

На правах рукописи
УДК 621.793

Колчанов Дмитрий Сергеевич

РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ВЫРАЩИВАНИЯ
ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ
ПОРОШКОВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2018

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени 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)», заведующий
кафедрой низких температур, профессор

Петровский Виктор Николаевич
кандидат физико-математических наук,
Национальный исследовательский ядерный университет
«Московский инженерно-физический институт»,
руководитель НОЦ «Лазерный центр»,
старший научный сотрудник, доцент

Ведущая организация:

ОАО НИАТ, г. Москва

Защита состоится «___» _____ 2018 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 «___» _____ 2018 г.

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



В.П. Михайлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Современная промышленность в условиях конкуренции, огромного разнообразия выпускаемой продукции, используемых материалов и сложившихся тенденций уделяет особое внимание экологической стороне вопроса, ставит перед собой задачи вывода новой уникальной продукции на рынок в кратчайшие сроки, максимально эффективного использования ресурсов при минимальных затратах, применения современных компьютерных технологий и высокой степени автоматизации и гибкости производственного процесса. Активно развивающиеся технологии аддитивного производства – АП – позволяют решать поставленные задачи, находят все больший спрос и становятся обязательным этапом в процессе разработки любого нового изделия. Использование аддитивных технологий способно практически полностью исключить длительный и трудоемкий этап изготовления опытных образцов вручную или на станках с ЧПУ, разработку технологической оснастки, сокращая сроки подготовки производства новых изделий на 50 - 80%.

Создание качественного прототипа, максимально похожего на будущее изделие - весьма непростая задача. Приходится решать проблему точного повторения геометрической формы, собираемости, внешнего вида и поиска материалов, максимально похожих на заданные. В последнее время популярными стали технологии аддитивного производства, то есть послойного синтеза макета по компьютерной модели изделия. Современный прототип позволяет не только оценить внешний вид детали, но и проверить элементы конструкции, провести необходимые испытания, изготовить мастер-модель для последующего литья.

Процесс построения прототипа начинается с этапа трехмерного проектирования модели будущего изделия в среде CAD-систем. Существует специальный формат .STL, изначально разработанный для технологии стереолитографии и используемый в других процессах АП. На специальном программном обеспечении происходит разбиение модели на слои, толщина которых зависит от конкретной технологии, разрешающей способности оборудования и используемого материала, при необходимости назначается припуск на механическую обработку. Далее информация о слоях поступает в блок управления оборудованием и происходит послойное выращивание изделия.

В настоящее время известно несколько десятков методик АП. Некоторые из них заняли определенные ниши производства и занимают устойчивые позиции. Ниже рассмотрены наиболее известные и развитые из них, отмечены недостатки и преимущества, их общие черты и принципиальная взаимосвязь.

Целью работы является разработка технологии выращивания деталей сложной геометрической формы методом селективного лазерного плавления порошковых материалов с использованием непрерывного лазерного излучения.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработка отечественной установки и обоснование параметров установки для проведения процесса СЛП с металлическими порошками, выпускаемыми в нашей стране
2. Разработка технологии выращивания изделий методом СЛП
3. Проведение численного расчета напряжений и деформаций в выращенном изделии
4. Разработка алгоритма обработки CAD файла детали для оптимизации процесса выращивания.
5. Исследование физических свойств выращенных изделий
6. Разработка рекомендаций для выращивания изделия сложной геометрической формы методом СЛП.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Установлено влияние параметров процесса селективного лазерного плавления на физико-механические свойства выращиваемых из порошка нержавеющей стали изделий.
2. Определены оптимальные режимы и стратегии выращивания для изготовления деталей сложной формы из порошка нержавеющей стали;
3. Получены данные о напряженном состоянии и деформациях в выращенных изделиях в зависимости от параметров обработки, используя расчетную математическую модель начальных деформаций.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработана, изготовлена и введена в эксплуатацию новая отечественная установка, позволяющая выращивать высокоточные детали сложной формы из металлических порошков методом селективного лазерного плавления.
2. Разработана и реализована технология выращивания качественных изделий сложной формы из металлического порошка методом селективного лазерного плавления по данным трехмерной компьютерной модели.

Методы исследования. Поставленные задачи решались с использованием теоретических и экспериментальных методов исследования. Расчеты напряжений и деформаций в выращенном изделии осуществлялось с использованием стандартных продуктов Simufact additive и ANSYS. Образцы единичных сплавленных дорожек, единичных слоёв, кубических образцов, подпорок и образцов на механические испытания выращены на установке для селективного лазерного плавления СЛП-110 собственной разработки.

Достоверность проведенных в ходе работы исследований обеспечивается использованием современного технологического лазерного оборудования, известных и широко используемых компьютерных программ, статистической

обработкой результатов измерений и соответствием требованиям ГОСТ при проведении испытаний макетных образцов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены на международной научно-технической конференции «Лазеры и лазерно-информационные технологии: Фундаментальные проблемы и применения». Шатура (МО), 2014; всероссийской научно-технической конференции «Будущее машиностроения России». Москва, 2015, на XLII академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства. Москва, 2018 г., на научных семинарах «Лазерные технологии и оборудование» кафедры МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. Основное содержание и результаты диссертационной работы изложены в 4-х статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2-х патентах на полезную модель №135564, № 167468.

Диссертация состоит из списка основных условных сокращений и обозначений, введения, пяти глав, общих выводов, заключения, списка литературы из 169 наименований. Работа содержит 136 страниц машинописного текста, в том числе 6 таблиц и 53 рисунка.

В введении обоснована актуальность темы, указаны цель работы, научная новизна, практическая ценность работы, сведения об апробации работы и публикациях.

В первой главе проведен литературный обзор, посвященный анализу развития и современного состояния промышленного сектора аддитивного производства и актуальности их использования в производстве.

Показаны особенности и принципы наиболее успешных технологий аддитивного сектора, их сильные и слабые стороны. Кроме того рассмотрены неаддитивные технологии, выполняющие схожие задачи. Рассмотренные технологии имеют прямое или промежуточное отношение к получению готовые функциональных изделий из металла. К ним относятся: лазерная стереолитография, нанесение термопластов, моделирование при помощи склейки, метод литья порошкового металла под давлением, коаксиальное лазерное плавление, селективное лазерное спекание и селективное лазерное плавление.

Процесс селективного лазерного плавления металлических порошков является сложным процессом с узким диапазоном значений большого количества параметров, обеспечивающих высокое качество и стабильность формирования единичных объемов и всего изделия в целом. Исследования влияния таких параметров, как мощность лазерного излучения, скорость перемещения лазерного луча, форма и размер порошка, диаметр лазерного луча - являются разрозненными, часто привязанными к конкретным типам установок и маркам порошковых материалов.

Анализ технологий показал перспективность использования СЛП для решения задач получения готовых металлических изделий сложной формы.

За рубежом давно и активно занимаются процессами выращивания металлических изделий из порошков лазерным излучением: Deckard C., Beaman J., Schwarze D., Meiners W., Wissenbach K., Gibson I., Simonelli M.

В России одним из первых этими вопросами занялся Шишковский И.В, известны работы Каблова Е.Н., Ядройцева И.А. и др.

Мировой и отечественный опыт активных исследований и практика внедрения аддитивных технологий в различные секторы промышленности однозначно показывает актуальность проведения работ в данном направлении. Несмотря на все преимущества и востребованность данной технологии в отечественной промышленности, её внедрение очень затруднено ограничениями, которые накладывают зарубежные компании.

Литературный обзор послужил основанием для формулирования задач исследования.

Во второй главе подробно рассмотрены особенности процесса селективного лазерного плавления. Описаны условия и механизмы твердофазного и жидкофазного спекания, которые являлись основными для получения объемных изделий на заре технологии лазерной обработки порошковых металлических материалов. Показаны этапы полного переплавления порошка с возникновением жидкой ванны.

Изучение поведения жидкости в сварочной ванне во время СЛП является чрезвычайно важным. Оно определяет морфологию поверхностей и плотность материала конечного изделия. В идеальном случае жидкая ванна, образованная под действием лазерного луча, должна хорошо распространяться по твердой поверхности и оставаться постоянной вдоль направления движения луча. Однако, множество факторов приводят к тому, что поведение ванны расплава сильно отличается от идеального. К ним относятся: поверхностное натяжение, вязкость, смачиваемость, нестабильность цилиндра вязкой жидкости, термокапиллярные эффекты. Подробно рассмотрено влияние указанных факторов, и как они меняются в зависимости от химического состава порошка.

Дано описание сопутствующих физических процессов – испарения, которое наблюдается при значительном вводе тепла. Это может быть причиной отклонения от химического состава материала до и после обработки. Второе влияние испарения - сила отдачи паров, которая действует на поверхность расплава. В то же время образование паров металла над зоной обработки может повлиять на количество поглощённой лазерной энергии и окисление. Селективное лазерное плавление металлических порошков часто сопровождается окислением из-за высоких температур и наличия кислорода в камере

выращивания, например из пространства между порошинками в бункерепитателе. Это значительно влияет на процесс. В первую очередь, поглощение оксидами лазерного излучения существенно отличается от поглощения чистыми металлами. Другой эффект-это высвобождение энергии за счет экзотермического характера реакции окисления. Кроме того, окисление подложки приводит к более низкому поверхностному натяжению твердого материала и, таким образом, согласно уравнению Юнга, к более низкой смачиваемости расплава. Растворенный в ванне расплава железа кислород приводит к снижению поверхностного натяжения жидкости $\gamma_{жг}$. Градиент поверхностного натяжения жидкого железа становится положительным при превышении порогового значения содержания растворенного кислорода, которое зависит от температуры. Это влияет на направление потока Марангони в ванне расплава.

Рассмотрены материалы, которые применяются в аддитивной промышленности на данный момент: нержавеющие стали, инструментальные стали, титановые, никелевые, кобальтовые и алюминиевые сплавы.

В третьей главе рассмотрены конструкционные особенности оборудования для селективного лазерного плавления. Современное СЛП оборудование достаточно разнообразно по конструкции, параметрам обработки, габаритам выращиваемых изделий, номенклатуре обрабатываемых материалов, и способно решать разнообразные задачи.

Общие принципы процесса СЛП конструктивно реализованы по-разному, в зависимости от преследуемых целей, таких как увеличение точности, предельных размеров получаемых изделий, типов обрабатываемых материалов, снижение шероховатости, увеличение разрешающей способности оборудования и производительности процесса. На ранних этапах своего существования различные фирмы производители установок старались изобрести оригинальное решение, которое выделяло бы их продукцию среди конкурентов. К сегодняшнему дню самые удачные из решений реализуются за пределами фирмы-изобретателя.

Анализ этих данных, наряду с подробной проработкой узлов установки и отработки всех основных элементов на экспериментальном стенде позволили разработать, изготовить и запустить в эксплуатацию отечественную машину для селективного лазерного плавления. Созданная отечественная установка селективного лазерного плавления СЛП-110 разрабатывалась для высокоточного изготовления деталей сложной формы размерами до 110x110x110мм из порошков различных металлических сплавов, в том числе российского производства.

Основная задача установки СЛП-110 – выращивание изделий из металлического порошка, с высокой точностью воспроизводя геометрию компьютерной модели. Точность зависит от таких параметров, как диаметр пятна,

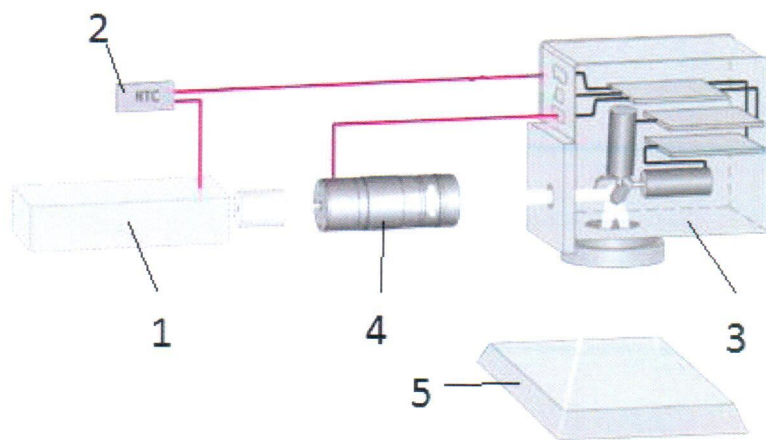
высота слоя, разрешающая способность системы перемещения луча, а так же очень чувствительна к режимам обработки, чистоте защитного газа, давлению в камере. Из этих данных становится понятно, на чем концентрируется основное внимание при проектировании машины.

Опираясь на исследовательские работы и параметры различных СЛП комплексов, принято решение при заданном рабочем объеме использовать непрерывный волоконный лазер мощностью 100Вт. ЛК-100-В фирмы ИРЭ-Полус (Россия).

Принято решение в проектируемой установке СЛП использовать гальванометрический сканатор. Подобные сканаторы применяются в различных областях промышленности. Активно используются в лазерной маркировке сувениров и промышленной продукции различного назначения. Обладая высокой точностью, быстродействием, компактными размерами, сканаторные системы – наиболее подходящий вариант перемещения лазерного луча для поставленной задачи.

На рисунке ниже представлена схема сканирующей системы, где:

1. Лазерный источник, 2. Плата управления сканатором и лазером, 3. сканатор, 4. телескоп, 5. обрабатываемая поверхность.



Для небольшой зоны обработки, как в случае с описываемой установкой, свою функцию успешно выполняет fθ-объектив.

Зная типичные углы отклонения лазерного луча в сканирующих системах 0.35 рад, можно рассчитать фокусное расстояние fθ-объектива, необходимое для обработки зоны 110x100мм.

$$2y = f \times 2\theta \times \frac{\pi}{180},$$

где 2у – максимальное перемещение луча по каждой оси в миллиметрах, f – фокусное расстояние в миллиметрах, θ – максимальный угол отклонения лазерного луча в градусах.

Таким образом получаем:

$$f = \frac{2 \cdot y \cdot 180}{2 \cdot \theta \cdot \pi} \times \frac{110}{2 \cdot 0,35} \approx 157$$

Существуют стандартные объективы с $f=160$ мм, которые удовлетворяют нашим требованиям.

Исходя из мощностных и пространственных характеристик лазерного излучения на выходе из коллиматора установлен сканатор SCANcube 10 фирмы SCANlab (Германия). Объектив плоского поля позволяет сохранить положение фокуса лазерного луча на плоской площадке размером 110x110мм и сфокусировать лазерный луч в пятно диаметром 60-70 мкм.

Были проведены измерения пространственных характеристик лазерного пучка на выходе из сканатора. Измерения проводились на оборудовании PROMETEC PROLAS. Измерения показали, что диаметр пятна в фокусе составляет 65,5 мкм, что вполне удовлетворяет необходимым требованиям.

Для нашей установки была спроектирована и изготовлена единая кинематическая система установки (Рис.1). Система перемещения подложек рабочего бункера и бункера-питателя построена на основе шлифованной шарико-винтовой передачи, обеспечивающей точность позиционирования до 5 мкм.

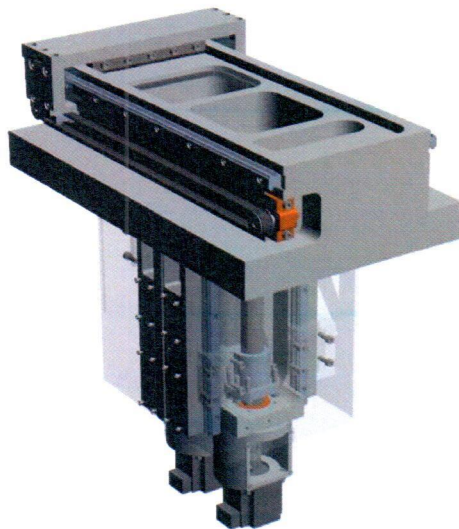


Рис. 1. Внешний вид кинематической системы

Вместо четырех цилиндрических направляющих использованы две рельсовые. Такой подход обеспечивает высокую точность при значительных, в том числе статических нагрузках, предотвращает перекосы.

Разравнивающий нож перемещается посредством ременной передачи. В данном узле высокая точность перемещения не нужна. Ременная передача обеспечивает плавность хода в достаточной степени.

Приводы закреплены на едином алюминиевом корпусе. В теле корпуса выполнены бункеры для рабочей подложки, порошкового питателя и излишков

порошка. Предусмотрены стенки по краям рабочей плоскости. Такая единая конструкция обеспечивает высокую жесткость и точность позиционирования всех узлов, что положительно сказывается на качестве получаемых изделий.

Между стенками и подложками предусмотрен зазор, для предотвращения износа при трении, но этот зазор перекрывается резиновой прокладкой. С одной стороны, прокладка предотвращает попадание порошка к механизмам привода, с другой, герметично перекрывает отверстие. Это немаловажно при проектировании герметичной камеры, и значительно уменьшает её объём.

Одним из важных условий при аддитивном производстве является создание защитной среды, предотвращающей окисление порошка. В качестве защитного газа используют аргон или азот. Однако применение азота ограничено, что связано с возможностью образования нитридов (например, AlN, TiN при изготовлении изделий из алюминиевых и титановых сплавов), которые приводят к понижению пластичности материала.

Была разработана и изготовлена герметичная камера, предназначенная для создания и поддержания инертной среды в рабочей зоне. На этапе проектирования была заложена возможность откачки камеры до среднего вакуума (рабочее давление 103 Па, предельное давление 10 Па), что накладывает дополнительные требования при проектировании. Было принято решение спроектировать тонкостенную конструкцию с оребрением. Такая компоновка обладает рядом преимуществ, например, меньший расход материала, сниженный вес, но требует проработки и расчета конфигурации ребер. Проведены расчеты, для выбора типа и расположения ребер жесткости.

Специально разработанная система управления позволяет подготовить объемную компьютерную модель к выращиванию и обеспечивает слаженную работу всех узлов установки в автоматическом режиме после задания необходимых параметров процесса. Реализованная единая система управления является уникальной. Система обладает высокой надежностью и стабильностью, что является необходимым при многочасовом режиме работы установки.

Все узлы установки помещены в единый корпус, предусматривающий удобный доступ к рабочей зоне и элементам управления. Дверца в камеру оборудована окном с защитой от лазерного излучения, через которое осуществляется визуальный контроль процесса выращивания. Лазер и компьютер расположены в правой стороне установки за одной дверцей. Кнопка включения компьютера вынесена наружу к органам управления. Система управления и газовая система расположены сзади. Для доступа в заднюю часть предусмотрена съемная крышка.

Внешний вид спроектированной установки для селективного лазерного плавления металлических порошков СЛП-110 представлен ниже:



В четвертой главе дан обзор математических моделей, описывающих явления, происходящие в процессе СЛП, описана выбранная модель, и произведены расчеты деформаций и напряжений для выращиваемой детали при различных режимах. Моделирование различных процессов является важной составляющей при разработке технологий. Существующие возможности и вычислительные мощности современных компьютеров и программ позволяют моделировать сложнейшие физические процессы с высокой точностью, что позволяет сократить издержки на эксперименты и испытания, тем более, если они требуют разрушения образцов.

Моделирование процесса селективного лазерного плавления, взаимодействие лазерного луча с порошком, формирование жидкой ванны и застывание в сплавленную дорожку позволяет ответить на многие важные вопросы и предсказать, как будет протекать процесс, и будут ли достигнуты заявленные результаты. Моделированием занимаются во многих институтах и научных коллективах, и эта работа показала необходимость формулирования новых подходов для оптимизации процесса расчета, так как многие особенности оказались неучтенными в существующих программах.

На данный момент еще не существует единого подхода, моделирующего процесс селективного лазерного плавления от микро- до макроуровней. Обычно решается частная задача формирования единичной дорожки, серии дорожек, несколько слоев, описывая температурную картину и картину напряжений в микро областях. Такие модели решают тепловую задачу с учетом многих факторов и сил, действующих на жидкую ванну и твердый материал. Такой подход позволяет с высокой точностью предсказать микроструктуру, наличие

пор, раковин, несплавленных порошинок. То есть наличие дефектов, которые, несомненно, влияют на прочностные характеристики материала. Такой подход очень требователен к компьютерным и временным ресурсам. Другой подход реализует построение детали в целом, с учетом собственных деформаций и напряжений каждого слоя. Всё сводится к решению упругой задачи без тепловых расчетов. Такое решение осуществляется на порядок быстрее, но не позволяет предсказывать микроструктуру. Комбинация двух моделей позволит добиться нужного результата быстро и с необходимой точностью.

Для прогнозирования остаточных напряжений в традиционных тепловых процессах, таких как сварка, метод конечных элементов является общим и проверенным инструментом при термомеханическом моделировании. Можно учитывать сложное поведение материала, его нелинейные температурно-зависимые характеристики, затвердевание и ползучесть. Моделирование одиночных сварочных швов может занять от нескольких часов до нескольких дней в зависимости от сетки конечных элементов и временных шагов. С другой стороны, аддитивные процессы для металлических изделий типа СЛП и КЛП также можно понимать как серию микро сварочных процессов, поэтому теория сварки также может быть применена. Тем не менее, прямое моделирование процесса не представляется возможным, поскольку процесс состоит из сотен тысяч таких сварных швов – единичных дорожек сплавления.

Термин собственных или начальных деформаций ε^* был предложен при решении задач сварки. Собственные деформации свидетельствуют о наличии постоянных деформаций, возникающих в материале из-за некоторых неупругих процессов, таких как деформация теплового расширения, фазовых превращений. Таким образом, она учитывает все постоянные напряжения, возникающие в материале, проявляющем неупругое поведение, и порождающие остаточные напряжения, но не является просто суммой различных нелинейных напряжений.

Использование теории собственных деформаций удобно для случаев, когда трудно смоделировать источник деформаций или моделирование является затратным в вычислительном отношении. Например, для таких процессов, как сварка или селективное лазерное плавление. Суть метода заключается в разбиении модели детали на слои заданной величины, последовательной активацией слоев, начиная от подложки, и прикладыванию собственных деформаций к каждому слою. Таким образом, для каждого слоя решается механическая упругая задача методом конечных элементов.

Основное уравнение МКЭ упругого тела выглядит следующим образом:

$$[K]\{u\} = \{f\}, \quad (1)$$

где $[K]$ - матрица жесткости конечно-элементной модели, в которой компоненты являются коэффициентами жёсткости модели и вычисляются путём суммирования соответствующих коэффициентов жёсткости конечных элементов; индексация компонентов этой матрицы должна соответствовать индексации компонентов общих векторов узловых перемещений и сил; $\{u\}$ – множество векторов узловых перемещений, $\{f\}$ - вектор узловых сил, вызванных собственными деформациями, нумерация компонентов может быть общей (глобальной), то есть по общим номерам степеней свободы модели, или по общим номерам узлов с добавлением индекса узловой степени свободы, как у общего вектора узловых перемещений:

$$\{f\} = \int [B][D]\{\varepsilon^*\} dV,$$

где $[B]$ - матрица согласования узловых смещений и деформаций в элементе, $[D]$ – матрица упругости материала.

После получения множества смещений $\{u\}$ путем решения уравнения (1), полная $\{\varepsilon\}$, упругая $\{\varepsilon^{уп}\}$ деформации и остаточные напряжения $\{\sigma\}$ могут быть вычислены по следующим уравнениям:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\}$$

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^*\})$$

Величина собственных деформаций рассчитывается по экспериментальным данным - изгибу базовой детали, представляющую собой консольную балку. Балка выращивается на конкретной установке. Величина изгиба закладывается в компьютерную модель, и происходит расчет собственных деформаций.

Существует пакет компьютерных программ от MSC, в котором данный метод реализован. Имеются результаты использования данных программ для решения задач остаточных напряжений, проведены сравнения расчетов с экспериментальными данными, показано хорошее соответствие модели реальным данным.

Каждая деталь, в особенности сложной формы, является уникальной с точки зрения теплофизических процессов, протекающих во время выращивания. Моделирование образцов для набора параметров выращивания не имеет смысла, если в качестве образца выступает не само изделие. Первым делом был промоделирован процесс выращивания изделия на режимах с переменным параметром скорости. Мощность была постоянная и составила 100 Вт – максимальное значение для установки СЛП-110. Была поставлена серия экспериментов по выращиванию тестовых образцов на 9 различных режимах.

Модель изделия на подпорках была разбита на воксели с размером грани 0,5 мм. В процесс моделирования входило выращивание, отделение изделия от подложки и удаление подпорок.

Процесс выращивания промоделирован на 9 режимах (Рис. 2). До отделения от подложки значительных деформаций не наблюдалось. Картина начинает меняться в процессе отделения изделия от подложки и удаления подпорок. Конечный результат показал, что изделие претерпевает деформации, не вписывающиеся в допуски, после удаления подпорок. В изделии возникают значительные внутренние напряжения, высвобождающиеся в виде деформаций при падении жесткости после отделения от подложки.

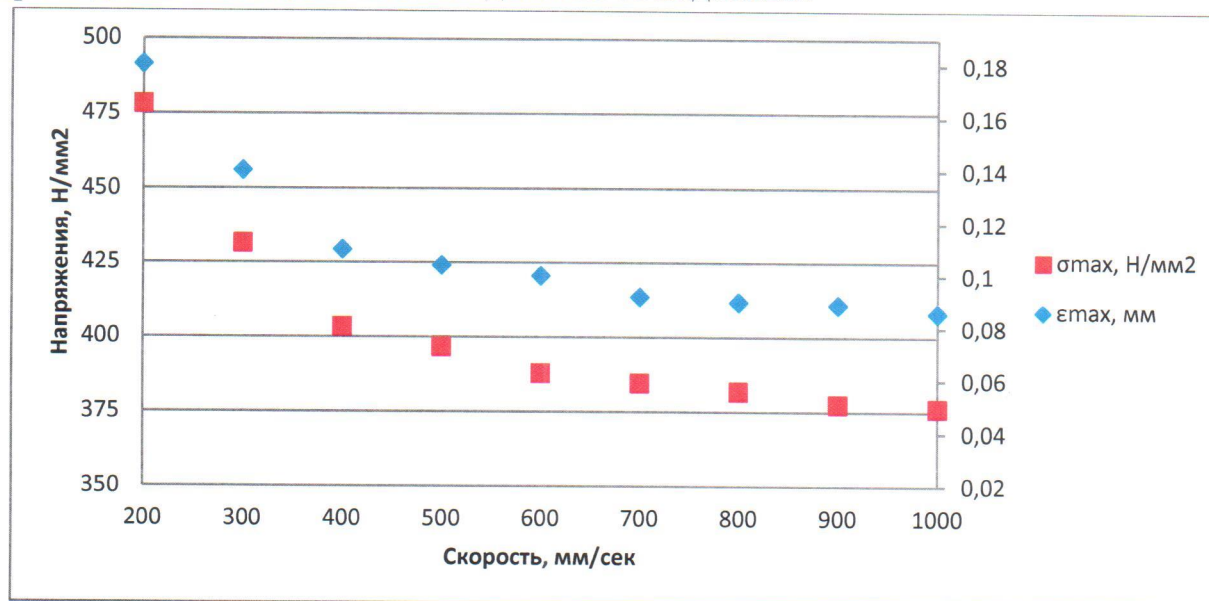


Рис. 2. Зависимости максимальных значений напряжений и деформаций от скорости лазерного луча

Из данных расчета можно заключить, что режимы со скоростью 200-300 не подходят для выращивания без компенсации искривлений в компьютерной модели из-за слишком больших значений деформаций и напряжений. Остальные режимы можно рассматривать, как перспективные. Окончательные выводы по режимам сделаны в главе 5 после анализа микроструктуры образцов, выращенных на данных режимах.

В пятой главе приведены результаты выращивания кубических образцов, выполненных на оптимальных режимах моделирования. Образцы выращены одновременно на одной платформе. Были изготовлены микрошлифы для анализа структуры и пористости на различных режимах. Это позволило сэкономить время и ответить на вопрос о качестве микроструктуры.

Для того чтобы вырастить изделие с требуемыми параметрами, необходимо знать оптимальные режимы для выращивания. В литературе освещены многие работы

по поиску и оптимизации режимов. Несмотря на известные данные, проведение экспериментальных исследований уже на этом первом этапе крайне необходимы. В литературе далеко не всегда описаны все важные факторы, влияние которых необходимо учитывать. Эксперименты по селективному лазерному плавлению в рамках данной работы проведены на описанной выше установке СЛП-110. Конструкция созданной установки, как показала практика, в итоге дорабатывалась для выполнения заданных условий. Заложенные возможности позволили выполнить все доработки достаточно оперативно.

Были получены единичные дорожки при варьировании скорости в пределах 200-1000 мм/сек с шагом 100мм/сек, и с мощностями 30,50,80 и 100 Вт.

Данные режимы были использованы для получения одного качественного слоя. Основной задачей данного этапа исследований был подбор оптимального расстояния между соседними дорожками. В итоге, окно оптимальных режимов было сужено. На заключительном этапе были выращены образцы в виде кубиков 10мм^3 . Из кубиков изготовлены шлифы и проанализирована микроструктура. При неоптимальном режиме возникают поры. Это вызвано тем, что часть порошка не успевает переплавиться, и жидкий металл не успевает заполнить пустоты. Режимы со скоростями менее 400 мм/сек представляют интерес, так как пористость в них не превышает 5%. На режиме со скоростью 200 мм/сек, на котором происходило полное переплавление порошка, наблюдались единичные поры, размер которых не превышал 5мкм, а относительная плотность достигала 99%.

Как показало моделирование процесса, на скоростях 200 и 300 мм/сек напряжения и деформации слишком высоки (Рис. 3). Выбран режим со скоростью 400 мм/сек, имеющий оптимальные соотношения напряжений/деформаций и плотности структуры.

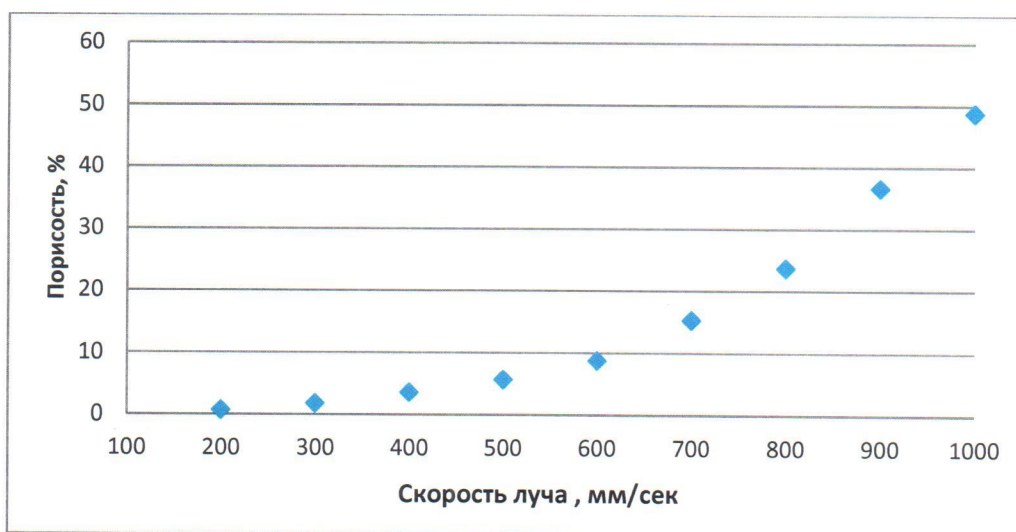


Рис. 3. Зависимость пористости от скорости луча

Подготовительный этап, состоящий из моделирования процесса выращивания детали и проверки отобранных режимов на практике, позволил охватить значительный объем информации о выращивании изделий из нержавеющей стали. Итогом проделанной работы стали рекомендации по оптимальным, с точки зрения минимизации деформаций и напряжений и качественной микроструктуры, режимам выращивания изделия. Уже на данном этапе можно с высокой вероятностью предсказать, как будет проходить выращивание изделия, и каких результатов следует ожидать.

В ходе работы на оптимальном режиме по заданию заказчика была выращена деталь (Рис. 4). Материал – нержавеющая сталь. Деталь выращивалась в течение 13 часов. Измерения показали хорошее согласование результатов моделирования и выращивания. Шероховатость составила по $Ra=4,8-7,6$ мкм, что полностью удовлетворяет требованиям заказчика.



Рис. 4. Готовое выращенное изделие

Результат разработки технологии и выращивания изделия были высоко оценены заказчиком. Технология изготовления данного изделия методом селективного лазерного плавления позволяла существенно сократить трудоемкость процесса, сократить в несколько раз время изготовления, и довести коэффициент использования материала до 90%. В настоящее время получен заказ на изготовление и поставку аналогичной установки для промышленного использования в отрасли.

Основные выводы по работе

1. В ходе работы была разработана, изготовлена, собрана и введена в эксплуатацию отечественная установка для селективного лазерного плавления металлических порошков СЛП-110.
2. Установка предназначена для выращивания изделий в защитной среде аргона, азота, гелия из таких материалов, как нержавеющие и инструментальные стали, сплавов на основе алюминия, вольфрама, никеля, кобальта и меди.
3. Достигнутая точность линейных размеров составила 20мкм, шероховатость по Ra =5 мкм.
4. Успешно применена модель расчета остаточных деформаций и напряжений, возникающих при выращивании изделия. Инженерный подход, заложенный в модели, является простым и оперативным инструментом оценки результатов выращивания селективным лазерным плавлением.
5. В результате совмещения компьютерного моделирования и экспериментальных исследований была достигнута относительная плотность выше 99,6%, и максимальные отклонения геометрии от компьютерной модели составили 0,1 мм.
6. Широкое варьирование скоростью и мощностью и установление оптимальных параметров обработки позволило достичь предела прочности образцов из нержавеющей стали в 606,8 МПа.

Список трудов

1. Быков А.А., Ставертий А.Я., Колчанов Д.С. Разработка экспериментальной установки для изготовления деталей из металлических порошков // Будущее машиностроения России. Сборник докладов Восьмой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М., 2015. С. 442-445. (0,3 п.л./0,2 п.л.).
2. Селективное лазерное плавление металлических порошков, выращивание тонкостенных и сетчатых структур / Д.С. Колчанов [и др.] // Технология машиностроения. 2015. № 10. С. 6-11. (0,7 п.л. / 0,5 п.л.).
3. Мельникова М.А., Колчанов Д.С., Мельников Д.М. Селективное лазерное плавление: применение и особенности формирования трехмерных конструктивных технологических элементов // Фотоника. 2017. № 2 (62). С. 42-49. (0,8 п.л. / 0,35 п.л.).
4. Технологические особенности выращивания элементов камер сгорания ЖРД методом селективного лазерного плавления из стали AISI 316L / Д.С. Колчанов [и др.] // XLII академические чтения по космонавтике: Сборник тезисов. М., 2018. С.51. (0,1 п.л. / 0,04 п.л.).
5. Устройство для изготовления детали из биметаллического композита селективным лазерным сплавлением: Пат. 135564 РФ / Д.С. Колчанов, Р.С. Третьяков, А.Я. Ставертий заявл.20.06.2013; опубл.20.12.2017. Бюлл. № 35. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).
6. Устройство для выращивания изделий методом селективного лазерного плавления: Пат. 135564 РФ / А.Г. Григорьянц, Д.С. Колчанов заявл.29.10.2015; опубл.10.01.2017. Бюлл. № . (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).