расчетов можно сделать вывод, что приобретаемая выгода для предприятия, как разработчика в рамках выполняемой НИОКР по изделию, заключается в ускорении производства и в высвобождении рабочего времени в цикле изготовления камеры и крышки с применением АТ по сравнению с базовой технологией.

Общие выводы диссертационной работы

1) Разработана металлопорошковая композиция для деталей «Камера» и «Крышка» и проведено исследование свойств МПК для оценки её применимости для технологии КЛП и СЛП.

2) Определены оптимальные режимы и стратегии выращивания для изготовления ответственных деталей сложной формы из МПК СП28 для коаксиального лазерного плавления - мощность лазерного излучения 660 Вт, скорость обработки 400 мм/мин, подача порошка 12 г/мин, шаг по вертикали 0,7 мм, шаг штриховки 0,9 мм, со средней пористостью 0,18% и для селективного лазерного плавления - мощность лазерного излучения 250 Вт, скорость обработки 722,5 мм/сек, шаг штриховки – 92 мкм, высота слоя 40 мкм, так как данный режим обеспечивает отсутствие пористости на уровне 99,5%.

3) Огневые стендовые испытания подтвердили, что давление в камере двигательной установки, время работы и полный импульс соответствуют техническим условиям. Также лабораторно-стендовые испытания и натурный пуск изделия показали, что применение технологии КЛП и СЛП является более эффективным, чем традиционный метод.

4) Впервые на отечественном оборудовании для коаксиального лазерного плавления КЛП-400 и селективного лазерного плавления СЛП-250 была отработана и реализована технология выращивания заготовок деталей ДУ.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах

1. Особенности процесса селективного лазерного плавления из конструкционной стали 28Х3СНМВФА / Л.А. Шустова [и др.] // Известия

высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. №10. С. 79-88. (0,8 п.л. / 0,4 п.л.)

2. Особенности выращивания изделий из конструкционной стали 28Х3СНМВФА методом коаксиального лазерного плавления / Л.А. Шустова [и др.] // Сварочное производство. 2021. №5. С. 35-44. (0,35 п.л. / 0,1 п.л.)
3. Технологические особенности выращивания камеры сгорания жидкого ракетного двигателя методом селективного лазерного плавления из стали AISI 316L / Л.А. Шустова [и др.] // Сварочное производство. 2021. №4. С. 26-32. (0,35 п.л. / 0,1 п.л.)
4. Л.А. Шустова, А.А. Дренин, А.Г. Григорьянц. Исследование механических свойств образцов из медного жаропрочного сплава БРХ, полученных методом селективного лазерного сплавления // VI Международная конференция "Аддитивные технологии: настоящее и будущее" Москва 8-9 октября 2020 года (0,7 п.л. / 0,37 п.л.)
5. Л.А. Шустова. Исследование процесса формирования изделий, выращенных из отечественного порошка марки ПР-28Х3СНМВФА методом коаксиального лазерного плавления // Всероссийская школа-конференция с международным участием "Аддитивные технологии в цифровом производстве. Металлы, сплавы, композиты". Москва 2-4 октября 2019 года (п.л. 0,35 / 0,1 п.л.)
6. Л.А. Шустова. Отработка технологий изготовления заготовок деталей с применением аддитивных методов // Всероссийская научно-техническая конференция студентов. Студенческая весна. Машиностроительные технологии. Материалы конференции, апрель 2022, Москва МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: ООО "КванторФорм", 2022 (0,35 п.л. / 0,1 п.л.)
7. Л.А. Шустова. Отработка технологии изготовления заготовок деталей методом селективного лазерного плавления // Всероссийская научно-техническая конференция студентов. Студенческая весна. Машиностроительные технологии. Материалы конференции, апрель 2023, Москва МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: ООО "КванторФорм", 2023 (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)
8. Technological features of growing a combustion chamber of a liquid-propellant rocket engine by method of selecnive laser melting from AISI 316 L steel / L.A. Shustova [et. al] // Welding international 2021 - Vol. 35, Issue 10-12. С. 415-420. (0,35 п.л. / 0,1 п.л.).