

На правах рукописи
УДК 621.792

Дренин Алексей Анатольевич

**Разработка оборудования и технологии выращивания изделий
из порошков медных сплавов методом селективного лазерного
плавления**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2021

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н. Э. Баумана).

Научный руководитель:

Григорьянц Александр Григорьевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Дмитриев Александр Сергеевич
доктор технических наук, Национальный
Исследовательский университет «Московский
энергетический институт (технический
университет)», профессор кафедры низких
температур

Рипецкий Андрей Владимирович
кандидат технических наук, Московский
авиационный институт (национальный
исследовательский университет) (МАИ), доцент
кафедры 904 «Инженерная графика», руководитель
направления «Технологии цифрового и
аддитивного производства»

Ведущая организация: Институт проблем лазерных и информационных технологий (ИПЛИТ) РАН – филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук»

Защита состоится «__» _____ 2021 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 при Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

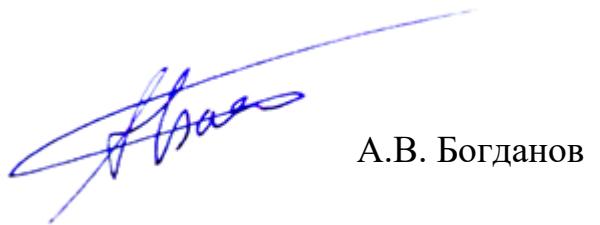
Телефон для справок: +7 (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.06,
кандидат технических наук, доцент



А.В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Процессы аддитивного производства (АП) создают трехмерные (3D) детали путем постепенного добавления тонких слоев материалов, управляемых цифровой моделью. Эта уникальная особенность позволяет производить сложные или индивидуальные детали непосредственно из файлов систем автоматизированного проектирования (САПР) без необходимости в дорогостоящей оснастке или инструментах, таких как пuhanсоны, штампы или литейные формы, что существенно сокращает количество этапов обработки, необходимых для создания готового изделия. Сложные детали могут быть изготовлены в один шаг без ограничений обычных методов обработки (т. е. без проблем, возникающих при изготовлении деталей сложной пространственной формы или чрезмерных затрат в традиционном производстве). Кроме того АП позволяет сократить количество деталей в сборочных единицах.

По этим причинам АП в настоящее время всё чаще становится незаменимым при проектировании и производстве высокоэффективных изделий для аэрокосмической, медицинской, энергетической и автомобильной промышленности. В результате коммерческая эксплуатация АП была захвачена промышленниками во многих производственных секторах. Об этом быстром поглощении ежегодно свидетельствует Wohlers Report – ежегодный сборник анализа коммерческой деятельности, связанной с АП. В выпуске за 2020 год сообщалось, что рынок услуг АП в 2019 году вырос на 27,8% по сравнению с 2018 годом и достиг 7,33 миллиарда долларов. Однако это капля в море мирового промышленного рынка, который сегодня оценивается в 12 триллионов долларов. Ограниченнное количество систем материалов, используемых в АП сдерживает рост технологий на новых рынках.

В силу своих уникальных особенностей наиболее распространённая и перспективная технология АП, используемая для изготовления металлических деталей – это селективное лазерное плавление (СЛП). Это процесс выборочного плавления металлического порошкового материала лазерным лучом слой за слоем.

Сегодня накопился значительный объем научных и практических работ в области СЛП конструкционных сплавов. В литературе основное внимание уделяется различным типам сталей: нержавеющей стали, инструментальной, а также титановым, никелевым и алюминиевым сплавам. В настоящее время номенклатура коммерчески доступных медных сплавов для СЛП сильно ограничена. Однако в мире существует повышенный интерес к медным сплавам для АП с такими свойствами, которые широко распространённые коммерческие сплавы не обеспечивают.

Медь и сплавы на её основе широко используется в промышленности благодаря её высокой теплопроводности и низкому удельному сопротивлению. Высокая теплопроводность делает этот материал незаменимым в области теплообмена. В ракетостроении до сих пор в конструкции жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) при производстве наиболее нагруженного в тепловом отношении элемента – камеры сгорания, применяются медные сплавы.

В связи с этим особо актуально применение медных сплавов при производстве камер сгорания ЖРД в технологии, которая без особого труда позволяет изготавливать сложнопрофильные изделия, в том числе с внутренними каналами и полостями – в технологии СЛП.

Цель работы: Разработка технологии выращивания модельной камеры сгорания ЖРД методом селективного лазерного плавления порошкового материала БрХ.

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

1. Разработка отечественного комплекса для выращивания сложнопрофильных изделий методом селективного лазерного плавления металлических порошков с возможностью использования медных сплавов.

2. Моделирование формирования единичных сплавленных дорожек из порошка БрХ

3. Экспериментальное исследование формирования единичной сплавленной дорожки из порошка БрХ

4. Исследование выращивания сплошных структур из БрХ

5. Механические испытания образцов на прочность

6. Выращивание модельной камеры сгорания методом СЛП на полученных оптимальных режимах

7. Гидравлические и огневые испытания камеры сгорания ЖРД

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основе компьютерного моделирования и экспериментальных исследований установлено, что для стабильного формирования сплавленной дорожки из БрХ параметры режима должны быть в диапазоне удельной энергии 135-180 Дж/мм³, при этом коэффициент относительной нестабильности дорожек не превышает 9%.

2. При выращивании изделий из порошка БрХ для достижения минимальной пористости в 2,5% и механических свойств $\sigma_{0,2}$ в среднем 166,3 МПа, σ_b – 198 МПа, σ_p - 42 МПа, ψ – 8,9 %, δ – 3,2 %, следует работать в диапазоне удельной энергии 140-160 Дж/мм³ при скорости 650-770 мм/с.

3. Установлено, что для выращивания сложных теплообменников, работающих при высоких тепловых нагрузках, следует использовать порошковый материал БрХ с размером частиц в диапазоне 20-50 мкм.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Организован участок АП по производству деталей методом СЛП на ведущем предприятии ОПК. Спроектирована, изготовлена и введена в

эксплуатацию отечественная установка для выращивания изделий из металлических порошков СЛП-250

2. Разработана компьютерная модель оценки стабильности формирования и геометрических размеров единичной сплавленной дорожки, учитывающая процесс испарения материала при воздействии лазерным излучением.

3. Разработана технология выращивания монолитной модельной камеры сгорания ЖРД методом СЛП из медного сплава БрХ. Полученная технология может быть использована для выращивания различных изделий сложной формы из медного сплава БрХ.

Методы исследования включали в себя стандартные теоретические и экспериментальные методы. Моделирование единично сплавленных дорожек проводилось с использованием стандартных программных продуктов Flow 3D, Flow 3D DEM, Flow 3D Weld. Все образцы единичных сплавленных дорожек, сплошных образцов и образцов на механические испытания выращены в одинаковых условиях на установке для селективного лазерного плавления СЛП-250 собственной разработки. Исследования микроструктуры проводились с применением оптических микроскопов по стандартным металлографическим методикам. Исследования распределения пор в сплошных образцах проводилось на метрологическом компьютерном томографе GE v|tome|x m300.

Достоверность проведенных в ходе работы исследований обеспечивается использованием современного технологического лазерного оборудования, корректным применением основных положений естественных наук при проведении расчётных исследований, использованием современных стандартных программ и алгоритмов при проведении расчетов и построении моделей, осуществлением измерений на поверенном оборудовании по стандартным методикам, статистической обработкой результатов измерений и соответствие требованиям ГОСТ при проведении испытаний макетных образцов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования влияния удельной энергии на стабильность формирования сплавленной дорожки из БрХ.
2. Определение рационального интервала удельной энергии для формирования стабильной сплавленной дорожки из БрХ.
3. Технологические режимы выращивания сложнопрофильных изделий из медного сплава БрХ методом селективного лазерного плавления.
4. Установленные зависимости пористости изделий из БрХ от параметров режима селективного лазерного плавления.

Апробация работы:

1. XLII академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства. (Москва, 2018 г.)
2. V Международная конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» (Москва, 2019 г.)
3. Международная школа-конференция «Аддитивные технологии в цифровом производстве: металлы, сплавы, композиты» (Москва, 2019 г.)

4. VI Международная конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» (Москва, 2020 г.)

5. Доклады автора на семинарах кафедры лазерные технологии в машиностроении МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2019 г., 2020 г.).

Публикации:

Основное содержание и результаты диссертационной работы изложены в семи научных статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, патенте на полезную модель №185513.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и заключения, списка литературы из 112 наименований и Приложения. Работа содержит 179 страниц машинописного текста, в том числе 30 таблицы и 105 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В ведении обоснована актуальность диссертационной работы, обозначена цель работы, указаны основные задачи, научная новизна, практическая ценность работы, дано обоснование достоверности полученных данных, информация о структуре, объеме и апробации работы.

Глава 1 посвящена анализу аддитивного производства: его ключевых особенностей, преимуществам и недостаткам по сравнению с традиционными методами изготовления изделий, оценена его роль в современной промышленности.

Рассмотрены преимущества и недостатки наиболее распространённых металлических технологий АП. В настоящее время наиболее перспективной технологией с точки зрения выращивания готовых металлических изделий сложной пространственной формы в том числе с внутренними каналами и полостями является технология СЛП. Номенклатура коммерчески доступных сплавов для СЛП сильно ограничена. В литературе основное внимание уделяется различным типам сталей: нержавеющей, инструментальной, а также титановым, никелевым и алюминиевым сплавам. Однако в мире существует повышенный интерес к медным сплавам для СЛП. Благодаря высокой теплопроводности и низкому удельному сопротивлению медь и сплавы на её основе нашли широкое применение в промышленности.

Приведен обзор используемых в промышленности медных сплавов.

Неподдельный активный интерес зарубежных и отечественных исследователей к технологии СЛП однозначно указывает на актуальность работы в данном направлении. Несмотря на преимущества и востребованность технологии СЛП, её освоение на отечественных предприятиях значительно тормозится ограничениями, накладываемыми зарубежными производителями комплексов АП.

В Главе 2 приведена информация по организации участка для выращивания изделий методом СЛП. Представлены основные производственные стадии, начиная от входного контроля и подготовки порошкового материала непосредственно к процессу выращивания и заканчивая оценкой качества

получаемых изделий. Указан список необходимого, дополнительного оборудования.

Рассмотрены особенности конструкций современных серийных СЛП установок. Процесс проектирования начинается с анализа и выбора построения кинематической схемы установки.

Хорошо зарекомендовала себя с точки зрения надежности и практичности в эксплуатации двухбункерная компоновка установки (Рисунок 1.). В этом случае помимо рабочего бункера в котором проходит непосредственно процесс выращивания, в стороне расположен бункер питатель с подвижной платформой аналогичный по конструкции, но большего объема. В начале процесса платформа опускается в крайнее нижнее положение, бункер-питатель полностью заполнен порошком. В ходе выращивания платформа поднимается на заданный шаг и выталкивает необходимую порцию порошкового материала. Затем разравнивающее устройство распределяет порошок по платформе построения, излишки попадают в колбу для сбора.

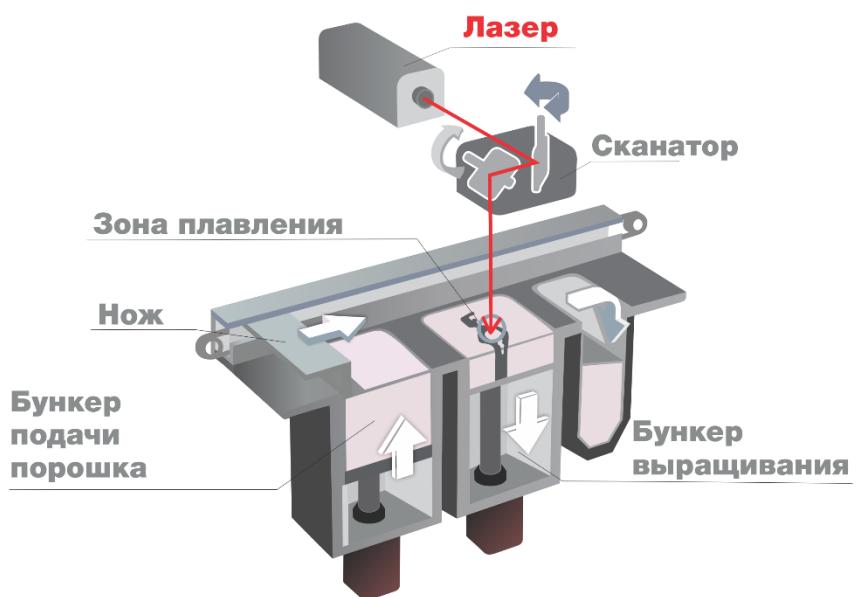


Рисунок 1.
Двухбункерная компоновка установки

Двухбункерная конструкция легко и быстро переналаживается на новый порошок, она снискала доверие у таких крупных производителей, как Trumpf (Германия), EOS GmbH (Германия), Concept Laser (Германия).

По такой схеме в ООО «МЦЛТ» – научно-инжиниринговый центр при МГТУ им. Н.Э. Баумана – была разработана и изготовлена полностью отечественная установка СЛП-110, предназначенная для решения научно-исследовательских и производственных задач. Опыт её эксплуатации позволил глубже понять процесс селективного лазерного плавления, оценить все преимущества и недостатки реализованной конструкции. Из этих результатов становилось ясно, на чем необходимо сконцентрироваться при проектировании нового комплекса. Особое внимание уделяется специфике использования медного порошка, при этом

установка должна отвечать принципам универсальности – возможности работать на всех известных серийных порошках для СЛП, и принципу модульности конструкции, который должен обеспечивать легкую модернизацию и усовершенствование при необходимости.

Исходя из опыта исследовательских работ и по заданным параметрам качества и производительности процесса выращивания в разработанном комплексе применяется волоконный лазер непрерывного действия ЛК-400-ОМ фирмы ИРЭ-Полюс (г.Фрязино Россия). Максимальная выходная мощность лазера составляет 400 Вт с минимальной расходимостью, имеется возможность регулировки в пределах 10-100%.

Оптическая система обеспечивает фокусировку и перемещение (или точнее сканирование) лазерного луча по поверхности металлического порошка в процессе выращивания. В разработанном комплексе применяется постобъективный метод сканирования поля обработки лазерным излучением. Инструмент фокусировки, используемый в этом методе называют «модулем динамической фокусировки» или «динамическим фокусом» (Рисунок 2.), смысл которого заключается в следующем. Метод фокусировки лазерного луча до сканирующей головы приводит к изогнутой фокальной плоскости. В этом случае, чтобы сгладить поле сканирования искривление должно быть компенсировано изменением фокусного расстояния объектива. Это делается путем перемещения одной из двух линз телескопа, также называемой осью Z оптической системы, а компонент, который непосредственно перемещает линзу, называется «транслятором фокуса».

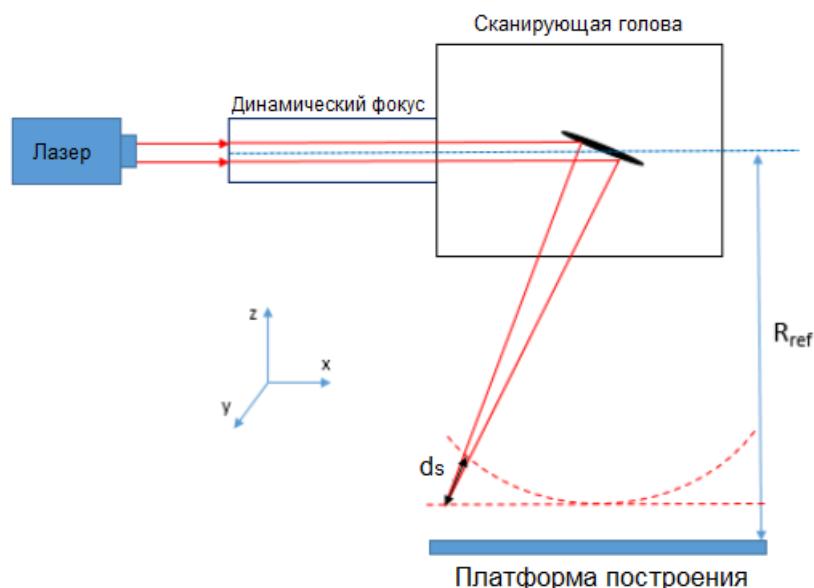


Рисунок 2.
Схема динамической фокусировки

Две основные функции динамического фокуса:

1. Выставление смещения фокуса для компенсации искривления фокальной плоскости
2. Смещение скорректированной фокальной плоскости относительно платформы построение для изменения диаметра лазерного пятна

При нормальных условиях медный порошок имеет относительную низкую скорость окисления. Однако при его нагреве до температуры 250 °С и выше его химическая активность по отношению к кислороду в воздухе резко возрастает и в этом случае окисление может происходить даже при низкой концентрации кислорода. В связи с этим была решена задача создания защитной среды, предотвращающей процессы окисления порошковых материалов.

В существующих сегодня установках СЛП создание защитной атмосферы в рабочей камере реализовано путем продувки инертным газом. В этом случае удельный расход газа может достигать 30-40 л/мин, а время, необходимое на продувку, может занимать от 60 до 120 минут (до содержания кислорода в камере менее 0,1%). Данное конструкторское решение предполагает значительный расход дорогостоящего защитного газа и большое время на подготовку установки непосредственно к процессу выращивания.

Учитывая выше сказанное, была разработана и изготовлена герметичная камера, предназначенная для создания и поддержания защитной атмосферы в рабочей зоне. На этапе проектирования была заложена возможность для предварительной откачки из камеры воздуха до форвакуума (10^{-3} торр). Напуск защитного газа осуществляется непосредственно после откачки объема газовой камеры вакуумным насосом. В результате время создания требуемой защитной атмосферы в камере удалось сократить до 10 минут. Реализован постоянный мониторинг доли кислорода в рабочей камере в процессе выращивания и её корректировки с учетом полученных значений процента кислорода, заранее заданного оператором в программном обеспечении.

Разработанная СЛП установка спроектирована по общим эргономическим требованиям, регламентирующими организацию рабочих мест, взаимное расположение средств отображения информации, органов управления и средств связи в пределах рабочего места, удовлетворяющим ГОСТ 20.39.108.

Внешний вид спроектированной установки для селективного лазерного плавления СЛП-250 представлен на Рисунке 3.



Рисунок 3.
Общий вид установки СЛП-250

Глава 3 посвящена экспериментальным исследованиям механизма формирования стабильной единичной дорожки.

На начальном этапе был проведен входной контроль характеристик порошкового материала БрХ. По результатам гранулометрического и химического анализа был сделан вывод о возможности применения порошкового материала БрХ в технологии СЛП, с незначительной доработкой – просеиванием для получения порошковых частиц размером 20-50 мкм.

Исследование формирования единичной дорожки сканирования, полученной методом СЛП, проводили на специально подготовленной подложке. Для повышения точности и достоверности эксперимента принято решение проварьировать высоту слоя порошка не дискретным опусканием подложки выращивания, а нанесением порошка на пластину с заранее подготовленными углублениями. Это позволило провести сплавление дорожек за один установ обеспечив различную высоту порошкового слоя. В пластине из нержавеющей стали AISI 316L было выполнено 18 прямоугольных ячеек с различной глубиной от 10 до 95 мкм (Рисунок 4.).

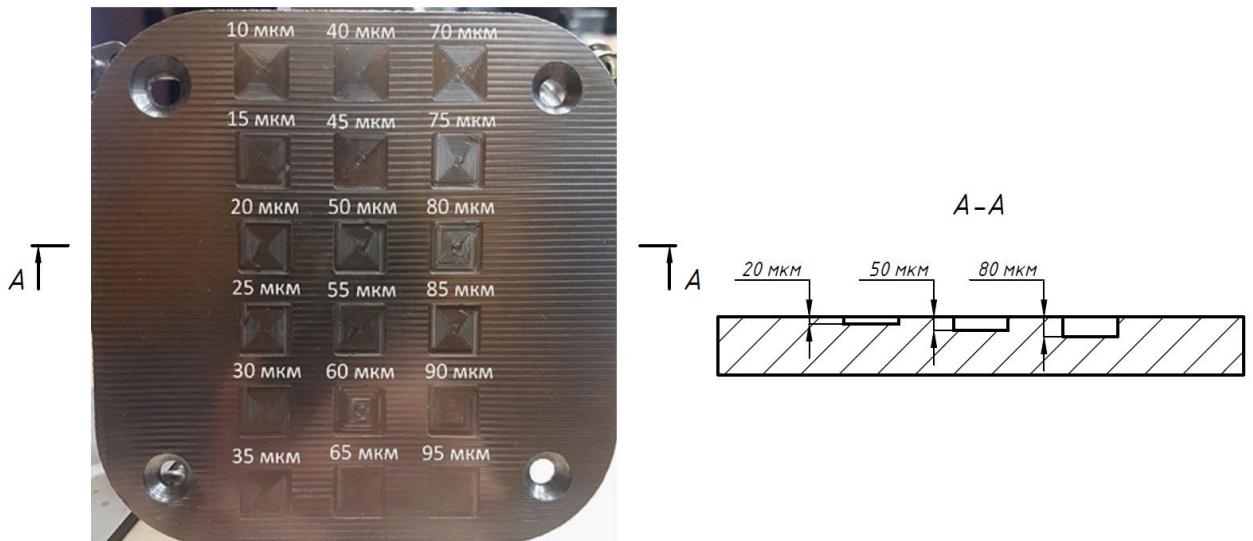


Рисунок 4.
Внешний вид подложки выращивания с углублениями

В полученные углубления засыпали порошок и выравнивали его поверхность, тем самым получали разную высоту порошкового слоя (ПС). Затем в каждой из 18 ячеек было сплавлено по 15 дорожек с различной скоростью перемещения лазерного луча.

Результаты экспериментов приведены к параметру удельной энергии E (1), который обобщает основные параметры лазерной обработки. Такой вид удобно использовать при сравнении результатов экспериментов, проведенных на различном оборудовании с различными параметрами, характерными для конкретной установки.

$$E = \frac{P}{v \cdot d \cdot h} \quad (1)$$

где P – мощность лазерного излучения; v – скорость сканирования; d – диаметр пятна на поверхности порошкового слоя; h – высота слоя.

Оценка стабильности единичной дорожки определялась образованием устойчивой ванны расплава, непрерывности по всей ее длине, а также отсутствием резких перепадов высоты и ширины. Нестабильные единичные дорожки характеризовались прерыванием сплошности по длине, появлением эффекта сфероидизации, резкими перепадами геометрических размеров и выбросами расплавленного порошка. Для численной интерпретации результатов был введен коэффициент относительной нестабильности дорожек, показывающий максимальное отклонение высоты дорожки от среднего значения.

Стабильные единичные дорожки были получены на режимах, с удельной энергией в 135-180 Дж/мм³, при скоростях 310-770 мм/с, при этом коэффициент относительной нестабильности не превышал 9%.

Помимо стабильности геометрии единичных дорожек важным является отсутствие пор. Оценка пористости единичной дорожки определялась следующим образом: рассчитывалась площадь всех пор в поперечном сечении единичной дорожки и соотносилась с ее площадью сечения по формуле (2). Таким образом определяли процент пор в поперечном сечении единичной дорожки.

$$P = \frac{S_p}{S_t} 100\% \quad (2)$$

- где Р – значение пористости в %; Sp – площадь пор; St – площадь сечения единичной дорожки.

В диапазоне удельной энергии 140-170 Дж/мм³ были получены стабильные единичные дорожки с пористостью менее 1 % (Рисунок 5.).

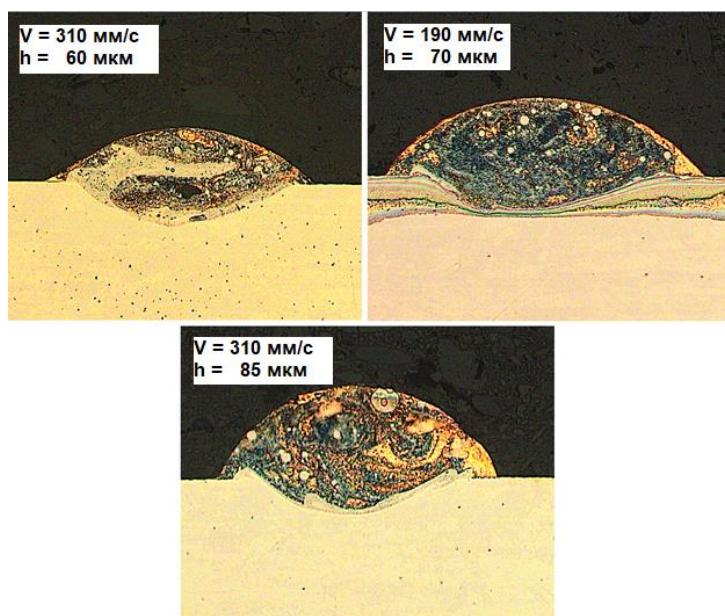


Рисунок 5.

Внешний вид поперечных шлифов дорожек с наименьшей пористостью

В Главе 4 дан обзор математических моделей, описывающих начальный этап процесса выращивания – механизм формирования единичной сплавленной дорожки. Особое внимание уделено поведению потока расплава во время лазерной обработки.

Моделирование процесса было реализовано с использованием коммерческого программного обеспечения FLOW3D® от Flow Science Inc, которое предназначено для изучения сложных явлений теплопереноса при лазерной обработке, таких как теплопередача, массоперенос и испарение.

Для моделирования создания слоя порошка использовался численный метод дискретных элементов (DEM). Моделирование процесса генерации порошкового слоя можно разделить на несколько этапов (Рисунок 6.). На первом этапе задается форма и геометрические размеры камеры построения для порошка и разравнивающего ножа. Затем, частицы порошка в случайном порядке падали вертикально на заданную геометрию, имитирующую подложку, опущенную на заданную толщину слоя. Последний этап формирования порошкового слоя заключается в разравнивании частиц порошка при помощи горизонтального перемещения ножа вдоль пластины с заданной постоянной скоростью. При этом некоторые частицы выталкивались в камеру построения на подложку выращивания, образуя слой порошка, используемый в дальнейшем моделировании СЛП процесса, а другие уносились за пределы расчетной области.

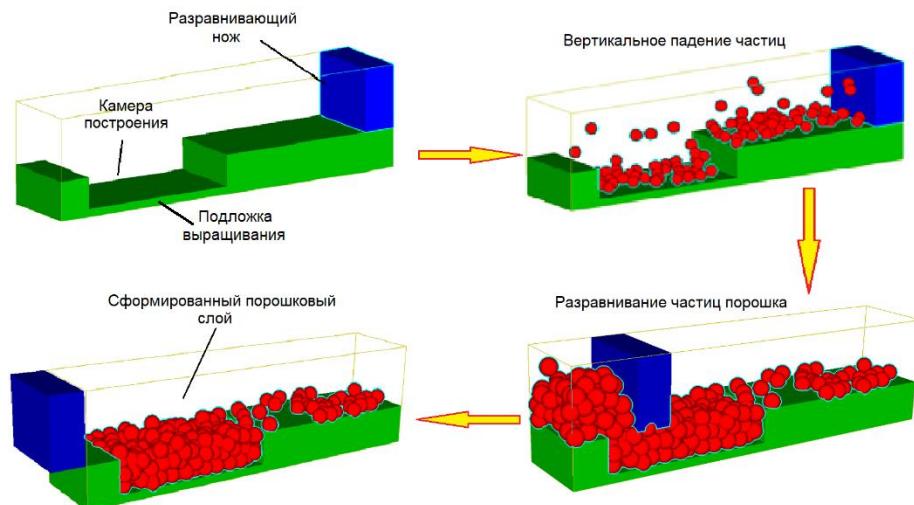


Рисунок 6.
Этапы моделирования порошкового слоя

Общая конфигурация разработанной модели показана на Рисунке 7. Один слой медного порошка БрХ расположен поверх твердой подложки. Используется подложка из нержавеющей стали марки AISI 316L, которая имеет существенно меньшую теплопроводность по сравнению с медным сплавом. Для уменьшения теплоотвода назначен дополнительный подогрев подложки в 250 °C. Для экономии вычислительных затрат решалась симметричная задача для половины расчетной области вдоль оси x. Луч лазера движется по оси x с заданной скоростью по верхней поверхности частиц порошка. Из-за относительно высокого энергопотребления и небольшого диаметра лазерного луча вдоль пути сканирования лазера использовалась мелкая расчетная сетка (3,5 мкм) для получения более точных результатов моделирования. Более грубая сетка (5 мкм) была применена к области, удаленной от зоны термического влияния, чтобы снизить вычислительные затраты. Модель имеет размер области $2 \times 0,25 \times 0,35$ мм ($x \times y \times z$) и насчитывает более 2,7

миллиона ячеек. Верхняя область, где материал не назначен, была определена как пустая, ее давление было установлено равным одному стандартному атмосферному давлению, соответствующему давлению в герметичной камере, а скорость потока газа в этой области была установлена равной нулю. Ко всем границам подложки применялось непрерывное граничное условие, оно представляет собой плавное продолжение потока через границу. Типичное время вычисления для моделирования одной дорожки составляет около 36 часов с использованием процессора AMD Ryzen Threadripper 1950X 16-Core Processor 3.40 GHz и 128 ГБ оперативной памяти.

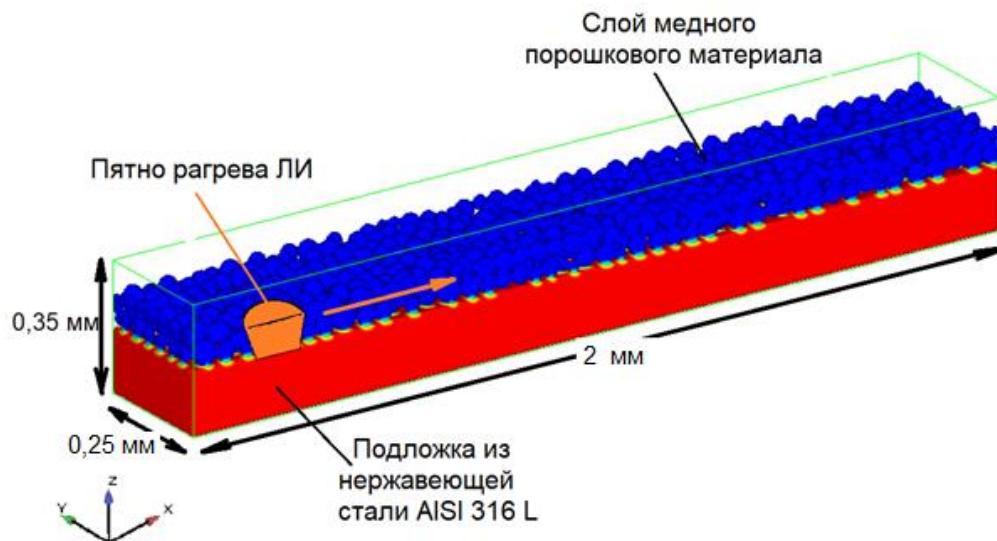


Рисунок 7.
Трехмерная модель расчетной области для процесса СЛП

На Рисунке 8. представлено наглядное сравнение результатов моделирования и эксперимента. Хорошо видно, что контуры зон переплавления совпадают, что означает, что размеры ванны расплава по ширине и глубине также схожи. Кроме того, можно точно смоделировать морфологию поверхности над подложкой. На основании этих характеристик подтверждается, что результаты моделирования хорошо согласуются с практическими измерениями, и поэтому модель можно использовать для дальнейших исследований.

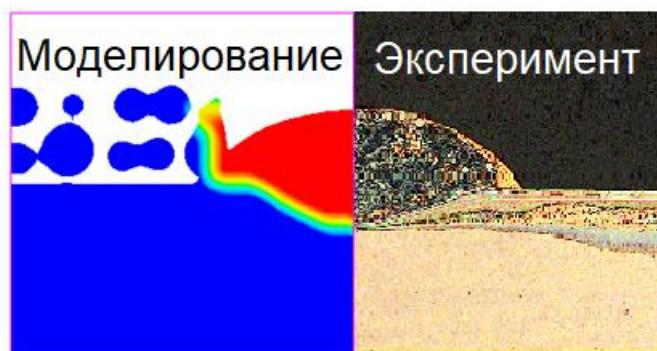


Рисунок 8.
Поперечное сечение зон плавления по результатам эксперимента и численного моделирования

Отличительной особенностью разработанной модели является учет испарения материала. В данной работе исследуется влияние испарения при моделировании процесса. С этой целью для сопоставления результатов используется модель с такими же параметрами лазерного воздействия, но без учета явления испарения. Красная область на Рисунке 9. (а) показывает ванну расплава для случая без учета испарения, ширина и глубина которой составляют 260 мкм и 58 мкм, соответственно, что дает широкую форму, с незначительным сплавлением с подложкой. Более того, при тех же условиях процесса и с учетом испарения материала форма области проплавления (б) более узкая и с заметным проплавлением подложки, что хорошо согласуется с результатами экспериментов.

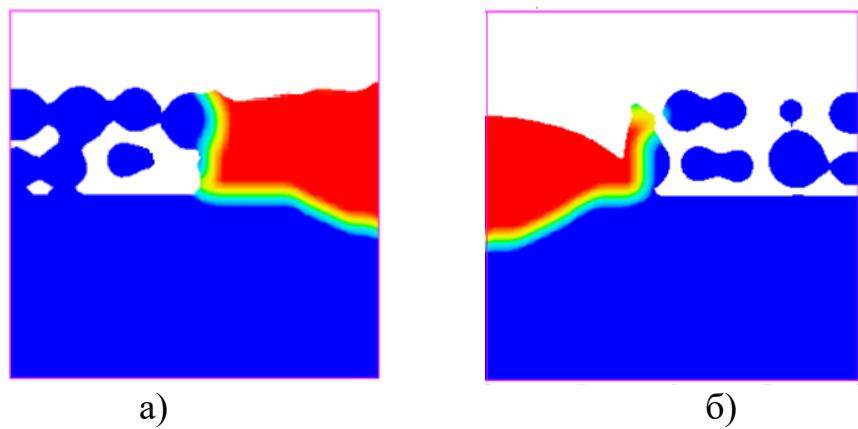


Рисунок 9.

Поперечное сечение ванны расплава: (а) Широкая ванна расплава с незначительным сплавлением с подложкой, при пренебрежении испарением; (б) Ванна расплава овальной формы с ярко выраженным проплавлением подложки

Представленное в главе 4 компьютерное моделирование процесса расплавления и формирования жидкой ванны при нагреве порошкового материала лазерным лучом, последующей кристаллизации, охлаждения и получения единичной сплавленной дорожки позволило глубже понять процесс СЛП. Установлено, что для получения достоверных результатов моделирования важно учитывать процесс испарения материала при воздействии лазерного излучения.

Результаты моделирования показали, что наиболее стабильные дорожки были получены в диапазоне удельной энергии 120-200 Дж/мм³, что согласуется с результатами экспериментов и сокращает диапазон входных параметров обработки при установлении оптимальных параметров выращивания из порошка БрХ. По мере повышения точности и эффективности вычислений такие сложные моделирования могут полностью заменить дорогостоящие экспериментальные исследования, которые требуют значительных материальных и временных затрат. Прогнозирование морфологии поверхности единично сплавленной дорожки является актуальной задачей при разработке технологии выращивания на новых ранее не используемых в процессе СЛП материалах.

В Главе 5 приведены результаты выращивания кубических образцов, на ранее полученных режимах. Все образцы выращены на одной платформе и за один

установ. Для анализа микроструктуры и пористости образцов были изготовлены микрошлифы.

Результаты данного эксперимента показывают, что при выращивании изделий из порошка БрХ следует работать в диапазоне удельной энергии 150-180 Дж/мм³ (Рисунок 10.). Общий вывод заключается в возможности достижения пористости менее 2,5%, что является приемлемым результатом для аддитивных процессов. Необходимые плотности мощности и уровни энергии достигаются за счет малого диаметра пятна и дополнительного подогрева зоны обработки.

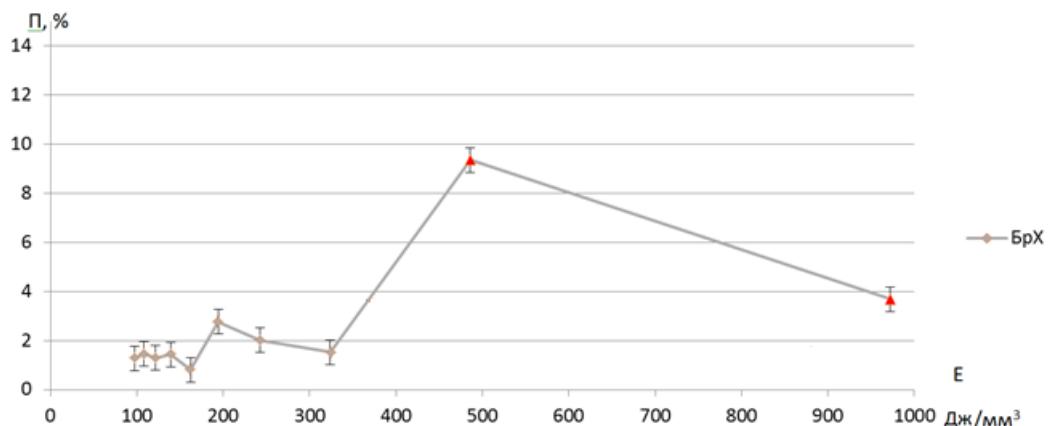


Рисунок 10.
Зависимость пористости полученных образцов от удельной энергии

Для исследования прочности материала изделия на данном режиме была выращена серия из 12 образцов, которые представляют собой заготовки прямоугольной формы под образцы для испытаний на растяжение. Образцы выращены в вертикальном направлении. В отличие от горизонтального положения, вертикальное размещения позволяет избежать деформаций и снизить до минимума объемы механической постобработки. Деталь представляет из себя плоский образец толщиной 4 мм, длина и ширина составляет 12x76 мм.

Результаты испытаний показали, что $\sigma_{0,2}$ в среднем составляет 166,3 МПа, σ_b – 198 МПа, σ_p - 42 МПа, ψ – 8,9 %, δ – 3,2 %, что сопоставимо со свойствами материала в состоянии проката. Данный режим рекомендован для выращивания изделий.

Проделанная работа позволила на оптимальном режиме вырастить модельную камеру сгорания ЖРД (Рисунок 11.). Данный элемент камеры состоит из наружной и внутренней стенок, а также оребренного тракта охлаждения, имеющего следующие геометрические параметры:

- толщина ребра $\delta = 2$ мм;
- шаг оребрения $t = 4$ мм;
- длина оребренной части тракта $L_p = 96$ мм.



Рисунок 11.

Общий вид модельной камеры сгорания ЖРД, изготовленной методом СЛП

Проведены гидравлические и огневые испытания модельной камеры сгорания ЖРД. На основании полученных результатов построена гидравлическая характеристика тракта охлаждения, представленная на Рисунке 12.

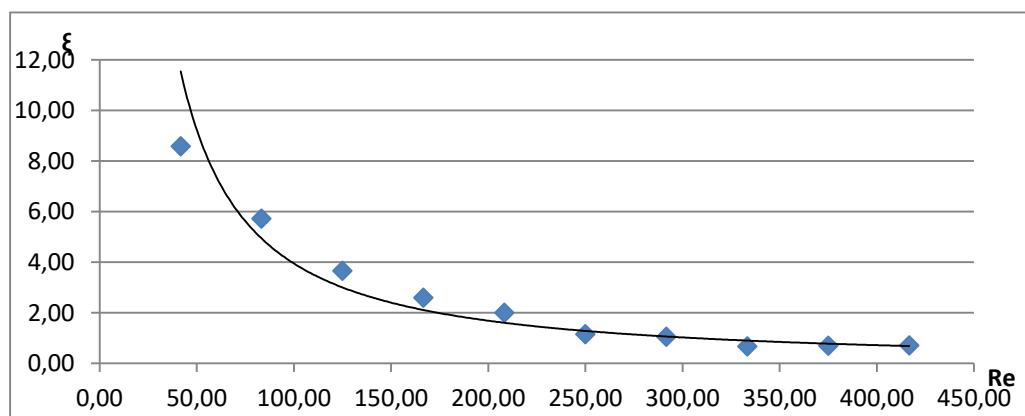


Рисунок 12.

Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ξ от числа Re для тракта охлаждения с прямыми каналами, полученными методом СЛП

Приведенные зависимости коэффициента гидравлических потерь $\xi = f(Re)$ свидетельствуют, что для данной геометрии тракта охлаждения реализуются схожие значения ξ , как и для оребрения, полученного по традиционной технологии фрезерования. Кроме того, при огневых испытаниях не выявлено следов прогара и течи охладителя в рабочее пространство камеры.

В дальнейшем учитывая ту свободу в проектирования, которую обеспечивает применение АП можно получить конструкции КС, которые ранее были недостижимы для традиционных методов производства, в том числе со сложными внутренними каналами охлаждения. Следовательно, использование технологии СЛП при изготовлении камер сгорания ЖРД является перспективным направлением дальнейших исследований.

Основные выводы по работе

1. Проделанная работа позволила организовать участок АП по производству деталей методом СЛП на ведущем предприятии ОПК. Спроектирована, изготовлена и введена в эксплуатацию отечественная установка для выращивания изделий из металлических порошков СЛП-250.
2. Разработана модель формирования единичной сплавленной дорожки, учитывающая процессы испарения. Результаты моделирования с высокой точностью подтверждены экспериментальными исследованиями. Модель позволяет оценить стабильность единичного трека и, как следствие, существенно сократить количество трудоемких и дорогостоящих экспериментальных исследований для установления параметров процесса выращивания.
3. На основе компьютерного моделирования и экспериментальных исследований установлено, что для стабильного формирования сплавленной дорожки из БрХ параметры режима должны быть в диапазоне удельной энергии 135-180 Дж/мм³, при этом коэффициент относительной нестабильности дорожек не превышает 9%.
4. Экспериментальные исследования в совокупности с компьютерным моделированием позволили достичь относительной плотности сплошных образцов выше 97,5 % для порошкового материала ПР-БрХ. При этом установлено, что следует работать в диапазоне погонной энергии 140-160 Дж/мм³, при скорости 650-770 мм/с.
5. Разработана технология выращивания монолитной модельной камеры сгорания ЖРД методом СЛП из медного сплава ПР-БрХ.
6. Результаты гидравлических и огневых испытаний модельной камеры сгорания показали, что применение технологии СЛП, в совокупности с новыми методами и подходами к проектированию изделий при изготовлении камер сгорания ЖРД является более эффективным с точки зрения производства сложных конструкций каналов охлаждения, недостижимых для традиционных методов производства.

Список трудов

1. Установка для выращивания изделий селективным лазерным плавлением: Пат. 185513 РФ / А.Г. Григорьянц, Д.С. Колчанов, А.А. Дренин заявл. 24.04.2017; опубл. 07.12.2018. (0,35 п.л. / 0,15 п.л.).
2. Технологические особенности выращивания элементов камер сгорания ЖРД методом селективного лазерного плавления из стали AISI 316L / А.А. Дренин [и др.] // XLII академические чтения по космонавтике: Сборник тезисов. М., 2018. С.51. (0,1 п.л. / 0,04 п.л.).
3. Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С., Дренин А.А. Установка для селективного лазерного плавления металлических порошков // IV Международная

конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» Москва, 30 марта 2018 года. С. 221-234. (0,75 п.л. / 0,3 п.л.).

4. Влияние основных параметров процесса селективного лазерного плавления на стабильность формирования единичных дорожек при выращивании изделий из медных сплавов / А.А. Дренин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. № 6(711). С. 20-29. (0,5 п.л. / 0,2 п.л.).

5. Исследование влияния режимов выращивания методом селективного лазерного плавления на пористость в изделиях из медных сплавов / А.А. Дренин [и др.] // Фотоника. 2019. № 13 (2). С. 160-171. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.).

6. Исследование гидравлических характеристик тракта охлаждения модельного жидкостного ракетного двигателя, изготовленного с применением аддитивной технологии селективного лазерного плавления / А.А. Дренин [и др.] // Вестник Московского Государственного Технического Университета им. Н.Э. Баумана. Серия машиностроение. 2019. № 6(129). С. 41-52. (0,6 п.л. / 0,15 п.л.).

7. Симонов А.П., Дренин А.А., Денежкин А.О. Особенности формирования микроструктуры в изделиях, полученных по технологии селективного лазерного плавления из медных сплавов // Политехнический молодежный журнал. 2019. № 11 (40). С. 1-10. (0,55 п.л. / 0,2 п.л.).

8. Получение композиционных изделий с металлической матрицей методом селективного лазерного плавления / А.А. Дренин [и др.] // Сварочное производство. 2020. №11. С. 9-15. (0,35 п.л. / 0,1 п.л.).