

На правах рукописи
УДК 621.375.826

Ставертий Антон Яковлевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫРАЩИВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ КОАКСИАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ
ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2017

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

Научный руководитель:

Григорьянц Александр Григорьевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Овчинников Виктор Васильевич
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Московский
политехнический университет»

Самарин Петр Евгеньевич
кандидат технических наук
ОАО НТО «ИРЭ-Полюс», г. Фрязино

Ведущая организация:

ОАО «Национальный Институт
Авиационных Технологий»
г. Москва

Защита диссертации состоится «__» _____ 2017 г.
на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью,
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 8 (499) 267-09-63.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета д.т.н., доцент

Михайлов В.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Создание сложных деталей для авиационного машиностроения является в настоящее время дорогостоящим по двум причинам: высокой стоимости и трудоемкости технологических процессов, а также из-за высокой стоимости материалов и низкой эффективности их использования.

Активно развивающиеся в последние годы аддитивные технологии направлены, во-первых, на уменьшение числа операций по производству деталей от компьютерной модели до готового изделия, а во-вторых, на экономию материала, затраченного на такое производство.

Лазерные аддитивные технологии направлены на выращивание деталей сложной формы из специальных материалов, трудно обрабатываемых традиционными методами. Внедрение таких технологических процессов в производство – сложная задача, требующая опытных данных на всех этапах производства для каждого конкретного материала. Исследуемый материал – жаропрочный никелевый сплав, Инконель 718, является перспективным благодаря уникальному набору свойств прочности и пластичности при повышенных температурах до 800 °С.

В настоящий момент широкое развитие получила малая авиация: беспилотные и учебные аппараты. Их развитие затруднено из-за высокой стоимости создания двигателей малой мощности и серийности. Традиционные технологии производства: центробежное литье с последующей механической обработкой, направленные на крупную серийность, приводят на малой серии деталей к очень высокой стоимости единицы продукции. Кроме того, внедрение таких новых деталей занимает длительное время.

В отличие от технологий центробежного литья, прямое лазерное выращивание позволяет получать детали без создания промежуточной оснастки. В отличие от методов механической обработки, прямое лазерное нанесение является аддитивным методом формирования детали не путем удаления материала (точение, фрезерование) или изменения формы (ковка, штамповка), а постепенным наращиванием (добавлением) материала. Процесс заключается в нанесении слоя материала путем расплавления основы и присадочного порошкового материала лазерным лучом. Метод позволяет изготавливать по компьютерной модели изделия с геометрией, близкой к заданной, что сокращает потери материала при механической обработке. Технология может снизить время изготовления и себестоимость детали при мелкосерийном производстве за счет отсутствия стадии создания пресс-штампа или литейной формы. Данное преимущество особенно ценно при создании опытных изделий машиностроения. Таким образом, разработка технологии получения детали из порошкового материала методом прямого лазерного выращивания является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы - разработка технологии и исследование процесса прямого лазерного изготовления объектов из никелевого сплава Инконель 718.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

1. Спроектирован и запущен комплекс для выращивания объектов методом коаксиальной лазерной обработки порошкового материала.

2. Проведен численный расчет взаимодействия газопорошкового потока с лазерным излучением.

3. Проведен численный расчет многопроходного процесса выращивания стенок из исследуемого порошкового материала.

4. Разработана стратегия выращивания объектов из материала с учетом технологических особенностей и требований.

5. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования влияния термических циклов многопроходной лазерной обработки на геометрические и технологические свойства выращенных объектов.

6. Разработана система управления комплексом, обеспечивающая управление такими параметрами процесса, как пауза между проходами, диаметр пятна, расход сопутствующего газа.

7. Проведены экспериментальные исследования для выявления особенностей формирования объектов при изменении основных технологических параметров процесса.

8. Для выращенных согласно технологии объектов проведены испытания на прочность.

Научная новизна работы:

1. Разработана физико-математическая модель многопроходного выращивания объектов, учитывающая взаимодействия лазерного излучения и частиц порошка. С помощью данной модели проведен расчет будущих геометрических размеров объекта и эффективности использования материала в процессе выращивания. Разработана методика модельного расчета необходимой паузы в процессе выращивания, обеспечивающей минимальное температурное воздействие на нижние слои обработанного металла.

2. Разработана методика разбиения геометрических объектов на элементарные объемы с целью их сопряжения и бездефектного выращивания с помощью высококонцентрированного лазерного излучения, основанная на данных математического моделирования процесса. Установлено, что с помощью пятиосевой кинематической системы возможно вырастить сложный объект, представляя его набором элементарных объектов с постоянной плоскостью выращивания.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Создан первый в России самостоятельный технологический комплекс для выращивания деталей сложной формы методом коаксиальной обработки порошковых материалов. Комплекс включает отечественную систему управления, и способен выращивать объекты из различных, в том числе и российских, порошковых материалов, с размером фракции от 20 до 150 мкм.

2. На базе разработанного оборудования и программного обеспечения разработана лазерная технология аддитивного изготовления деталей из жаропрочного никелевого сплава Инконель 718 по данным трехмерной компьютерной модели. Получены опытные объекты различной формы из

материала, от тонкостенных до полнотелых. Прочность материала не уступает образцам, полученным традиционными методами.

3. Подтверждена возможность выращивания объектов из жаропрочного никелевого сплава Инконель 718 без применения защитной камеры. Длительная прочность объектов после стандартной термообработки составила 1200-1400 МПа для образцов, нагруженных поперек направления выращивания объектов, и более 950 МПа для образцов, нагруженных вдоль направления выращивания.

Методы исследования

Эксперименты проводились в лаборатории МГТУ им. Н.Э. Баумана. Прямое лазерное выращивание объектов производилось на разработанной российской установке, запатентованной в ФИПС (Патент РФ №168271 от 25.01.2017 г.), оборудованной волоконным лазером с максимальной мощностью 3 кВт, пятиосевой системой перемещения и системой подачи порошка.

Гранулометрический анализ порошкового материала осуществлялся на заводе-изготовителе материала, фирме Pratt&Whitney. Поперечные шлифы полученных образцов сфотографированы на оптическом микроскопе Olympus ZS-61.

Съемка газодинамики порошкового материала проводилась на высокоскоростную CMOS-камеру производства Fastvideo LAB, с оригинальным программным обеспечением для анализа изображений. Измерения распределения лазерного излучения проводились на приборе Prometec UFF100. Численный расчет динамики частиц в поле действия лазерного излучения, а также расчет многопроходного процесса выращивания стенок из исследуемого порошкового материала выполнялся на базе программного пакета Fluent (ANSYS Inc.).

Испытания кратковременной прочности образцов проведены в испытательной лаборатории ИЛ КПСД ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», аттестованной и аккредитованной АВИАРЕГИСТРОМ МАК и Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии РФ.

Достоверность полученных результатов обеспечена корректным использованием общих положений фундаментальных наук (уравнения баланса энергии, массопереноса и теплопереноса и т.д.), проверена по известным критериям изучаемых процессов и подтверждена экспериментальными данными.

Апробация работы

Результаты работы доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 2013, 2014, 2015, 2016. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных научных форумах и конференциях: «Технологии упрочнения и нанесения покрытий и ремонта: теория и практика». Санкт-Петербург, 2013; «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика» Санкт-Петербург, 2014; The International Conference on Coherent and Nonlinear Optics Lasers, Applications and Technologies (ICONO/LAT), Минск, 2016.

Публикации

Основное содержание диссертации отражено в 7 научных статьях из перечня ВАК РФ, а также в 2 патентах ФИПС на полезную модель.

Объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, заключения и списка литературы из 66 наименований; содержит 150 страниц машинописного текста, 76 рисунков и 23 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении перечислены основные аддитивные технологии и компании, занимающиеся исследованиями в данной области. Большинство фирм расположено в США и Германии. К сожалению, в Российской Федерации нет ни готового серийного оборудования для получения деталей лазерной обработкой порошковых материалов, ни массовой технологии такой обработки, что делает данную научно-техническую задачу очень актуальной.

Современные системы в основном используются инженерами для наилучшего понимания и предварительного испытания их конструкторских разработок – от опытных партий изделий до их серийного производства. Лишь в некоторых случаях технологии используют для серийного производства: на сегодняшний день это обработка металлов давлением, медицина и авиация.

Рассматриваемые технологии востребованы, в первую очередь, при производстве сложных наукоемких изделий машиностроения. Полноценная реализация этих технологий в России позволит вооружить отечественное машиностроение мощным инструментом повышения качества и конкурентоспособности продукции, а также значительно расширит возможности проектирования новой техники.

В первой главе изложена актуальность задачи разработки лазерной технологии изготовления деталей сложной формы методом коаксиальной лазерной обработки порошковых материалов. Перечислены основные преимущества технологий по сравнению с традиционными:

- 1) Возможность изготовления объектов из нескольких материалов с послойным изменением состава.
- 2) Возможность изготовления объектов с высокой сложностью геометрической формы, включая поднутрения, скрытые полости.
- 3) Высокая автоматизация процесса, благодаря чему снижается человеческий фактор и достигается высокая воспроизводимость траектории обработки при выращивании объектов.

Прямое лазерное нанесение материала является аддитивным методом лазерной обработки, который позволяет послойно изготавливать металлические детали по заданной компьютерной модели в одном технологическом цикле. Изготовленный материал имеет механические и физические характеристики, идентичные свойствам материала, полученного традиционной ковкой или литьем.

В отличие от технологий порошковой металлургии, а также селективной послойной обработки, технология позволяет:

- изготавливать детали из композиционного материала со 100%–ой плотностью;
- воспроизводить форму изделия по компьютерной модели, снижая потери материала при механической обработке;

- изменять состав материала во время нанесения согласно функциональной особенности поверхностной и внутренней части детали;
- получать материалы со специфическими свойствами, характерными только для лазерной обработки;
- использовать коммерчески доступные порошковые материалы;
- осуществлять локальное упрочнение (модификацию) рабочей детали.

В результате анализа литературных и экспериментальных данных, выделены основные параметры оценки технологии:

1. Стабильность геометрических размеров одиночных валиков. В случае удовлетворительной стабильности входных параметров процесса, таких, как расход порошка и газов, мощности лазерного излучения и скорости процесса, они являются нестабильными, в основном, по двум причинам:

а) краевые эффекты технологии – вход и выход с каждой траектории обработки;

б) переменные условия охлаждения при постоянных условиях нагрева лазерным лучом при обработке программы от слоя к слою.

2. Производительность процесса.

3. Дефектность процесса, в частности рассмотрены такие дефекты, как поры, трещины, несплавления.

В результате взаимного рассмотрения всех указанных параметров выделены основные недостатки технологии выращивания объектов методом коаксиального лазерного плавления:

- сравнительно невысокая точность выращиваемых объектов;
- высокая зависимость свойств полученного материала от параметров процесса и геометрических особенностей каждой конкретной детали;
- высокая наукоёмкость, как самого технологического процесса, так и процесса разработки файла траектории обработки.

Для снижения перечисленных недостатков в данной работе проведен ряд исследований по взаимосвязи между геометрическими параметрами одиночных валиков и размерами полученных объектов, а также взаимосвязи стратегии обработки модели и геометрической формы объекта.

Во второй главе проведен поэтапный анализ проектирования кинематической и технологической оснастки комплекса.

Поскольку для выращивания габаритных объектов из металлических порошков требуется высокопроизводительное оборудование с множеством наукоемких механизмов и устройств, обладающими широкими функциональными возможностями, в работе проведено исследование наиболее известных зарубежных аналогов. После анализа их кинематических и технологических особенностей, были определены наиболее значимые для воспроизведения в данном комплексе.

В результате выделены специфические требования для различных кинематических узлов комплекса, а также рассмотрена технологическая начинка системы выращивания. Спроектированный комплекс имеет ряд особенностей по сравнению с иностранными аналогами:

1. Система изменения диаметра пятна лазерного излучения в процессе выращивания. Система позволяет повысить производительность процесса выращивания благодаря пропорциональному увеличению мощности, расхода порошкового материала и скорости процесса на участках выращивания, находящихся внутри протяженного контура. Благодаря такой стратегии выращивания точность конечного изделия остается высокой.

2. Развитое многофункциональное программное обеспечение для проектирования многоэтапного послойного процесса выращивания. Программное обеспечение, позволяет выполнять все подготовительные операции от создания трехмерной модели выращивания до ее корректировки, оптимизации и разделения на элементарные объекты выращивания.

3. Система последовательного измерения геометрических размеров объекта в процессе выращивания. Система, основанная на бесконтактном датчике измерения, позволяет проводить по ходу процесса контроль уровня выращенного в действительности материала и сравнить его с теоретическими размерами объекта. В случае несовпадения, система корректирует программу обработки и смещает последовательность выращивания к ближайшему слою.

Технические характеристики комплекса указаны в Таблице 1. Указанные параметры позволяют решить требуемую задачу с учетом ряда особенностей технологии и материала.

Таблица 1.

Технические характеристики разработанного комплекса

№	Наименование	Ед.	Значение
1	Рабочий ход продольной осей X и Y (горизонтальная плоскость), не менее	мм	610
2	Рабочий ход вертикальной оси Z, не менее	мм	610
3	Погрешность позиционирования по линейным осям, не более	мкм/м	30
4	Максимальная линейная скорость перемещения	м/с	10
5	Диапазон угловых перемещений по оси A	градус	-135... +135
6	Диапазон угловых перемещений по оси B	градус	непрерывно
7	Погрешность позиционирования по угловым координатам, не более	угловых секунд	10
8	Наибольший вес обрабатываемой детали, не более	кг	500
9	Наибольший габарит обрабатываемой детали, не более	мм	400x400x400
10	Максимальная средняя мощность лазерного излучения	Вт	3000
11	Диапазон регулировки диаметра лазерного луча в зоне обработки	мм	От 0,5 до 3
12	Размер фракции подаваемого порошка	мкм	От 20 до 150

В третьей главе рассмотрена разработка стратегии выращивания многослойных объектов. Выделены этапы планирования траектории обработки:

1. Создание набора элементарных объемов, каждый из которых возможно вырастить в послойном процессе без значительного изменения ориентации детали в пространстве (то есть, без поворота осей).

2. Разбиение каждого элементарного объема на плоские слои. Разбиение на слои подразумевает чередование направлений обхода лазерного луча. Именно на данном этапе закладываются, как точность будущей детали, так и ее шероховатость.

3. Формирование траекторий обхода для каждого слоя каждого элементарного объема. Задание режимов обработки.

В число параметров любого слоя входят следующие:

Геометрические: последовательность обхода; шаг между проходами; толщина слоя; порядок начала / окончания обработки каждой конкретной линии; скорость взаимного перемещения заготовки и лазерного источника.

Технологические: мощность лазерного излучения на каждой линии обхода; расход порошкового материала; порядок включения лазерного излучения; расход технологических газов.

Идеология разбиения твердого тела произвольной формы на элементарные объекты состоит в том, что существуют элементарные объемы, получаемые без изменения положения плоскости выращивания в пространстве, и выращивание каждого такого объема, при соблюдении ряда технологических приемов, является стабильным, с удовлетворительным совпадением соответствия теоретического и практического размеров детали. Таким образом, первый этап разбиения необходим в первую очередь для выделения таких объемов. В порядке усложнения элементарных объектов можно выделить следующие:

1. Стенка высоты h , шириной в 1 валик.
2. Прямоугольный параллелепипед высоты h , шириной B , длиной A .
3. Треугольный объект высотой h и координатами A, B, C .
4. Цилиндр высотой h , диаметром D .
5. Сектор круга диаметром D , углом L .

Дальнейшие этапы планирования траектории необходимы, чтобы учесть геометрическую неоднородность детали: переменную толщину, изменение направления выращивания.

На разработанном комплексе отработана технология выращивания объектов элементарной формы. Установлено, что наиболее стабильное выращивание получено без выключения лазерного луча, с перемещением заготовки относительно технологической головки. В связи с этим необходимо, по возможности, реализовывать такую траекторию обхода по контуру, чтобы лазерный луч действовал на тонкие стенки и оконтуривания слоя непрерывно по ходу выращивания, а в заливке действовала пауза между отдельными валиками, для исключения перегрева. Моделирование в данной технологии применяется для непосредственного расчета геометрических параметров будущего валика металла

в каждом конкретном случае обработки, а также для оценки температуры точек выращенного объекта.

В четвертой главе проведено численное моделирование процесса коаксиальной лазерной обработки порошковых материалов.

Разработка технологии в первую очередь связана с процессами фундаментального характера: температуры детали в процессе выращивания; распределения лазерного излучения в зоне и на поверхности обработки; распределения частиц порошкового материала в процессе выращивания.

Для их расчета необходимо иметь математическое представление процесса. Создание математической модели предусматривает ряд допущений:

1. Порошковый материал имеет сферическую форму.

2. Порошковый материал имеет равномерный химический состав, независимо от размера частиц.

3. Размер частиц порошка составляет от 20 до 50 мкм, с дискретным изменением размера, с шагом 10 мкм. Количество частиц порошка каждого размера одинаково.

4. Взаимными столкновениями между частицами пренебрегаем.

5. Частицы порошка взаимодействуют с лазерным излучением с коэффициентом поглощения, не зависящим от температуры, и составляющим 30%.

6. Распределение лазерного излучения по диаметру луча принимаем распределенным по закону экспоненты. Его описание представлено системой уравнений в общем виде:

$$\begin{cases} q = q_0 e^{-kr^2}, r < r_0 \\ q = 0, r > r_0, \end{cases} \quad (1)$$

где r_0 – расстояние от оси лазерного излучения, на котором плотность мощности лазерного излучения составляет 10^8 Вт/м²;

q_0 – максимальная плотность мощности лазерного излучения, Вт/м², действующая на оси излучения.

7. Все частицы порошка, попавшие на поверхность подложки в зону действия лазерного луча с диаметром $d_0 = 2r_0$, считаем попавшими в валик наносимого металла и сформировавшими его. Все частицы, не попавшие в эту зону в плоскости подложки – считаем не попавшими в данную область и потерянными.

8. Теплофизические постоянные для материала частиц и подложки принимаем зависящими от температуры, с учетом характерных температур: температуры плавления и температуры кипения металла.

9. Столкновения частиц между собой не учитываются;

10. Границы расчетной области достаточно удалены от сопла и не влияют на течение газа.

С учетом общих допущений, многоступенчатый расчет разбит на **три этапа**:

1. Расчет подачи газопорошковой струи к подложке под действием лазерного излучения.

2. Расчет нагрева подложки с добавлением ячеек сетки (создание валика).

3. Анализ результатов расчета.

Исходными данными для определения газодинамических параметров в исследуемой области движения газа являются расчетная область (внутренняя геометрия сопла, положение подложки, внешние границы), теплофизические свойства газа и расходы газа во входных сечениях кольцевых каналов. В начальный момент времени $t = 0$ расчетная область была заполнена газом (аргоном) с параметрами внешней окружающей среды $P = P_0 = 0.1$ МПа, $T = T_0 = 300$ К, $V = 0$.

Расчетная сетка представляет из себя набор ячеек с фиксированными линейными размерами в области подложки и зоне сопла, и переменными размерами в области растущего валика. Ячейки, расположенные на расстоянии не более 1,5 мм от оси обработки, имеют минимальный размер – 100 мкм по ребру. По мере удаления от зоны обработки принято увеличение размера с коэффициентом 1.2 на шаг, до размера 400 мкм по ребру. Для каждой ячейки из сетки дифференциальные уравнения решаются отдельно. Связь между ними осуществляется через граничные условия. Основные уравнения указаны в Формуле 2.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{нестационарная}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi V \cdot dA}_{\text{конвективная}} = \underbrace{\oint_A \Gamma \nabla \phi \cdot dA}_{\text{диффузионная}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{излучающая}} \quad (2)$$

В Формуле (2) каждое слагаемое учитывает конкретные физические процессы в газопорошковом потоке:

- нестационарная составляющая - движение потока;
- конвективная составляющая - изменение плотности газа при расширении;
- диффузионная составляющая - перемешивание потоков газа с различной температурой;
- излучающая составляющая - потери энергии через поверхностное излучение.

Согласно закону сохранения энергии, нестационарная и конвективная составляющие прироста энергии в каждом элементарном объеме потока, в сумме равны сумме потерь энергии за счет диффузии и излучения этого же элементарного объема в окружающее пространство.

Результатом **первого этапа** расчета является массив данных: множество частиц, вылетевших из сопла и достигнувших поверхности подложки. Для каждой частицы расчет выдает следующие данные: координата частицы по осям ОХ и ОУ; скорость частицы на подлете к поверхности подложки; температура частицы на подлете к подложке; масса частицы с учетом возможного испарения с поверхности. Этот массив вносится в следующий этап в виде файла – источника массы и энергии, дополнительной к лазерному источнику.

Второй этап расчета - расчет распространения теплоты в объеме подложки с наносимым валиком металла, - ведется следующим образом:

1. Объем дробится на конечные элементы.
2. Каждая ячейка рассматривается как элементарный объем с границами и граничными условиями.

Для каждого элементарного объема справедливо выражение закона сохранения:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T), \quad (3)$$

являющееся уравнением теплопроводности без источника, где T - температура, t - время, λ - коэффициент теплопроводности.

Известный тепловой источник в общем виде может быть записан как:

$$-\lambda \nabla T = Q(x, y, z, t), \quad (4)$$

Где знак «-» означает уменьшение энергии внутри элементарного объема;

- Q - эффективная тепловая мощность на поверхности подложки. В общем случае она связана с плотностью мощности лазерного луча:

$$Q(x, y, z, t) = q_m \exp(-kr_{ij}^2); \quad (5)$$

q_m - измеренная максимальная плотность мощности, Вт/м²,

r_{ij} - расстояние от оси перемещающегося луча до расчетной точки.

Уравнение движения оси луча вдоль поверхности пластины:

$$\begin{cases} x_{\text{тек}} = x_0 - v \left(t - \frac{n_1 a}{v} \right), \\ y_{\text{тек}} = y_0 + st * n_{\text{тек}}, \\ z_{\text{тек}} = st_z * n_2, \\ n_{\text{тек}} = \frac{vt}{a}; \end{cases} \quad (6)$$

где n_1 - текущий номер наносимой подряд дорожки, a - длина дорожки, мм, st - расстояние между соседними валиками, мм; st_z - расстояние по вертикали между нанесенными в многопроходном процессе валиками, мм. Текущая координата $(x_{\text{тек}}, y_{\text{тек}}, z_{\text{тек}})$, а также текущий номер дорожки $n_{\text{тек}}$, зависят от времени процесса t .

Таким образом, для каждого положения оси движущегося лазерного луча - точки O с координатами $(x_{\text{тек}}, y_{\text{тек}}, z_{\text{тек}})$, переходя к сетке разбиения модели в рабочем расчете, вычисляется значение плотности мощности движущегося источника.

Расчет, реализованный в системе моделирования Fluent, позволяет провести подготовку технологии выращивания не только одиночного валика, но и нескольких валиков, образующих элементарный объем - стенку или параллелепипед. Такое моделирование позволяет максимально приблизиться непосредственно к формированию детали.

С помощью разработанной модели проведены расчеты ряда режимов процесса. Основные параметры режима, принятого к экспериментальному исследованию, представлены в Таблице 2.

Таблица 2.

Параметры процесса, смоделированного для режима №1

Параметр	Обозначение	Ед. измерения	Значение
Мощность лазерного излучения	$P_{ли}$	Вт	2000
Скорость перемещения	v	мм/с	5
Диаметр луча на поверхности обработки	$d_{п}$	мм	2,4
Расход порошка	$q_{п}$	г/с	5
Расход транспортирующего газа	$q_{г}$	г/мин	0,008
Расход коаксиального газа	$q_{к}$	г/мин	0,004
Коэффициент формы частиц порошка	$K_{ф}$	-	1
Температура окружающей среды	$T_{окр}$	К	300
Температура подложки	T_0	К	300

Температура каждой точки поверхности и объема может быть вычислена с помощью модели. Цветовое обозначение (Рис.1) показывает температуру поверхности в каждый момент времени процесса. Температура в точке объема может быть получена с помощью программы и представлена в виде значения или графика изменения в указанной точке с течением времени.

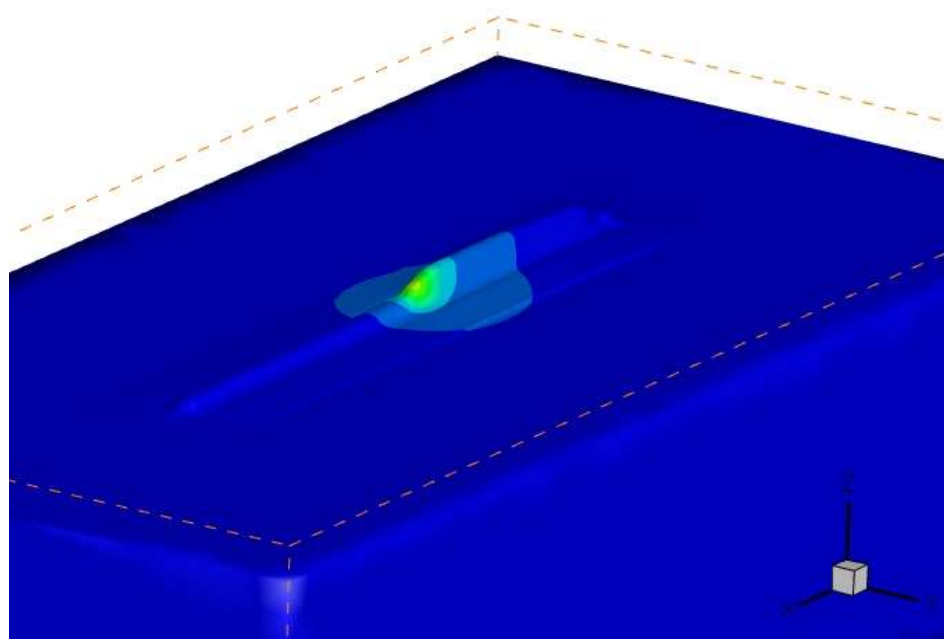


Рис. 1.

Фрагмент смоделированного процесса выращивания валика

В результате сравнения рассчитанных в численном эксперименте режимов и валиков, наплавленных на установке, выявлена высокая степень соответствия результатов моделирования и лазерного процесса. Экспериментальные валики имеют форму, близкую к смоделированной (Рис. 2). Видно, что при относительном совпадении геометрических размеров наблюдается отличие в форме валиков: смоделированные валики на втором проходе имеют более острую форму. Данное

обстоятельство объясняется тем, что модель не учитывает «налипания» частиц порошка сбоку. Однако качественное соответствие достигнуто, и провести расчет термических циклов, а также и геометрических размеров валика с помощью данной модели, возможно.

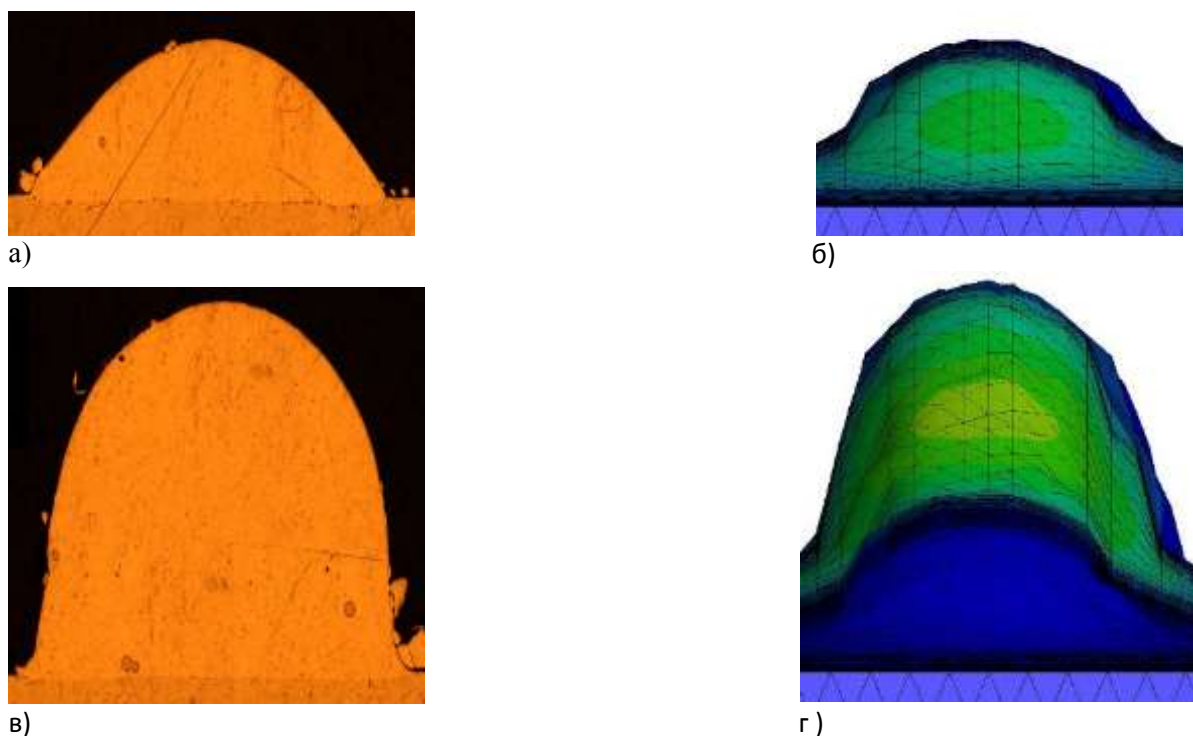


Рис. 2.

Выращивание объекта «стенка», проведенное на режиме №3: а - 1-й проход, поперечный металлографический шлиф; б - 1-й проход, смоделированный валик; в - 2-й проход, поперечный металлографический шлиф; г - 2-й проход, смоделированный валик

С применением разработанной численной модели разработана и проверена методика расчета длительности паузы между проходами при выращивании тонкостенных объектов, обеспечивающей минимальное повторное воздействие на выращенные слои. Проведена серия расчетов режимов с паузами и без, с подогревом и без них. В результате расчетов установлено, что для выращивания объекта «стенка», длиной 20 мм, необходима пауза, составляющая 2 секунды, в случае выращивания без подогрева, и 5 секунд – в случае выращивания с сопутствующим подогревом. При этом материал нижележащих слоев не будет нагрет до температуры выше 600°C дольше 1 секунды, при этом окисление металла не вызовет его разупрочнения.

В пятой главе с применением рассчитанных и проверенных режимов выращены объекты для проведения механических испытаний на растяжение при комнатной и повышенной температурах.

С помощью расчета получены термические циклы точек на оси выращивания для металла Инконель 718 при различных температурах подложки в процессе. Проведены экспериментальные исследования режима прямого выращивания. В

процессе выращивания учтены и исключены особенности, характерные для металла:

- усиленное окисление материала при температуре выше 600 °С приводит к разупрочнению выращенных заготовок;
- термическая обработка позволяет повысить свойства металла до свойств, полученных при традиционных методах обработки.

В результате анализа разрушенных образцов установлено следующее:

1. В изломах присутствуют поры и не переплавленные в процессе выращивания частицы порошка. Однако нет ни одного образца, разрушенного строго по плоскости срастания слоев. Это говорит о равнопрочности материала между слоями и между соседними валиками.

2. Боковая поверхность образцов, изготовленных методом аддитивной технологии сильно деформирована в процессе растяжения. Степень деформации максимальна у образцов, выращенных поперек будущего приложения нагрузки (ЛМ2 и ЛБ1).

3. У некоторых образцов сечение после испытаний имеет сложную неправильную форму. Проявляется незначительная анизотропия свойств материала объектов, выращенных многослойным методом с переменным направлением выращивания.

В модельной задаче был найден диапазон скоростей процесса и соответствующий им диапазон пауз после каждого прохода выращивания, которые обеспечивают в результате необходимое время пребывания металла при температуре интенсивного окисления для исключения образования дефектов в закристаллизовавшемся металле. На этапе моделирования было заложено также, что при введении паузы в процесс выращивания, составляющей 2 секунды, металл должен успеть остыть до температуры ниже 600°С быстрее чем за 1 секунду, и значительного окисления металла не произойдет. В модельной задаче установлено, что в случае предварительного подогрева подложки процесс охлаждения замедлен настолько, что паузу необходимо увеличить до 5 секунд. В результате через 5 секунд после прохождения луча валик нижележащего, предыдущего слоя, имеет температуру ниже 600 °С.

В соответствии с заложенными технологическими возможностями комплекса, и с учетом полученных экспериментальных данных, сформулирован алгоритм процесса выращивания объекта.

1. Подготовка трехмерной модели объекта.
2. Разбиение трехмерной модели на элементарные объекты, выращиваемые без перемены направления выращивания.
3. Моделирование режима выращивания каждого элементарного объекта.
4. Разбиение каждого элементарного объекта на слои. Задание параметров процесса.
5. Создание управляющей программы для процесса выращивания.
6. Запуск процесса выращивания.

В соответствии с данным алгоритмом проведено выращивание полноразмерных элементов турбинного колеса: лопаток с основанием (Рис. 3),

элементов турбинного колеса (Рис. 4). Данные детали невозможно изготовить с помощью стандартной трехосевой кинематической системы, поскольку она имеет поднутрения в любом направлении выращивания. В связи с этим, к ней применен алгоритм разбиения на элементарные объекты.

Кроме того, деталь имеет переменную толщину, в связи с чем при создании траектории обработки, согласно созданной методике, введена корректировка обхода: добавлены паузы между отдельными слоями.



Рис. 3.

Лопатка компрессора, выращенная целиком с помощью лазерной аддитивной технологии

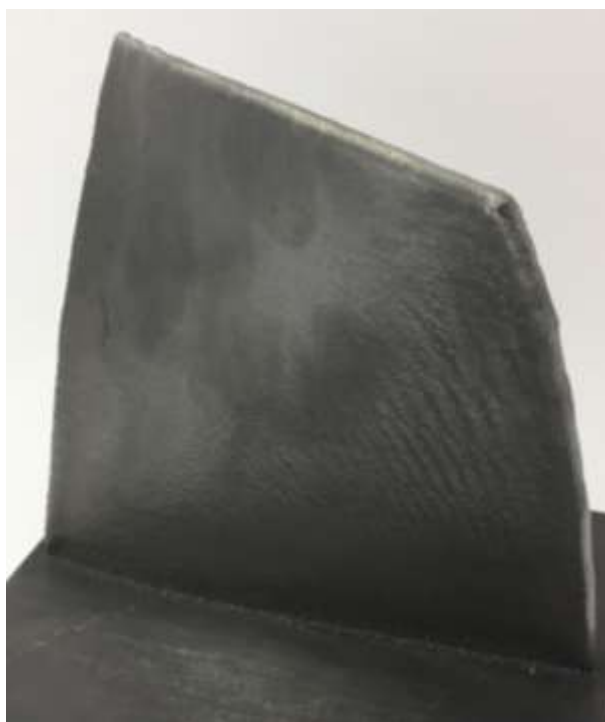


Рис. 4.

Полноразмерная лопасть турбинного колеса

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Спроектирован и изготовлен первый в России комплекс для выращивания объектов сложной формы с зоной обработки 600x600x800 мм (ШхГхВ) с помощью технологии коаксиальной лазерной обработки порошковых материалов.
2. Разработана математическая модель, позволяющая провести подготовку технологии обработки деталей по заданной траектории и вычислить ряд важных для процесса параметров: термические циклы, геометрические размеры валиков, производительность процесса и эффективность использования порошкового материала.
3. Разработана аддитивная лазерная технология изготовления объектов сложной формы из никелевого жаропрочного сплава Inconel 718. Полученные объекты прошли успешные испытания на статическую прочность при комнатной и повышенной (600 °С) температурах, рентгеновский контроль, фрактографический анализ.
4. Создана и запатентована система изменения диаметра пятна лазерного излучения в процессе выращивания.
5. Получены стандартные объекты из жаропрочного никелевого сплава, не уступающие по прочности стандартному материалу, полученному прокатом.
6. Проведенные исследования показали возможность выращивать полноразмерные детали авиационного машиностроения, не уступающие по прочности деталям, полученным стандартными способами изготовления.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Оптимизация формы сопел для лазерной коаксиальной наплавки / А.Я. Ставертий [и др.] // Сварочное производство. 2014. №08. С. 24-28. (1 п.л./0,3 п.л.).
2. Макаренко К.И., Ставертий А.Я., Третьяков Р.С. Особенности газопорошковой лазерной наплавки покрытий лучом прямоугольного сечения // Будущее машиностроения России. Сборник докладов Восьмой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М.: 2015. С. 457-462. (0,3 п.л./0,2 п.л.).
3. Григорьянц А.Г., Ставертий А.Я., Третьяков Р.С. Пятикоординатный комплекс для выращивания деталей методом коаксиального лазерного плавления порошковых материалов // Технология машиностроения. 2015. №10. С. 22-28. (0,8 п.л./0,3 п.л.).
4. Лазерная наплавка композиционных износостойких покрытий на никелевой основе, армированных карбидом вольфрама / А.Я. Ставертий [и др.] // Сварочное производство. 2016. №01. С. 10-15. (1,0 п.л./0,3 п.л.).

5. Сравнение коррозионной стойкости покрытий из кобальтовых и никелевых сплавов, наплавленных лазерным излучением [Электронное издание] / А.Я. Ставертий [и др.] // Инженерный журнал наука и инновации. Эл. № ФС77-53688. 2012. № 06. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-241. (0,35 п.л./0,15 п.л.).
6. Исследование пористости покрытий из кобальтовых и никелевых сплавов, наплавленных лазерным излучением [Электронное издание] / А.Я. Ставертий [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. Эл. № ФС77-53688. 2012. №06. URL: <http://engjournal.ru/articles/240/240.pdf> (дата обращения: 10.04.2017). (0,6 п.л./0,2 п.л.).
7. Сравнение эксплуатационных характеристик покрытий из нержавеющей сталей аустенитного и мартенситного классов, полученных методом лазерной газопорошковой наплавки [Электронное издание] / А.Я. Ставертий [и др.] // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э Баумана. Эл. № ФС 77 – 48211. 2012. №06. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/418550.html> (дата обращения: 10.04.2017). (0,6 п.л./0,3 п.л.).