

На правах рукописи

МИАНДЖИ ЗАХРА

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫРАЩИВАНИЯ  
ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ  
КОАКСИАЛЬНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ

2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической  
обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук



Москва 2022

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

Научный руководитель:

**Холопов Андрей Андреевич**  
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

**Горунов Андрей Игоревич**  
доктор технических наук,  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»,  
Профессор кафедры Лазерных и аддитивных технологий

**Ставертий Антон Яковлевич**  
кандидат технических наук,  
Общество с ограниченной ответственностью «Лероу»,  
Генеральный директор

Ведущая организация:

**ИПЛИТ РАН — филиал ФНИЦ  
«Кристаллография и фотоника» РАН, г. Шатура**

Защита диссертации состоится « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г. в \_\_\_\_\_  
на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 в Московском  
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Телефон для справок +7-499-267-09-63.

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

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке  
Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана,  
на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru)

Автореферат разослан « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.331.02  
кандидат технических наук, доцент



А.В. Богданов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Среди методов обработки материалов в настоящее время активно развивается группа аддитивных технологий, позволяющая снизить себестоимость и трудоёмкость при единичном и мелкосерийном производстве ряда современных деталей со сложной геометрией, а также затраты материалов.

В сравнении с технологией селективного лазерного плавления, технология коаксиального лазерного плавления (КЛП) уступает в возможности получения высокой геометрической точности и детализации выращенного изделия, но обладает существенно большей производительностью, возможностью наращивания элементов на готовые поверхности и одновременного использования нескольких разнородных материалов в разных концентрационных соотношениях. В связи с этим актуальными являются исследования, направленные на повышение геометрических и прочностных характеристик тонкостенных элементов, являющихся составными частями габаритных изделий, получаемыми методом КЛП.

Процесс КЛП характеризуется переменными тепловыми условиями сплавления материала, учесть которые в конечной технологии возможно только с использованием численного моделирования. Существует множество моделей процесса для разных материалов и геометрических задач, однако они зачастую показывают противоречивые результаты, так как основаны на наплавке одного слоя. В связи с этим актуальной остаётся разработка моделей, учитывающих переменные тепловые условия процесса начиная от подложки, заканчивая готовым изделием

Для повышения конкурентоспособности метода КЛП при производстве дорогостоящих и трудоёмких изделий необходима разработка методов достижения высоких механических свойств тонкостенных конструкций, а также высокого качества их боковой поверхности. Для решения этих задач необходимо обеспечить равномерную мелкозернистую структуру по всему объёму выращиваемой геометрии, а также стабилизацию теплового поля в процессе выращивания по всей высоте изделия.

**Цель работы:** разработка технологических мероприятий для повышения точности геометрических характеристик и механических свойств тонкостенных объектов, изготовленных методом коаксиального лазерного плавления порошков нержавеющей стали.

Для достижения цели работы были поставлены и решены следующие **задачи:**

1. Исследование взаимосвязи высоты стенки с геометрическими характеристиками наносимых на нее валиков и параметрами процесса выращивания тонкостенной конструкции.

2. Определение наиболее значимого параметра режима процесса для регулирования объёма ванны расплава в процессе выращивания тонкостенной конструкции.

3. Разработка математической модели процесса выращивания и экспериментальная проверка её адекватности.

4. Определение закона управления объёмом ванны расплава в процессе выращивания.

5. Экспериментальный анализ влияния на геометрические характеристики и качество боковой поверхности применения модели управления объёмом ванны расплава.

6. Определение условий образования краевого дефекта при выращивании и изыскания методов борьбы с ним.

7. Исследование влияния дополнительного оплавления слоя при выращивании тонких стенок на геометрические характеристики и качество боковой поверхности.

8. Исследование структуры и механических свойств при выращивании тонких стенок с дополнительным переплавлением каждого слоя без подачи порошка.

9. Разработка технологических рекомендаций по выращиванию лопатки на поверхности колеса турбины.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. На основании расчетов и экспериментального исследования установлена зависимость толщины тонкой стенки от количества наплавленных слоёв при её выращивании из порошков нержавеющей стали, согласно которой толщина стенки возрастает от начального до  $20 \pm 2$  слоя не менее, чем на 65 % и далее не изменяется.

2. Показано, что послойное изменение мощности по закону, полученному в результате моделирования, на начальном этапе формирования тонкой стенки методом КЛП позволяет получить равномерное по толщине поперечное сечение тонкой стенки. Установлено, что применение переменной мощности лазерного излучения при выращивании тонких стенок позволяет снизить шероховатость их боковой поверхности более чем в 2 раза.

3. Применение лазерного оплавления каждого слоя без добавления порошка на мощности, составляющей 60% от основного режима обработки, позволяет исключить краевой эффект утолщения стенки на торцах, а также, за счёт выравнивания микроструктуры по всему объёму стенки, увеличить предел прочности на 20 %, пластичность на 45 %.

**Практическая значимость** работы состоит в следующем:

1. На основе комплексного анализа влияния параметров режима выращивания на формирование тонкой стенки при коаксиальном лазерном

плавлении частицами нержавеющей стали диаметром от 53 до 150 мкм определены их рациональные диапазоны: мощность лазерного излучения от 425 до 800 Вт, скорость обработки от 800 до 1000 мм/мин, расход порошка от 6,20 до 9,93 г/мин.

2. Получены уравнения регрессии, устанавливающие значения параметров лазерного излучения в зависимости от количества слоев и радиуса кривизны траектории движения лазерной головки, которые обеспечивают стабильное формирование поперечного сечения тонкой стенки.

3. Разработаны технологические рекомендации по выращиванию лопаток из нержавеющей стали на поверхности колеса турбины.

**Методы исследования** включали в себя стандартные теоретические и экспериментальные методы. Моделирование проводилось с использованием стандартных программных продуктов COMSOL 5,6. Все образцы единичных сплавленных дорожек, сплошных образцов и образцов на механические испытания выращены в одинаковых условиях на установке для коаксиального лазерного плавления «КЛП-400». Исследования микроструктуры проводились с применением оптических микроскопов по стандартным металлографическим методикам. Исследования боковой поверхности и формы поперечного сечения в сплошных образцах проводилось на метрологическом компьютерном томографе GE PHOENIX V. Исследование форм ванн проводилось по известному и ранее апробированному для процесса сварки методу с использованием нового разработанного оборудования.

**Достоверность** подходов к численному моделированию процессов лазерного плавления подтверждается использованием современного верифицированного программного обеспечения и проверкой его применимости. В полученных результатах отсутствуют нефизические значения. Сравнение рассчитанных параметров с экспериментом показало хорошее соответствие. Полученные результаты обеспечиваются корректным применением основных положений естественных наук при проведении расчётных исследований, осуществлением измерений на поверенном оборудовании по стандартным методикам и использованием ранее проверенных принципов при создании новых испытательных приспособлений. Достоверность подтверждается экспериментальными данными, обработанными с помощью методов статистического анализа.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Установленные зависимости размеров ванны расплава от количества слоёв и параметров режима прямого лазерного выращивания тонкостенных деталей.

2. Результаты исследования влияния режимов дополнительного оплавления слоёв на механические свойства тонкостенных деталей.

3. Установленные диапазоны оптимальных технологических режимов выращивания тонкостенных деталей с качественной боковой поверхностью из стали AISI 316 L.

### **Апробация работы**

1. Третья международная конференция «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии Материалы» (Москва, 2019)

2. Всероссийская школа-конференция с международным участием «Аддитивные технологии в цифровом производстве: металлы, сплавы, композиты» (Москва, 2019)

3. Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2020).

4. XIV Королевские академические чтения по космонавтике (Москва, 2021)

### **Публикации**

По результатам исследования опубликовано 5 научных работы в отечественных и зарубежных научных рецензируемых журналах, в том числе 4 статьи в изданиях из перечня ВАК РФ и 1 статья в журнале, индексируемом в базе данных SCOPUS.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, пяти глав, общих выводов и заключения, списка литературы из 141 наименования. Работа содержит 152 страниц машинописного текста, в том числе 26 таблиц и 92 рисунка.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **Введении** обоснованы актуальность работы, приведены цель работы, основные задачи, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, обоснование достоверности полученных результатов и информация об апробации работы. Актуальность выбранной темы обусловлена необходимостью разработки методик повышения геометрических и механических свойств тонкостенных элементов габаритных конструкций, получаемых методом КЛП.

В **Главе 1** приведены особенности технологического процесса КЛП относительно других методов производства машиностроительных изделий, включая аддитивные технологии. Выделены ключевые проблемы КЛП, препятствующие расширению его применения и актуальные направления мировых научных исследований.

Хотя задачи выращивания крупногабаритных изделий методом КЛП успешно решаются, высокоточная наплавка на них тонкостенных элементов со сложной геометрией вызывает затруднения, что связано с резким переходом тепловых условий выращивания в области основание –

стенка и неравномерным накоплением тепла. Показано что большинство работ, посвящённых технологическим аспектам КЛП, направлено на исследование одиночных валиков, либо оптимизации основных параметров процесса, таких как мощность и скорость перемещения лазерного источника, расход порошка и защитного газа для выращивания объёмного изделия.

Анализ литературных источников позволил определить, что ключевое влияние на геометрию и состояние поверхности, а также прочностные характеристики оказывают размер и динамика ванны расплава, которые в значительной мере определяются мощностью, но при этом сильно зависят от количества наносимых слоёв. Повышение прочности выращиваемых изделий достигается благодаря: измельчению зерна, равномерной геометрии и малой шероховатости. Размер и форма зерна зависят от: градиента температур, скорости охлаждения и скорости кристаллизации. Скорость охлаждения в значительной мере определяется формой ванны расплава. Форма ванны расплава зависит от скорости сканирования и количества проходов.

При этом среди литературных источников наблюдаются противоречия касающиеся влияния параметров процесса на размер ванны расплава при выращивании многослойной тонкой стенки, которые могут быть разрешены использованием согласованного с экспериментом численного моделирования.

В **Главе 2** приведены сведения об использованном порошковом материале, технологическом и исследовательском оборудовании, методиках исследований.

В работе использовался сферический порошок нержавеющей стали AISI 316L (аналог 03X16H15M3) с преобладающей фракцией от 53 до 150 мкм следующего химического состава: железо – основа, 16.967 % Cr, 12.897 % Ni, 2.543% Mo, 1.638% Mn и 0.785% других элементов по массе.

Исследования проводилось на установке «КЛП-400» производства МГТУ им. Н.Э. Баумана на базе волоконного лазера с длиной волны 1,07 мкм и максимальной мощностью 3 кВт.

Для пробоподготовки были использованы: станок для механической резки, установка для запрессовки и шлифовально-полировальный станок. Для металлографических исследований применялись стереомикроскоп Olympus SZ61 и инвертирующий металлографический микроскоп Olympus GX51, измерения твердости проводились на поверенном твердомере Викаерса EmcoTest Durascan 20 при нагрузке на инденторе 100 граммов, электронная микроскопия проводилась на микроскопе Phenom Pharos, трехмерное сканирование – с использованием компьютерного томографа GE PHOENIX V. Измерения шероховатости – с помощью профилометра Taylor Hobson Surtronic S-100. Для испытаний полученных образцов на растяжение по ГОСТ 1497-84 использовалась машина

Galdabini Quasar 50. Математическое моделирование процесса КЛП производилось с использованием программной среды Comsol.

В **Главе 3** проведена оптимизация режимов выращивания тонких стенок для выбора наиболее значимого параметра для дальнейших исследований, описана разработанная математическая модель выращивания тонкой стенки методом КЛП и выведенные на её основе законы по снижению мощности лазерного излучения, необходимые для стабилизации термических циклов от слоя к слою и, следовательно, толщины и формы получаемых стенок.

Для определения области оптимальных параметров режима процесса и установления степени зависимости геометрических характеристик тонкостенных конструкций от основных параметров, среди которых мощность, скорость и расход порошка на основе полнофакторного эксперимента были составлены регрессионные уравнения, которые описывали зависимость высоты формируемого валика, площади его поперечного сечения, глубины проплавления, коэффициента использования порошка и ширины последнего валика от мощности лазерного излучения, расхода порошка и скорости наплавки.

Анализ регрессионных уравнений позволил установить оптимальные диапазоны режимов выращивания. Также было показано, что толщины и формы получаемых тонких стенок наиболее чувствительны к варьированию мощности лазерного излучения. Этот параметр был выбран как основной для дальнейших исследований.

Для проведения процесса моделирования построена трёхмерная конечноэлементная модель выращенной тонкой стенки и определена траектория движения лазерной технологической головки в процессе КЛП. Тонкая стенка формировалась за счёт нанесения валиков (шириной 2 мм длиной 40,0 мм и высотой 0,3 мм) из стали 316L в десять слоев. В качестве подложки выбрана плоская металлическая пластина из стали AISI 4340 размером 60×10×5 мм.

Модель позволяет описывать нагрев материала и передачу теплоты в нижележащие слои, содержит движущуюся границу металл-атмосфера, расположенную перед тепловым источником и реализованную изменением теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности материала.

Для упрощения численного моделирования КЛП был принят ряд допущений, среди которых: лазерный луч принимался как гауссов поверхностный источник тепла, коэффициенты теплообмена не зависели от температуры, фазовый переход порошка на границе жидкость-твёрдое тело осуществлялся за счет изменения теплопроводности, теплоемкости и плотности материала.

Моделирование температурного поля при КЛП осуществлялось выбором эффективности теплопередачи в данном конечном элементе и настройкой параметров источника теплоты, конвективного и излучающего

тепловых потоков. В процессе КЛП теплопроводность является основным способом отвода тепла

Моделирование базировалось на рассмотрении уравнения теплового равновесия для трехмерной теплопередачи в материале с изотропными тепловыми свойствами при начальном равномерном распределении температуры по всему слою порошка. Процесс КЛП включал в себя 10 слоёв стенки шириной 1 мм и протяжённостью 40 мм со скоростью  $V = 900$  мм/мин при мощности лазера  $P = 800$  Вт.

На Рис 1 показаны распределения температуры по площади ванны расплава во время прохождения лазерного луча через середину первого и десятого слоёв. Штриховой линией обозначен контур границы плавления. Граница ванны расплава имели форму вытянутого эллипса, симметричного относительно направления перемещения лазерного луча, которое обозначено красной стрелкой.

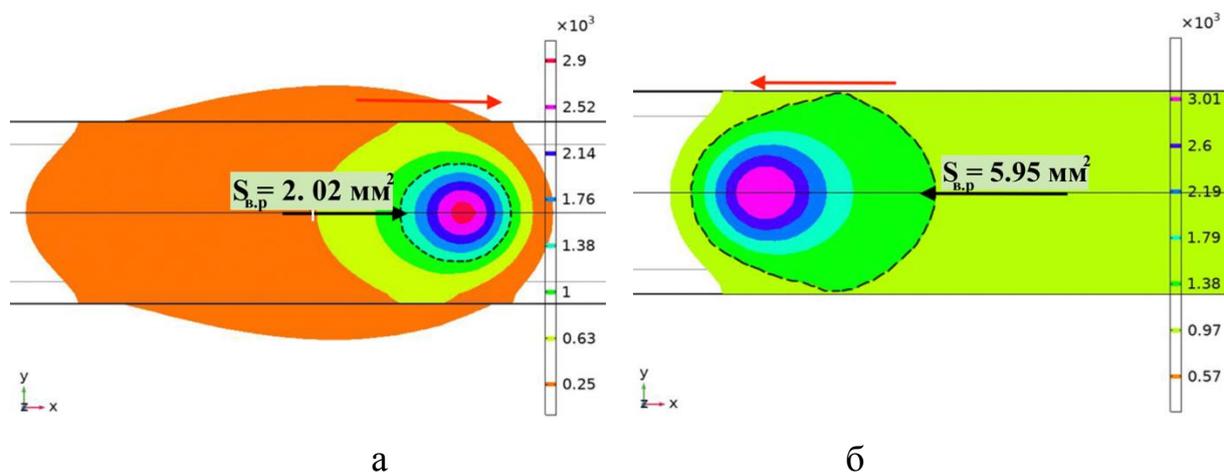


Рис 1. Распределения температуры по площади ванны расплава в первом (а) и десятом (б) слоях

Моделирование показало постепенное увеличение площади ванны расплава от  $2,02$  до  $5,95 \text{ мм}^2$  и максимальной температуры от  $3380$  до  $3750 \text{ К}$ . В последних слоях накопление тепла стабилизировалось, т.к. с увеличением количества слоев объем ванны расплава переставал расти. При моделировании также варьировалась мощность лазерного излучения. Значения максимальной температуры ванны расплава показаны на Рис 2, а.

В дополнение к более высоким максимальным температурам при увеличении количества слоёв возникали более высокие градиенты температур и большие объёмы ванны расплава. Это приводило к искажению формы валика из-за усиления влияния эффекта Марангони. Зависимость объёма ванны расплава от режимов выращивания, полученная по результатам численного моделирования показана на Рис 2, б (время выращивания каждого слоя –  $2,5 \text{ с}$ ).

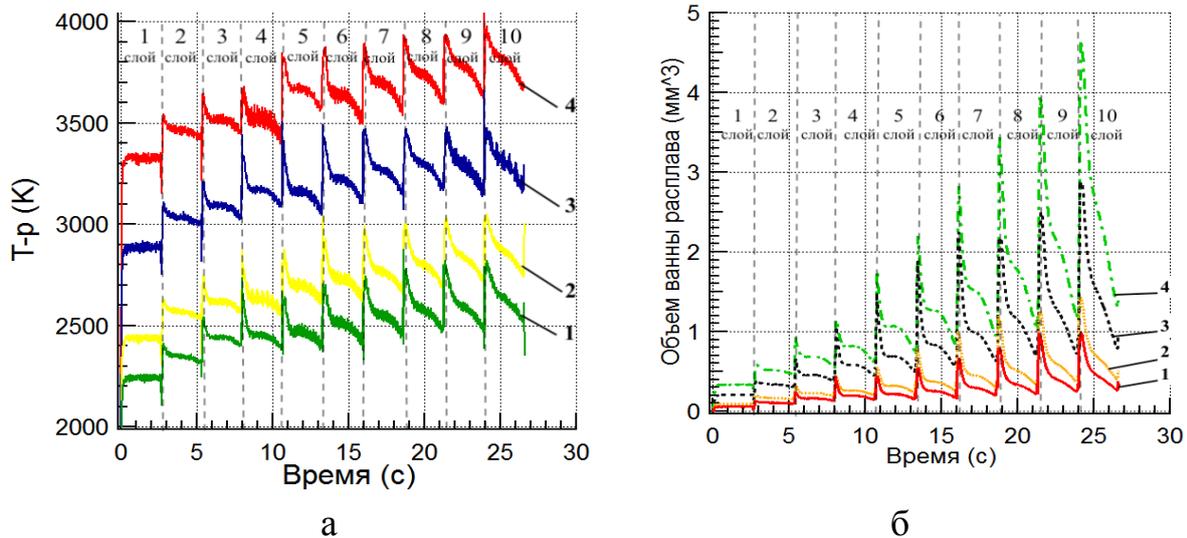


Рис 2. Зависимость максимальной температуры (а) и объёма ванны расплава (б) во время процесса КЛП от мощности лазерного излучения: (1 – 490 Вт, 2 – 550 Вт, 3 – 675 Вт, 4 – 800 Вт)

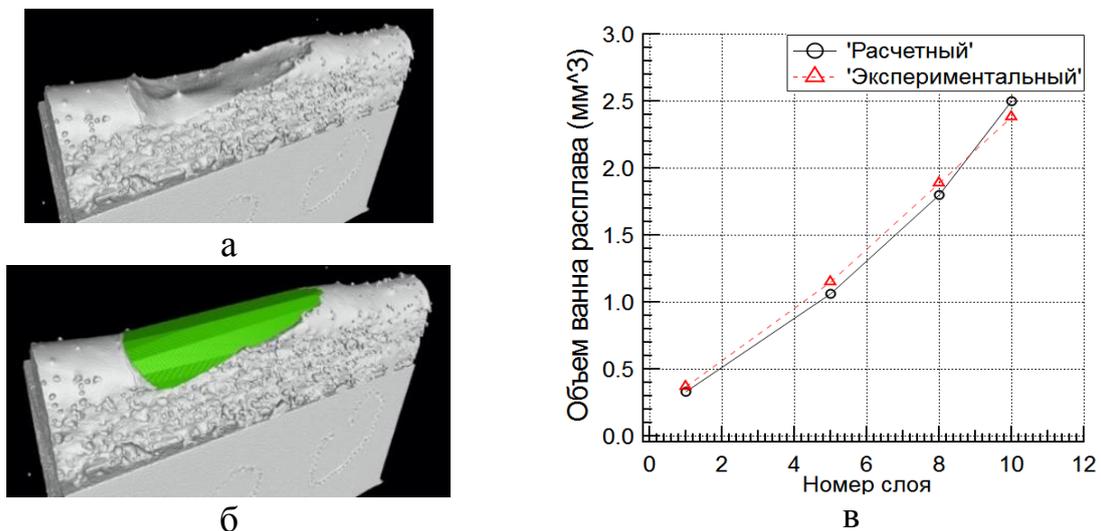


Рис 3. Результат компьютерной томографии выбитой ванны жидкого металла (а), восстановленный объём ванны (б) и сравнение объёмов ванны расплава, полученных расчётным и экспериментальным способами (в)

Экспериментальное измерение объёма и формы ванны расплава при разных режимах выращивания было проведено с использованием разработанной на кафедре МТ12 методики, основанной на механическом выбивании жидкого металла с помощью специального устройства в процессе выращивания. Полученные образцы после этого исследовались на рентгеновском томографе (Рис 3 а, б). Сравнение результатов измерения экспериментальных образцов с результатами моделирования показало высокую сходимость со средней ошибкой 8,37 % (Рис 3 в).

Увеличение площади поверхности и объёма ванны расплава напрямую влияет на количество поглощенного ей порошка и, следовательно, на толщину стенки. Для подтверждения этого была проведена серия экспериментов, в которых выращивались тонкие стенки в

условиях, совпадающих с теоретической моделью, после чего измерены толщины стенок в разных сечениях для разных уровней мощности. Полученная зависимость (Рис 4) показывает резкий рост и постепенную стабилизацию толщин стенок, что согласуется с результатами расчетов по теоретической модели.

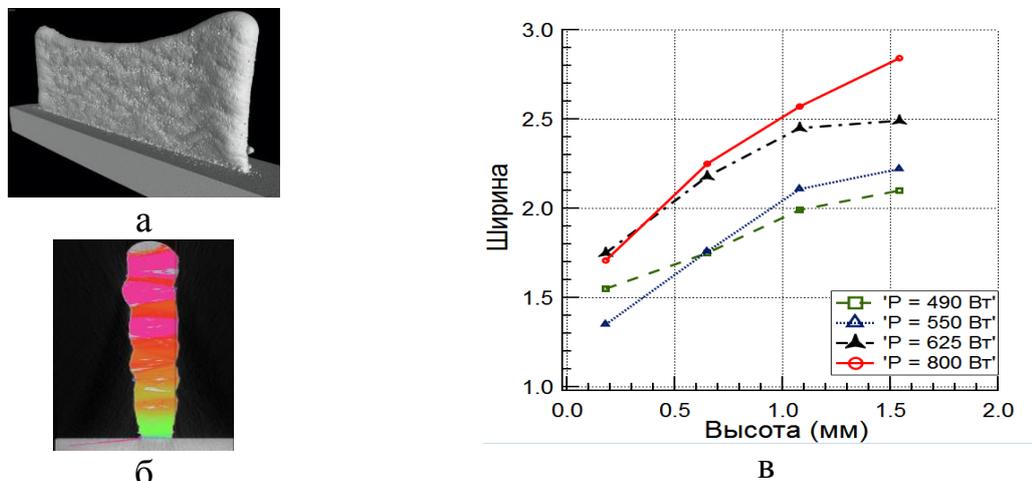


Рис 4. Общий вид (а) и поперечное сечение (б) выращенных линейных образцов без варьирования мощности, зависимость толщины стенки от её высоты для разных уровней мощности лазерного излучения (в)

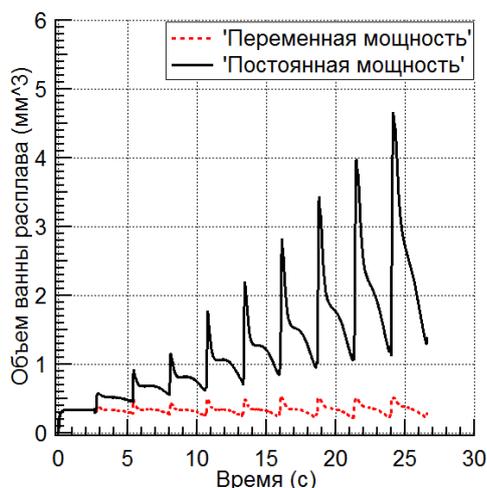


Рис 5. Изменения объёмов ванны расплава в процессе выращивания тонкой стенки при постоянной (черная сплошная линия) и переменной (красная пунктирная линия) мощности лазерного излучения

При помощи численного моделирования были подобраны режимы, позволяющие стабилизировать объём ванны расплава от слоя к слою для мощности 800 Вт (Рис 5). Кроме того, наблюдалось снижение колебаний максимальной температуры, а также риска повторного переплавления предыдущих слоёв.

Проведённые исследования позволили разработать закон уменьшения количества вводимого тепла для каждого нового слоя:

$$P(n) = 517 + 364.44 * \exp(-0.25 * n) \quad (1)$$

где  $P$  – мощность лазера, а  $n$  – номер слоя.

Помимо прямолинейных тонких стенок, был исследован процесс выращивания криволинейной геометрии на примере цилиндрической геометрии разных радиусов. Было отмечено, что с увеличением радиуса кривизны максимальная температура и площадь ванны расплава существенно уменьшаются. Установлено, что начиная с определенного радиуса объем ванны расплава перестает расти на всем промежутке времени. Фиксируя значение необходимого объема ванны (было взято значение  $0,33 \text{ мм}^3$ ) расплава была рассчитана зависимость мощности от радиуса кривизны траектории наплавки. Такая зависимость описывается уравнением:

$$P(r) = 800 - 87.34/r \quad (2)$$

где  $P$  – мощность лазера, а  $r$  – радиус слоя.

Модели, описываемые уравнениями (1) и (2), были объединены в общую модель изменения требуемой погонной мощности при увеличении количества слоёв и радиуса криволинейного участка геометрии. Данная модель описывается уравнением (3):

$$P(n, r) = ((517) + (364,44 \cdot e^{-0,25 \cdot n})) - \frac{87,34 \cdot Eff(n, r)}{r} \quad (3)$$

где  $n$  – номер слоя,  $r$  – радиус кривизны геометрии,  $Eff(n, r)$  – модулирующая функция, принимающая значения от 0 до 1.

Для оценки эффективности выведенных математических моделей была выращена серия образцов тонких стенок с послойным варьированием мощности и без него. На образце, выращенном при постоянной мощности лазера, равной 800 Вт наблюдалась выраженная неравномерность высоты и толщины в центре и по краям образца. Кроме того, в связи увеличением глубины проплавления и уширением ванны расплава, его общая высота была ниже по сравнению с высотой образца, полученного на переменной мощности.

Аналогично была выращена серия тонкостенных образцов с цилиндрической геометрией. Без варьирования мощности на малых радиусах цилиндров наблюдались серьезные нарушения формы, а на радиусах менее 5 мм – заплавление цилиндра. Предложенная модель варьирования мощности позволила избежать этих проблем. Внешний вид и поперечное сечение образцов показаны на Рис 6, а – г. Анализ отклонений формы цилиндров показал, что варьирование мощности приводит к снижению разброса отклонений от средней плоскости в приблизительно 2 раза (Рис 6, д).

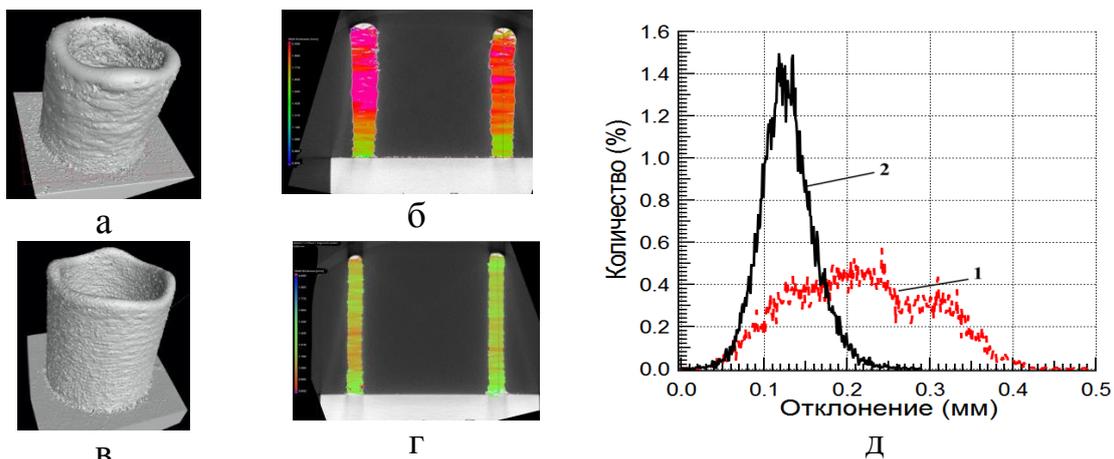


Рис 6. Общий вид (а) и сечение (б) цилиндрического образца радиусом 6 мм, выращенного без варьирования мощности, общий вид (в) и сечение (г) образцов, выращенных с переменной мощностью, а также графики отклонений от средней поверхности (д) для постоянной и переменной мощности: 1 – постоянная мощность, 2 – переменная мощность

Аналогично была выращена серия тонкостенных образцов с цилиндрической геометрией. Без варьирования мощности на малых радиусах цилиндров наблюдались серьёзные нарушения формы, а на радиусах менее 5 мм – заплывание цилиндра. Предложенная модель варьирования мощности позволила избежать этих проблем. Внешний вид и поперечное сечение образцов показаны на Рис 6, а – г. Анализ отклонений формы цилиндров показал, что варьирование мощности приводит к снижению разброса отклонений от средней плоскости в приблизительно 2 раза (Рис 6, д).

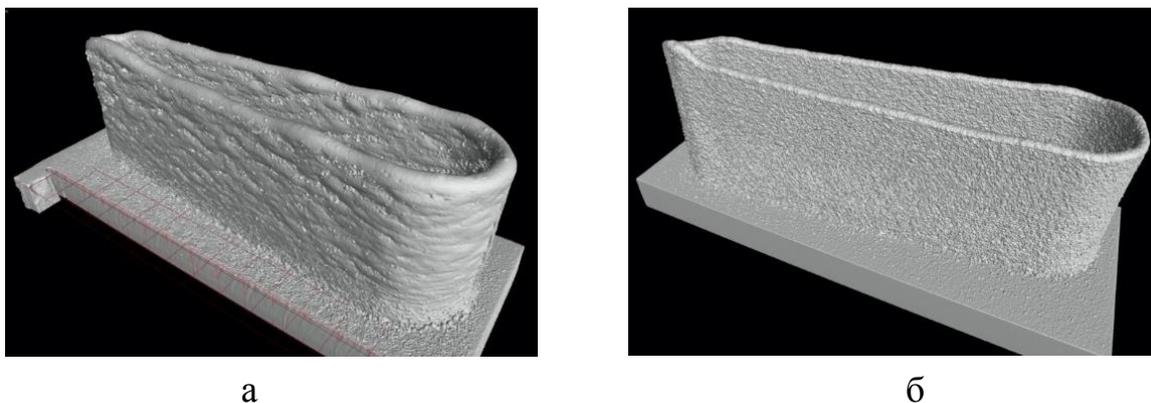


Рис 7. Внешний вид элемента тонкостенной геометрии лопатки выращенной без варьирования мощности (а); с варьированием(б)

Полученные результаты были использованы при выращивании элемента из 60-ти слоёв тонкостенной лопатки. Внешний вид лопатки с варьированием мощности и без показан на Рис 7. Удалось добиться равномерной толщины стенки по всей детали вне зависимости от криволинейности геометрии. Разброс отклонений формы стенки лопатки от средней плоскости также существенно был снижен от 1,5 до 2,0 раз в зависимости от зоны проведения измерений.

В Главе 4 приведены результаты исследований по повышению механических свойств тонкостенных элементов, полученных методом КЛП для использованной в работе нержавеющей стали, для чего предложено использовать переплавление каждого слоя без подачи порошка

Для данных свойств материала решающее влияние на механические свойства оказывает его конечная микроструктура. Температурный градиент ( $G$ ) и скорость роста затвердевания ( $R$ ) являются параметрами, которые определяют окончательную микроструктуру. По мере увеличения скорости охлаждения, которая является продуктом  $G$  и  $R$ , формируются более мелкие микроструктуры, что положительно влияет на механические свойства. Отношение  $G/R$  является наиболее важным фактором в формировании конкретной морфологии микроструктуры, тогда как произведение  $G \times R$  определяет её средний размер.

Проведённые исследования показали, что при выращивании тонких стенок из порошка 316L образуется крайне неоднородная структура. В нижней части формируется направленная столбчатая, а в верхней – разориентированная дендритная или полиэдрическая.

Тип и дисперсность структуры зависит от химического состава материала, а также от соотношения градиента температуры у межфазной поверхности ( $G$ ) и скорости роста твердой фазы ( $R$ ). Эти параметры в свою очередь зависят от режимов лазерной обработки, что открывает возможности управления структурой с целью достижения высоких механических и служебных свойств.

В данной работе для получения равномерной мелкозернистой микроструктуры в объеме тонкой стенки был опробован повторный переплав наплавленного слоя без подачи порошка.

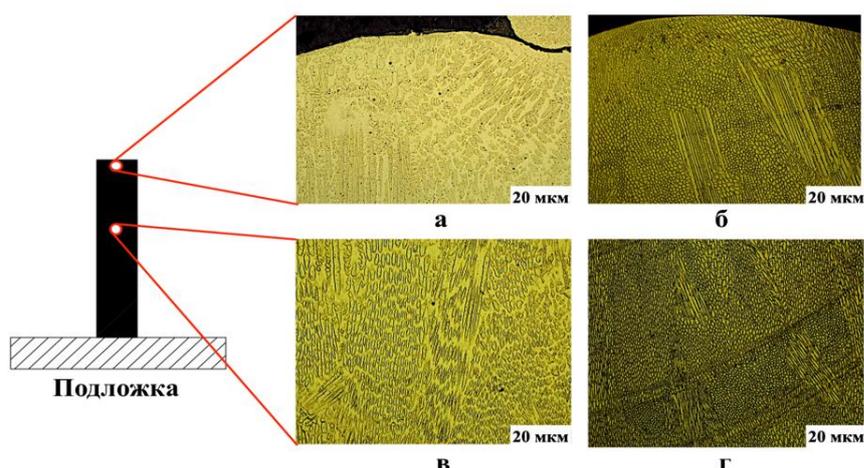


Рис 8. Микроструктура верхней части тонкой стенки без переплавления (а); верхней части тонкой стенки с переплавлением (б); средней части тонкой стенки без переплавления (в); средней части тонкой стенки с переплавлением (г)

На Рис 8 показаны микроструктуры типичных образцов без переплавления (а, в) и с переплавлением (б, г), полученные в верхней части стенки (а, б) и в средней (в, г). Микроструктура образцов без переплавления характеризуется сильным разбросом по размерам и форме зёрен как в верхней, так и в центральной части стенки, а в образцах с переплавлением она однородная и мелкозернистая ячеистого типа по всей площади стенки.

Измерения в поперечном срезе тонких стенок показали увеличение микротвёрдости переплавленных образцов на уровень до 15 % относительно образцов без переплавления. Это объясняется с одной стороны измельчением микроструктуры, с другой – снижением пористости после переплавления.

Для контроля конечных механических свойств выращенных стенок были проведены испытания на растяжение. Была подготовлена серия образцов тонких стенок без переплавления и с переплавлением на разных уровнях лазерной мощности: от 50 до 100 % от режима выращивания. Были измерены: предел прочности при растяжении ( $\sigma_B$ ), удлинение ( $\epsilon$ ) и предел текучести ( $\sigma_T$ ). Для образцов с мощностью переплавления 50 и 75 % от режима выращивания наблюдалось увеличение  $\sigma_B$  на уровень от 18 до 20 %,  $\sigma_T$  на уровень от 32 до 47 %,  $\epsilon$  – от 18 до 48 %. Тогда как переплавление с мощностью 100 % от режима выращивания показало незначительное увеличение  $\sigma_B$  и  $\sigma_T$  и снижение пластичности. Полученные диаграммы растяжения представлены на Рис 9.

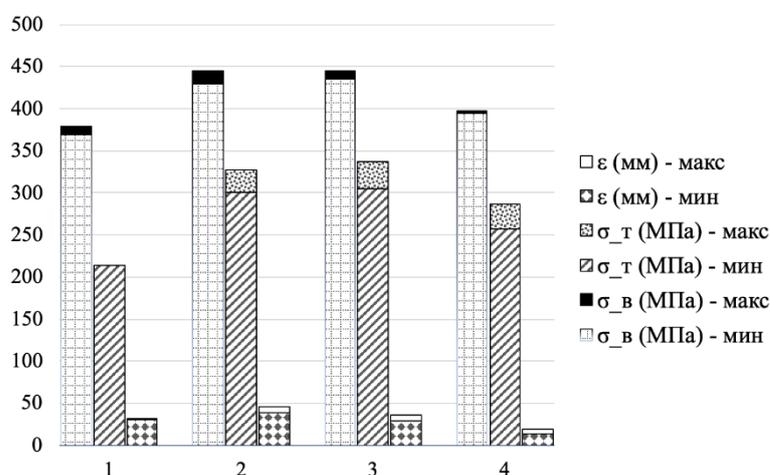


Рис 9. Механические свойства стенок, выращенных с различными режимами переплавления

1 – Без переплавления; 2 – Мощность переплавления 340 Вт; 3 – Мощность переплавления 550 Вт 4 – Мощность переплавления 800 Вт

Переплавление реиницирует образование ванны расплава уже выращенной геометрии, что позволило добиться улучшений и в геометрической точности полученных тонких стенок. Процесс переплавления в данном случае действует как технология лазерной полировки, где за счёт поверхностного натяжения расплава уменьшается

конечная шероховатость. Кроме того, устраняются нерасплавленные частицы порошка и снижается неровность боковой поверхности.

На Рис 10 показаны трехмерные профили образцов тонкостенных конструкций, изготовленных методом КЛП. Все образцы состояли из 60 слоев, образованных единичными валиками длиной 40 мм. Перед дополнительным переплавом каждого слоя выдерживалась 5 секундная пауза, чтобы ссыпался остаточный порошок из головы. В дополнение, это позволило снизить температурные градиенты и краевые эффекты. Внешний вид боковой поверхности показан на Рис 10, где заметно улучшение профиля боковой поверхности.

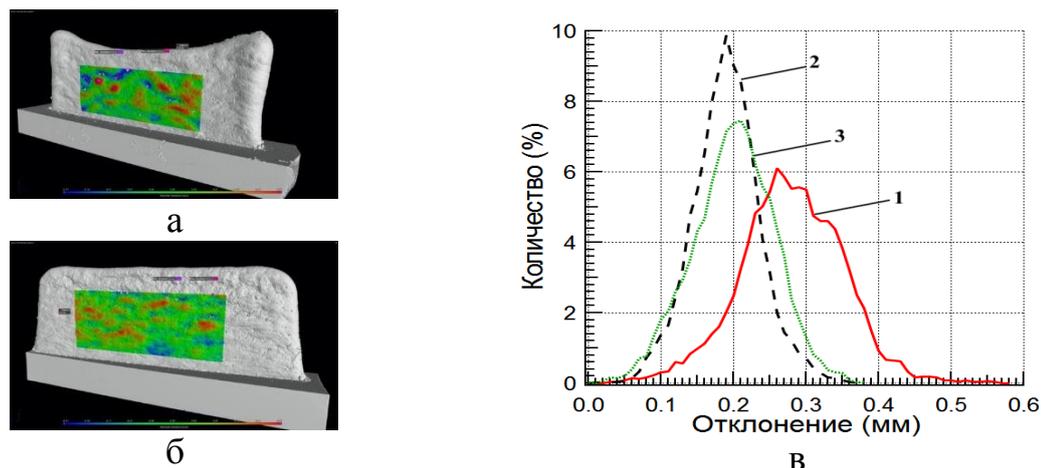


Рис 10. Внешний вид выращенных тонких стенок без переплавления (а); с переплавлением (б); а также графики отклонения формы от средней линии (в) для разных мощностей излучения при переплавлении: 1 – без переплавления, 2 – Мощность переплавления 550 Вт, 3 – Мощность переплавления 800 Вт

При помощи анализа данных компьютерной томографии стенок было рассчитано среднее отклонение профиля от прилегающей плоскости для стенок с переплавлением и без. На Рис 10 показаны разбросы отклонений профиля для стенок выращенных без переплавления и с переплавлением на разных уровнях мощности. Видно, что при уровнях мощности лазерного излучения от 50 до 75 % от режима выращивания достигается значительное улучшение качества боковой стенки.

По итогам выполненных работ были разработаны технологические рекомендации по проведению процесса выращивания тонкостенных элементов конструкций методом коаксиального лазерного плавления.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ:**

1) Для оптимизации режимов выращивания получены уравнения регрессии, связывающие глубину, высоту, ширину и площадь валика в последнем слое и коэффициент использования порошка с мощностью излучения, скоростью обработки и массовым расходом порошка.

2) С использованием метода конечных элементов разработана трёхмерная модель выращивания тонкой стенки для определения

траектории движения лазерной технологической головки в процессе КЛП, позволяющая рассчитывать нагрев материала и передачу тепла в нижележащие слои.

3) Методом выбивания ванны расплава показано согласование разработанной математической модели с экспериментальными результатами.

4) На основании теоретического и экспериментального исследований установлена зависимость толщины тонкой стенки от количества наплавленных слоёв, согласно которой толщина стенки возрастает не менее, чем на 65 % относительно начального слоя и выравнивается на 20-м слое. На основании данной зависимости предложена модель расчёта начальных параметров режима для выравнивания толщины стенки.

5) Определены условия формирования краевого дефекта, заключающегося в значительном увеличении толщины и высоты нанесенных слоев на краях стенки при выращивании, и предложены методы борьбы с ним регулированием погонной мощности и дополнительного оплавления слоя.

6) Получены уравнения, связывающие мощность лазерного излучения, необходимую для поддержания постоянного объёма ванны расплава при выращивании тонкой стенки, замкнутой круговой геометрии и сложной криволинейной геометрии, с количеством нанесенных слоев.

7) Использование полученных законов управления мощностью лазерного излучения позволило стабилизировать толщину валика при выращивании тонкостенных деталей сложной формы с отклонением толщины стенок не более, чем на 10 % и снизить более чем в 2 раза их шероховатость

8) Предложена схема выращивания тонких стенок с дополнительным переплавлением каждого слоя без подачи порошка на мощности, составляющей 60% от основного режима обработки, что повысило качество боковой поверхности, исключило формирование краевого дефекта на верхнем торце стенок и привело к увеличению предела прочности на 20 %, а пластичности на 45 % за счёт выравнивания микроструктуры по всему объёму стенки.

9) Разработаны технологические рекомендации прямого лазерного выращивания тонкостенной геометрии сложной формы из стали 316 L с варьированием погонной мощности лазерного излучения от слоя к слою или дополнительным послойным переплавлением.

## РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*а) в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ и входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования:*

1. Регрессионные модели показателей технологического процесса послойного выращивания изделия из порошка стали 316L методом коаксиального лазерного плавления / З. Мианджи [и др.] //Известия

высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. №. 6 (735). С. 13-22. (0,54 п. л. / 0,14 п. л.).

2. Мианджи З., Холопов А. А. Численное и экспериментальное исследования тепловых процессов при выращивании тонкостенных деталей методом коаксиального лазерного плавления металла из нержавеющей стали 316L //Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. №. 7 (736). С. 19-29. (0,64 п. л. / 0,32 п. л.).

3. Numerical simulation of thermal behavior and experimental investigation of thin walls during direct metal deposition of 316L stainless steel powder / Z. Mianji [et al.] //Lasers in Manufacturing and Materials Processing. 2021. Т. 8. №. 4. С. 426-442. (0,67 п. л. / 0,17 п. л.).

4. Особенности получения тонкостенных структур из нержавеющей стали методом коаксиального лазерного плавления / З. Мианджи [и др.] // Сварочное производство. 2021. № 9. С. 38-43. (0,327 п. л. / 0,08 п. л.).

5. Мианджи З., Холопов А. А., Бинков И. И. Экспериментальное и численное исследование теплообмена при выращивании тонкостенных деталей методом коаксиального лазерного плавления// Научноёмкие технологии. 2022. № 4. С. 25-33. (0,65 п. л. / 0,22 п. л.).

*б) в других изданиях:*

6. Повышение качества поверхности тонкостенных деталей, изготовленных методом КЛП / З. Мианджи [и др.] //Всероссийская школа-конференция с международным участием «Аддитивные технологии в цифровом производстве: металлы, сплавы, композиты». 2019. С.19-20. (0,07 п. л. / 0,02 п. л.).

7. Особенности получения тонкостенных структур из нержавеющей стали методом коаксиального лазерного плавления / З. Мианджи [и др.] //Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. 2020. С. 350-357. (0,3 п. л. / 0,07 п. л.).

8. Анализ влияния параметров на формирование последних валиков тонкостенных структур из порошка стали 316L методом коаксиального лазерного плавления / З. Мианджи [и др.] //Будущее машиностроения России. 2020. С. 256-260. (0,14 п. л. / 0,04 п. л.).

9. Мианджи З., Холопов А. А. Численное и экспериментальное исследование тепловых процессов при выращивании тонкостенных деталей// XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. Сборник тезисов. 2021 С. 429-431. (0,11 п. л. / 0,05 п. л.).

10. Регрессионные модели показателей технологического процесса послойного выращивания изделия / З. Мианджи [и др.] // XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. Сборник тезисов. 2021. С. 431-433. (0,08 п. л. / 0,02 п. л.).