

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого  
Институт Машиностроения, Материалов и Транспорта  
Высшая школа физики и технологии материалов

на правах рукописи

Научный доклад

об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы  
(диссертации)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫСОКОСКОРОТНОГО ПРЯМОГО  
ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

по основной образовательной программе подготовки научно-педагогических  
кадров в аспирантуре

Направление подготовки 15.06.01 Машиностроение

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

Станкевич Станислав Леонидович

Научный руководитель

д-р тех. наук, профессор

\_\_\_\_\_ Г.А. Туричин

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Автор работы

аспирант

\_\_\_\_\_ С.Л. Станкевич

Санкт-Петербург

2020 г.

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Задача о нагреве материала лазерным излучением .....	7
Глава 2. Анализ и моделирование динамики газопорошковой струи .....	15
Глава 3. Влияние гидродинамических сил на формирование геометрии направляемого валика.....	19
Глава 4. Стабильность процесса выращивания, зона самостабилизации .....	22
Заключение .....	24
Список работ, опубликованных по теме диссертации .....	25

## **Введение**

**Актуальность исследования.** В настоящее время аддитивное производство заняло свою нишу в технологиях обработки материалов. Из наиболее популярных аддитивных технологий наибольший интерес вызывает процесс прямого лазерного выращивания. Технология нашла свое место в создании крупногабаритных изделий авиапромышленности (Vildanov AM, Babkin KD, Zemlyakov EV, Gushchina MO. The effects of beam oscillation on the quality of laser deposited metal parts. In *Journal of Physics: Conference Series* 2018 Nov (Vol. 1109, No. 1, p. 012059). IOP Publishing. DOI: 10.1088/1742-6596/1109/1/012059), гребных винтов и водомётных движителей, крупногабаритных кронштейнов и деталей машин, сосудов высокого давления и подобных деталей.

Суть технологии прямого лазерного выращивания заключается в формировании изделия из металлического порошка. Порошок подается в зону роста газопорошковой струей совместно со сфокусированным лазерным излучением при контролируемом процессе нагрева и плавления порошка и подложки.

Процесс прямого лазерного выращивания обладает высокой производительностью по сравнению с другими аддитивными технологиями и может достигать до 2 кг/ч и более (Turichin G. A. et al. High-speed direct laser deposition: technology, equipment and materials // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Current Problems and Solutions*. – 2016. – Т. 125. – №. 012009). Высокая производительность требует высоких мощностей лазерного излучения и скорости плавления, а также соответствующий расход металлического порошка. Совокупное повышение параметров мощности и расхода модельного материала может привести к появлению неустойчивости процесса (Turichin G. et al. Hydrodynamic instability in high-speed direct laser deposition for additive manufacturing // *Physics Procedia*. – 2016. – Т. 83. – С. 674-683).

Известно, что параметры скорости подачи порошка, мощности лазерного излучения, скорости перемещения рабочего инструмента

относительно изделия и стратегия лазерного сканирования влияют на термические циклы в изделии и как следствие на микроструктуру, остаточное напряжение итд (Turichin G. et al. Analysis of distortion during laser metal deposition of large parts //Procedia CIRP. – 2018. – Т. 74. – С. 154-157). Повторные циклы нагрева и локальный теплообмен в зоне термического нагрева может привести к повторному переплавлению ранее нанесенных слоев или изменению микроструктуры.

Создание физически адекватной модели поможет лучше понимать влияние технологических параметров на протекание процесса прямого лазерного выращивания, а также появляется возможность рассчитать изменение геометрических и микроструктурных характеристик выращиваемого изделия при изменении технологических параметров. Подобные расчеты могут быть востребованы технологическими специалистами при подготовке технологической карты выращиваемого изделия.

**Степень изученности темы.** Моделирование процесса прямого лазерного выращивания является актуальной и востребованной темой для научных изысканий исследователей из различных стран. Чаще всего авторы рассматривают один или несколько физических процессов, возникающих в процессе ПЛВ, что не дает полной физической картины процесса. Однако с каждым годом число публикаций по теме увеличивается, также, как и количество и качество рассматриваемых физических процессов. В качестве основного инструмента для анализа физических уравнений используются численные методы, такие как метод конечных элементов. Следует отметить, что разница между подходами авторов заключается не только в используемых методах, в основном численных, но и в способах описания физических процессов и учета взаимного влияния их друг на друга и на конечный результат в целом.

**Цель работы.** Создание физически адекватного описания процесса прямого лазерного выращивания и последующей разработки системы инженерного

анализа технологического процесса для поддержки технологической подготовки производства

**Задачи.** Достижение поставленной в работе цели предполагает решение следующих задач:

- Разработать и экспериментально проверить модель процесса теплопереноса материала при воздействии лазерного излучения;
- Разработать и экспериментально проверить модель поведения газопорошковой струи в зоне действия лазерного излучения при встрече с поверхностью мишени, а также определить коэффициент использования материала в зависимости от параметров газопорошковой струи и ванны расплава;
- Разработать и экспериментально проверить модель формирования геометрии наплавляемого валика;
- Установить критерий стабильности процесса прямого лазерного выращивания;

**Научная новизна результатов исследований.** Иной подход в составлении математической модели процесса является главным отличием от ранее выполненных исследований в этом направлении. Данная работа описывает элементы математической модели процесса прямого лазерного выращивания, разработанной преимущественно на аналитических решениях сложных физических процессов с целью уменьшения необходимых расчетных ресурсов, тем самым быстрого решения задач, для получения результатов без существенной потери в точности. Под элементами математической модели понимаются расчетные элементы модели, описывающие такие физические процессы, как: нагрев и охлаждение мишени и газопорошковой струи, газодинамика газопорошковой струи, гидродинамика внутри ванны расплава и прочие.

**Теоретическая и практическая значимости работы.** Выполненные исследования и полученные результаты дают представления о динамике температурных полей и геометрии формируемых слоев в процессе прямого

лазерного выращивания. Полученная математическая модель используется для первичного подбора технологических параметров режима.

**Методология и методы исследования.** Сам по себе процесс прямого лазерного выращивания включает в себя множество взаимосвязанных физических процессов. В качестве метода исследования был использован метод декомпозиции на отдельные физические процессы. Иницирующим является процесс нагрева материала лазерным излучением, поэтому именно с него и началось построение модели прямого лазерного выращивания. Результаты модели теплопереноса являются входными параметрами для моделей гидродинамики, газодинамики и параметров стабильности процесса. Ключевыми параметрами модели является мощность лазерного излучения, массовый расход порошка, коэффициент использования материала, скорость перемещения рабочего инструмента и теплофизические свойства материала.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Разработана модель процесса теплопереноса материала при воздействии лазерного излучения.
2. Разработана модель поведения газопорошковой струи в зоне действия лазерного излучения при встрече с поверхностью мишени, а также построен алгоритм вычисления коэффициента использования материала в зависимости от параметров газопорошковой струи и ванны расплава.
3. Разработана модель формирования геометрии наплавляемого валика.
4. Проведена экспериментальная проверка разработанных моделей, после чего сделан вывод о возможности их применения для анализа процесса прямого лазерного выращивания.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Основные положения диссертационного исследования были изложены и обсуждены в рамках работы пяти международных конференций. Основные результаты опубликованы в семи научных статьях, рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для публикации результатов

исследований на соискание учёной степени кандидата наук. Произведена проверка теоретических изысканий на реальных технологических процессах.

## Глава 1. Задача о нагреве материала лазерным излучением

В современных технологических установках, направленных на изготовление изделий методом прямого лазерного выращивания в качестве генератора лазерного излучения используются оптоволоконные лазеры. Электрическое поле и излучение пучка оптоволоконного лазера в поперечном сечении аппроксимируется функцией гаусса и называется гауссовым пучком. Распространение хорошо сфокусированного гауссова пучка в пространстве можно представить в виде однополосного гиперболоида (1.1):

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (1.1)$$

где  $x, y, z$  – пространственные координаты; для лазерного пучка  $a = b = w_0$ ;  $c = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ ;  $w_0$  – радиус горловины пучка;  $\lambda$  – длина волны.

Примем что в поперечном сечении пучок представляет собой круг, и тогда ширина пучка на расстоянии  $z$  от точки фокуса задается следующей формулой:

$$w(z)^2 = w_0^2 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0}\right)^2 \quad (1.2)$$

Исходя из определения гауссова пучка, а именно то, что излучение пучка в поперечном сечении аппроксимируется функцией гаусса, следует что интенсивность излучения в поперечном сечении будет описываться формулой (1.3).

$$I(\vec{\rho}, z) = I_0 \frac{w_0^2}{w(z)^2} \exp\left[-\frac{2\vec{\rho}^2}{w(z)^2}\right] \quad (1.3)$$

где  $w(z)$  – изменение радиуса пучка при удалении от горловины;  $\vec{\rho}$  – радиус-вектор, лежащий в плоскости, перпендикулярной оси распространения излучения;  $z$  – координата на оси распространения излучения с началом координат в горловине пучка.

Уравнение предельного состояния процесса распространения тепла

точечного источника постоянной мощности, движущегося с постоянной скоростью по поверхности полу бесконечного тела, отнесенное к подвижным координатам XYZ, принимает вид (Рыкалин Н. Н. Расчёты тепловых процессов при сварке. – Рипол Классик, 2013):

$$T(R, x) = \frac{q}{2\pi\lambda R} \exp\left(-\frac{Vx}{2a} - \frac{VR}{2a}\right) \quad (1.4)$$

Здесь R – пространственный радиус-вектор в подвижной системе координат, т.е. расстояние рассматриваемой точки A от начала 0 подвижной системы; x – абсцисса точки A в подвижной системе координат.

В случае расфокусированного лазерного излучения тепловой поток представляет собой:

$$q(x, y) = k_{abs} I(x, y, z_0) \quad (1.5)$$

, где  $k_{abs}$  – коэффициент поглощения материалом лазерного излучения; I – интенсивность лазерного излучения;  $z_0$  – уровень подложки относительно фокальной плоскости.

Разобьем зону действия лазерного излучения на подложке на элементарные площадки с длиной и шириной  $dx$  и  $dy$  соответственно. На каждой элементарной площадке действует точечный тепловой источник  $q_i$ . Таким образом:

$$T(x, y, z) = \int_{-r}^r \int_{-r}^r \frac{q(x_i, y_i)}{2\pi\lambda R(x - x_i, y - y_i, z)} \exp\left(-\frac{Vx}{2\chi} - \frac{VR(x - x_i, y - y_i, z)}{2\chi}\right) dx_i dy_i \quad (1.6)$$

Для описания распределение температуры внутри частицы порошка воспользуемся решением задачи о распределении температуры в однородном шаре радиуса R с начальной температурой  $T_0$  для случая, когда внутрь шара через его поверхность подается постоянный поток тепла плотности q (Бицадзе А. В., Калиниченко Д. Ф. Сборник задач по уравнениям математической физики. – 1985, 107). Уравнение теплопроводности для шара в сферических координатах с граничными условиями выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \Delta T, \quad (1.7)$$

где  $\Delta T = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right)$ ,  $0 \leq r \leq R$ ,  $t > 0$ ,  $\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = q$ ;  $T(r, 0) = T_0$

Решение задачи будет определяться выражением:

$$T(r, t) = T_0 + \frac{qR}{\lambda} \left( \frac{3\chi t}{R^2} - \frac{3R^2 - 5r^2}{10R^2} \right) - \frac{2q}{\lambda R r} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin(\mu_i r)}{\mu_i^3 \cos(R\mu_i)} \exp(-\chi \mu_i^2 t) \quad (1.8)$$

где  $\chi$  – коэффициент температуропроводности,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\mu_n$  – положительные корни уравнения  $tg(R\mu) = R\mu$ .

Так как предложенное решение (1.8) актуально для постоянного потока тепла, а расфокусированный лазерный луч представляет собой нормально распределенный тепловой поток, необходимо доработать решение, после чего получаем уравнение (1.9). Распределение температурного поля в частице порошка радиусом 100 мкм после взаимодействия с лазерным излучением представлено на рисунке 1.1.

$$T(r, t) = \sum_{i=1}^{\frac{t}{\Delta t}} \left[ \left( \frac{q(i\Delta t)R}{\lambda} \left( \frac{3i\chi^2 \Delta t}{R^2} - \frac{3R^2 - 5r^2}{10R^2} \right) \right) - \frac{2q(\Delta t)}{\lambda R r} \sum_{j=1}^n \frac{\sin(r\mu_j)}{\mu_j^3 \cos(R\mu_j)} \exp(-\chi^2 \mu_j^2 i\Delta t) \right] + T_0 \quad (1.9)$$

При изготовлении сложного многослойного изделия методом прямого лазерного выращивания необходимо учитывать подогрев подложки/детали от уже сформированных слоев. Для этой цели представим наше изделие составленным из одного слоя и развернутое вдоль образующей, на которую действуют тепловые источники, находящиеся на равном или разном расстоянии, в зависимости от формы выращиваемого изделия.

Таким образом температурное поле на n-ном слое, представляется как температурное поле от распределенного теплового источника, перед которым движутся аналогичные n-1 тепловые источники на расстоянии друг от друга  $\pi D$  в случае цилиндра. Таким образом температура n-ого слоя:

$$T_n(x, y, z) = T_0 + \sum_{i=0}^n T(x + i \cdot \pi \cdot D, y, z) \quad (1.10)$$

Необходимо учесть ограниченность размеров изделия вследствие значительного влияния отраженной от границ тела теплоты на температурное поле. Границы тела в первом приближении будем считать не пропускающими, т.е. считать адиабатическими.

На рисунке 1.2 представлены действительный и фиктивные распределенные источники теплоты. Температура точки А определяется как

сумма температур от трех источников, действующих в полу бесконечном теле. Для более точной оценки можно ввести дополнительный фиктивный источник, чтобы учесть отражение теплоты от нижней границы изделия/подложки.

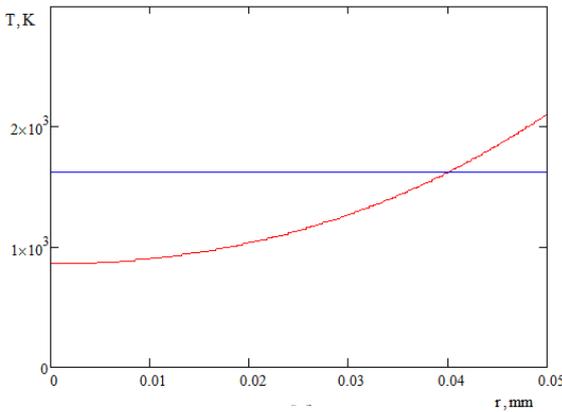


Рисунок 1.1. Изменение температуры частицы порошка от центра к краю (синей линией обозначена температура плавления)

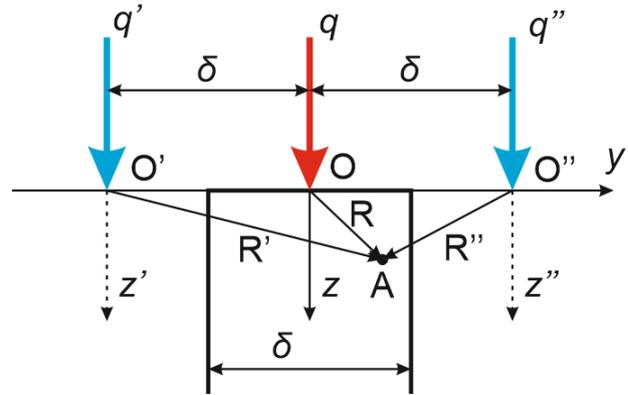


Рисунок 1.2. Схема учета ограниченности размеров

Эксперименты по верификации модели проводились на лабораторной установке с боковой подачей газопорошковой смеси на базе иттербиевого волоконного лазера. В качестве источника лазерного излучения использовался технологический лазер ЛС-5 с лазерной головкой фирмы HIGHYAG модели ВІМО с боковым газопорошковым соплом. Подача порошка осуществлялась с помощью порошкового питателя ERLAS TWIN-10C Powder Feeder. В качестве несущего газа использовался аргон.

Целью эксперимента было получить изображения ванны расплава, для последующего измерения, в процессе прямого лазерного выращивания. На рисунке 1.3 представлена фотография процесса прямого лазерного выращивания с обычной цифровой фотокамеры. Как видно на фото, интересующая область имеет засветку от отраженного лазерного излучения, и ванна расплава не наблюдается.

Поэтому было принято решение воспользоваться высокоскоростной камерой Citius Centurio C100 High Speed. Для получения изображения ванны

расплава с камеры использовался светофильтр с полосой пропускания 800-810 нм и диодный лазер на длине волны 808 нм для подсветки области ванны. Таким образом размеры ванны определялись по изображениям, полученным с высокоскоростной камеры. В качестве модельного материала использовался порошок жаропрочного сплава на основе никеля Inconel 625 с фракцией от 50 до 150 мкм и сферической формой частиц.

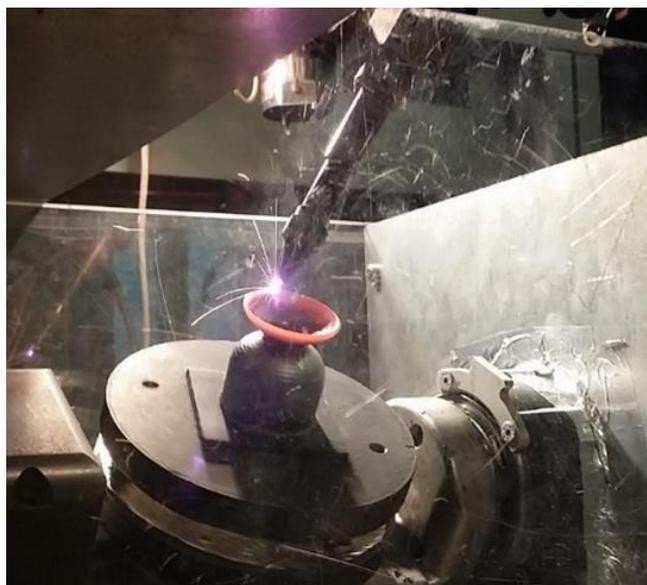


Рисунок 1.3. Процесс прямого лазерного выращивания

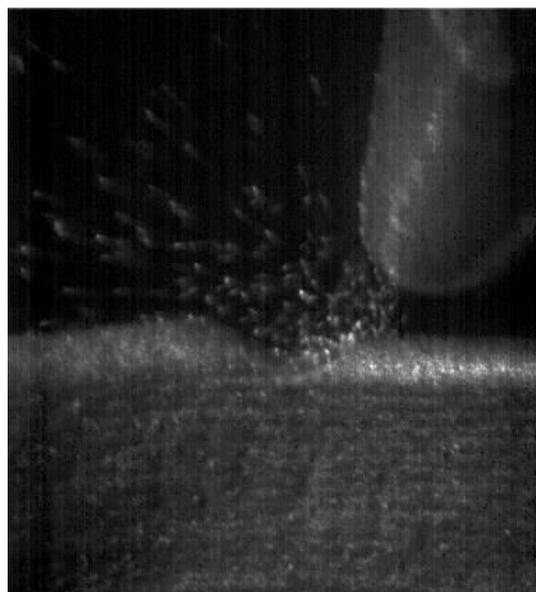


Рисунок 1.4. Изображение, полученные с высокоскоростной камеры в процессе выполнения экспериментов

Изображение, полученное в процессе экспериментов, представлено на рисунке 1.4. На изображениях хорошо видно ванну расплава и кратер, образуемый газопорошковой струей. Так же на рисунках можно наблюдать отскоки не расплавившихся частиц порошка от кристаллизовавшейся поверхности изделия.

При проведении эксперимента использовалось два режима, технологические параметры которых отличаются только в значениях линейной скорости перемещения лазерного луча по поверхности изделия и толщиной получаемой стенки. Таким образом значение скорости для первого режима – 25 мм/сек, толщина стенки - 2,5 мм, а для второго скорость – 20 мм/сек, толщина стенки – 2,6 мм. Значения остальных параметров режимов

одинаковы: форма выращиваемого изделия – цилиндрическая; диаметр пятна на поверхности изделия 2 мм; мощность лазерного излучения 2000 Вт; шаг слоя – 0,4 мм; диаметр выращиваемого цилиндра – 40 мм; расход порошка – 20 г/мин.

С помощью высокоскоростной камеры была получена серия изображений зоны выращивания, по которым была измерена длина ванны расплава. Разница расчетных значений модели по сравнению с экспериментальными не превысила 15%. На основе этого можно сказать, что модель удовлетворительно описывает теплоперенос в процессе прямого лазерного выращивания и может быть использована для оценки распространения тепловых полей в изделии.

Следующим этапом в проверке модели нагрева материала лазерным излучением стало проведение эксперимента по выращиванию образца с многопроходным заполнением слоя и сравнение расчетных и фактических термических циклов в образце.

Эксперимент проводился на установке Trumpf TruLaser Cell 3000, в состав которой входит дисковый лазер с длиной волны 1,064 мкм, вибрационный порошковый питатель Siemens SIMATIC HMI, а качестве транспортирующего газа использовался гелий. В ходе работы для измерения интенсивности теплового излучения выращиваемого образца использовалась инфракрасная камера NIT TACHYON 16k и двух волновой пирометр SENSOTHERM MQ22 для прямого измерения абсолютной температуры.

Эксперимент состоял из 2-х этапов: 1) построение таблицы соответствия между данными интенсивности теплового излучения, регистрируемого инфракрасной камерой и значениями пирометра; 2) Съемка процесса прямого лазерного выращивания инфракрасной камерой и анализ результатов.

Для построения таблицы соответствия интенсивности теплового излучения материала и температуры нагрева измерительными приборами фиксировался цикл нагрева и охлаждения образца. Данные инфракрасной камеры (рисунок 1.5) сопоставлялись с данными пирометра, где точкой

отчета считалась максимальная интенсивность или температура. Регистрация температуры производилось в диапазоне от 500 до 1200 °С. От начальной точки сопоставлялись значения интенсивности и температуры с одинаковым шагом по времени. Эксперимент проводился на образцах из стали 316L и сплава на основе никеля при двух разных коэффициентах усиления сигнала, регистрируемого ИК камерой. Для проверки повторяемости результатов соответствия интенсивности теплового излучения и температуры цикл нагрева и охлаждения повторялся 5 раз для каждого материала и режима инфракрасной камеры.

На рис. 1.6 представлены группы кривых, построенные на основе экспериментальных данных подверженных линейной экстраполяции. Группы кривых 1 и 2 для никелевого сплава при коэффициентах усиления 1.25 и 1.5 соответственно, а группа кривых 3 и 4 для стали 316L для таких же коэффициентов усиления соответственно. Как видно из рисунка, вне зависимости от эксперимента кривые отношения температуры и интенсивности по группам расположены кучно и не имеют серьезных отклонений. В связи с этим результирующие отношения были взяты как среднее по группе для материала и режима.

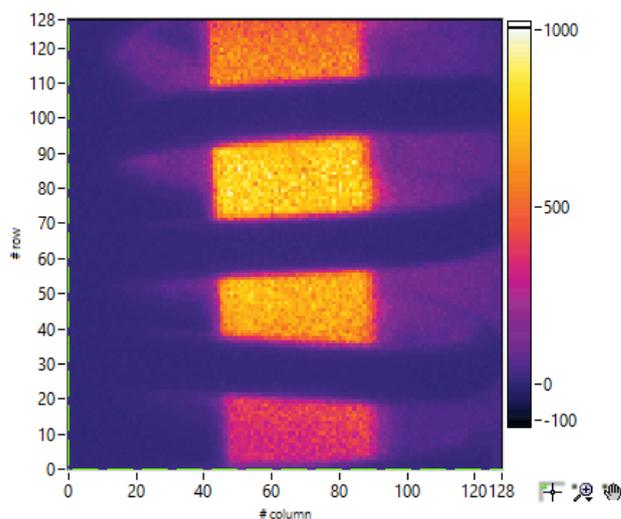


Рисунок 1.5. Изображение, полученное с инфракрасной камеры

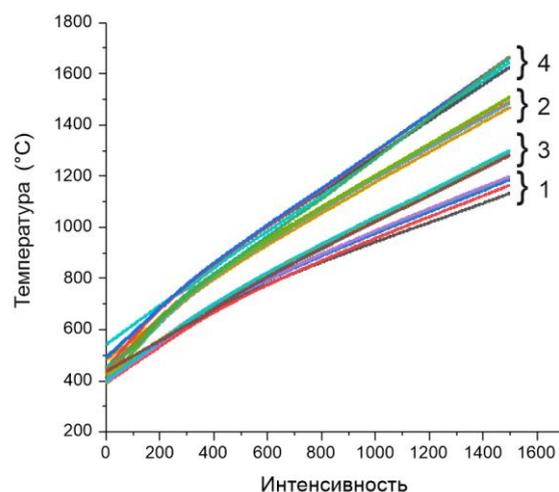


Рисунок 1.6. Кривая зависимости температуры от интенсивности

Далее была изготовлена стенка с размерами 150x50x45 мм из порошка стали 316L на подложке из того же материала. В процессе выращивания использовалась продольная и поперечная стратегии заполнения с последовательным чередованием со следующими технологическими параметрами: мощность лазерного излучения  $P = 1,2$  кВт, линейная скорость перемещения технологической головки  $V = 1,3$  м/мин, диаметр пятна на подложке  $d = 2,4$  мм и расход порошка  $m = 17$  гр/мин. Инфракрасная камера была расположена напротив длинной стенки на расстоянии 300 мм. Область захвата камеры составила 47 мм.

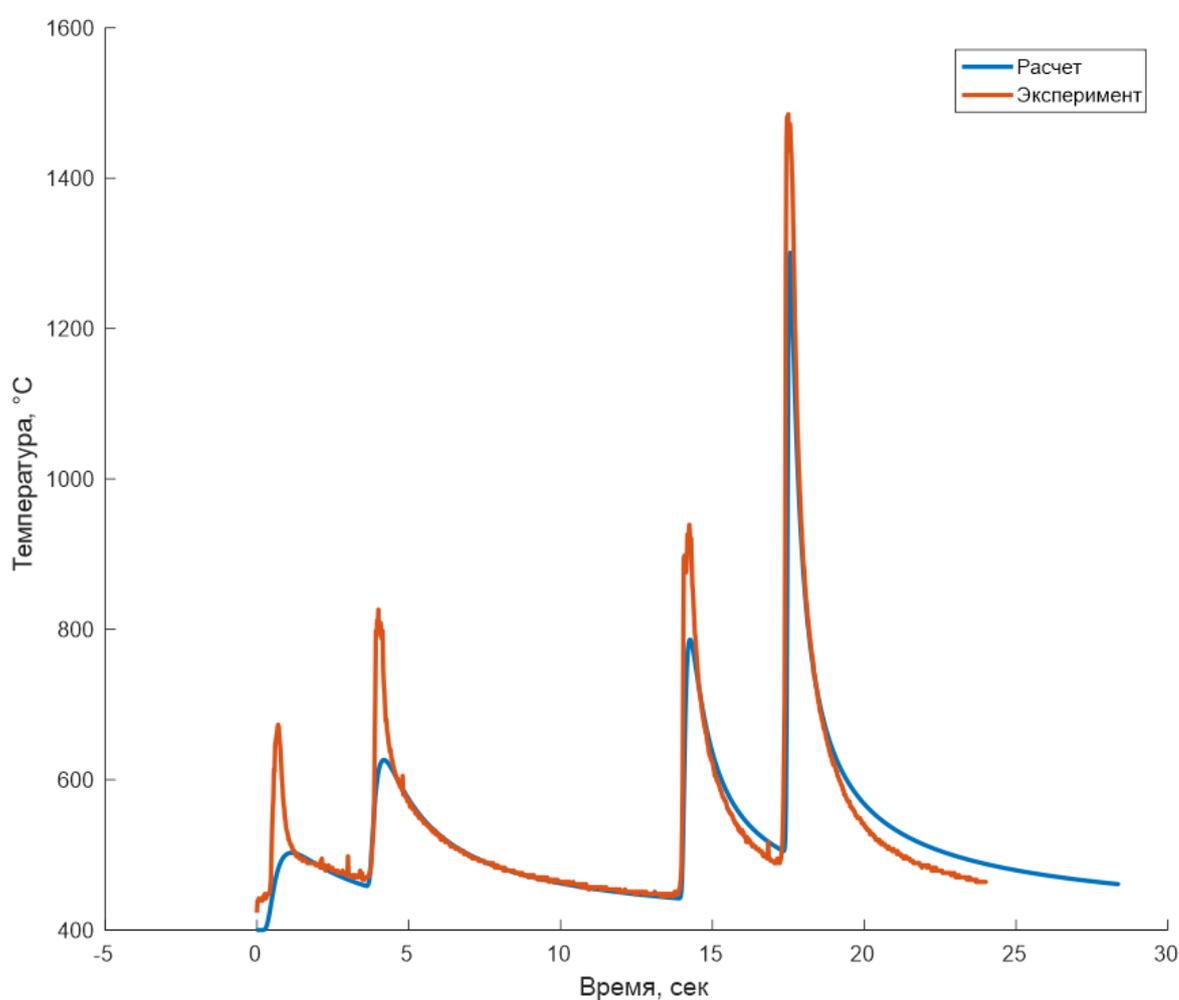


Рисунок 1.7. График расчетного и экспериментального термических циклов для продольной стратегии заполнения

На основе результатов, полученных в ходе эксперимента по выращиванию стенки, было произведено сравнение расчетных и экспериментальных данных. На рисунке 1.7 представлен график изменения

температуры в образце по расчетным и экспериментальным значениям. После анализа экспериментальных данных был сделан вывод о том, что модель теплопереноса имеет удовлетворительную точность и может быть использована для расчета распределения температурного поля при выращивании как тонкостенных, так и толстостенных изделий с многопроходным заполнением слоя.

## **Глава 2. Анализ и моделирование динамики газопорошковой струи**

В данной работе для моделирования подачи порошкового материала в рабочую зону в процессе выращивания использовалась простая аналитическая модель. Согласно работам (Pinkerton AJ and Li L 2004 Modelling powder concentration distribution from a coaxial deposition nozzle for laser-based rapid tooling. J. of manuf. sci. and engin. 126(1) 33-41), предполагаем, что плотность распределения частиц порошка при вылете из сопла имеет нормальное распределение и представляет собой:

$$F(x, y) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_x^2 \cdot \sigma_y^2} \exp\left(-\frac{(x-\mu_x)^2 + (y-\mu_y)^2}{2 \cdot \sigma_x^2 \cdot \sigma_y^2}\right), \quad (2.1)$$

где  $\sigma_x, \sigma_y$  среднеквадратичные отклонения по координатам  $x$  и  $y$  соответственно,  $\mu_x, \mu_y$  – математические ожидания.

Так как начало координат системы лежит на оси газопорошковой струи, то математические ожидания будут равны нулю. Среднеквадратичное отклонение будет представлять собой эффективный радиус газопорошковой струи Ref:

$$R_{ef} = \sigma_x \cdot \sigma_y = \frac{d_n}{2} + f \cdot tg\theta, \quad (2.2)$$

где  $\theta$  - является половиной угла расходимости газопорошковой струи;  $f$  – расстояние от среза сопла до поверхности;  $d_n$  – диаметр газового сопла.

На рисунке 2.1 представлена схема распространения газопорошковой струи в пространстве.



Рисунок 2.1. Схема газопорошкового потока

Подставив выражения (2.2) в уравнение (2.1) получим:

$$F(x, y) = \frac{m}{2\pi \cdot \left(\frac{d_n}{2} + f \cdot \text{tg}\theta\right)^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2 \cdot \left(\frac{d_n}{2} + f \cdot \text{tg}\theta\right)^2}\right) \quad (2.3),$$

где  $m$  – расход порошка.

Выражение (2.3) справедливо только при нормальном падении газопорошковой струи. Для учета наклона газопорошковой струи в плоскости  $XOZ$  на некоторый угол  $\alpha$  к оси  $X$  введем:

$$\begin{aligned} x' &= x / \cos(\alpha) \\ y' &= y \\ f' &= f - x \cdot \text{tg}(\alpha) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Для получения коэффициента захвата порошка необходимо проинтегрировать выражение (2.3) по интересующей области, например, ванне расплава. В нашем случае будем рассматривать области в форме окружности при вертикальном падении газопорошковой струи или в форме эллипса при падении струи под некоторым углом  $\alpha$  к оси  $X$ . В самом простом случае для определения коэффициента захвата для некоторой окружности

радиусом  $R$  необходимо преобразовать и проинтегрировать выражение (2.4) следующим образом:

$$G_{calc} = \int_0^R \int_0^{2\pi} \frac{m}{2\pi \cdot \left(\frac{dn}{2} + f \cdot tg\theta\right)^2} \exp\left(-\frac{(r \sin \phi)^2 + (r \cos \phi)^2}{2 \cdot \left(\frac{dn}{2} + f \cdot tg\theta\right)^2}\right) d\phi dr \quad (2.5)$$

Эксперименты по измерению коэффициента захвата порошка проводились на трех струйном сопле для 3-х случаев. Первый случай, когда была задействована только одна трубка подачи газопорошковой смеси, ось которой находилась нормально к горизонтали. Во втором случае также использовалась одна трубка сопла, но угол к горизонтали составлял  $70^\circ$ . В третьем случае использовались все 3 трубки сопла. Схема для все трех случаев эксперимента представлена на рисунке 3.

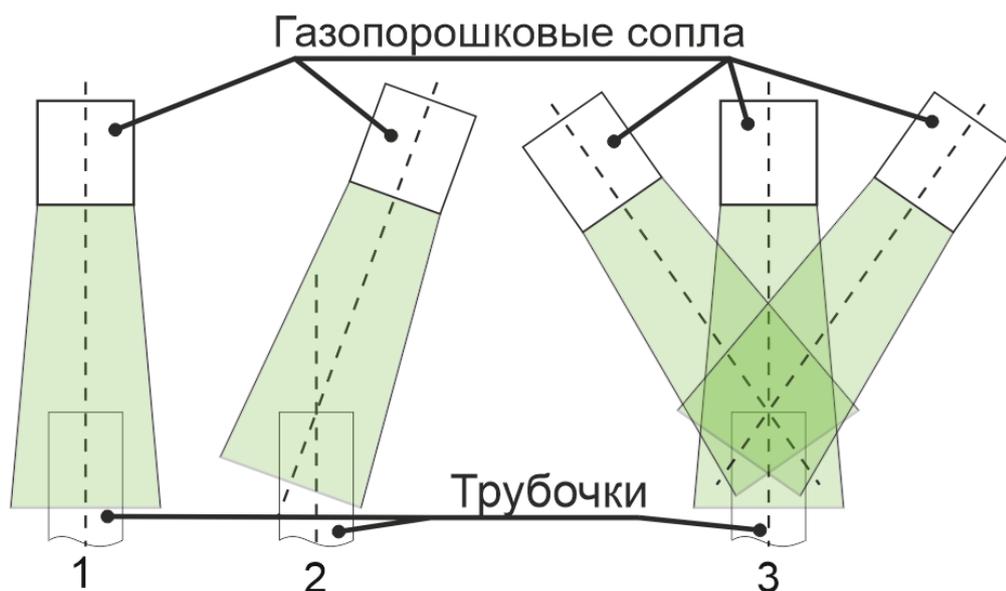


Рисунок 2.2 – Схема эксперимента

Для измерения коэффициента захвата порошка использовалось 3 трубки диаметром  $D = 1.5, 2, 3$  мм имитирующих ванну расплава. Коэффициент захвата порошка считался как отношение масс порошка, попавшего в трубку к общему расходу порошка. В процессе эксперимента варьировалось расстояние  $f$  от среза сопла до трубки. Для каждого случая и для каждого  $f$  измерение коэффициента захвата порошка проводилось для каждого значения  $D$ .

Для уточнения угла расходимости необходимо решить оптимизационную задачу при имеющихся экспериментальных значениях коэффициентов захвата порошка для разного диаметра трубок  $D$ . Также введем дополнительную мнимую контрольную трубку  $D_4$ , диаметр которой будет больше  $R_{ef}$  и в которую попадет весь порошок струи. Таким образом при постоянном фокусном расстоянии получим функцию, зависящую от угла расходимости газопорошковой струи:

$$F_{opt}(\theta) = \sum_{i=1}^4 \left[ \int_0^{\frac{D_i}{2}} \int_0^{2\pi} \frac{m}{2\pi \cdot \left(\frac{d_n}{2} + f \cdot tg\theta\right)^2} \exp\left(-\frac{(r \sin \phi)^2 + (r \cos \phi)^2}{2 \cdot \left(\frac{d_n}{2} + f \cdot tg\theta\right)^2}\right) d\phi dr - G_i \right]^2 \quad (2.6)$$

где  $i$  – номер трубки, а  $G_i$  – коэффициент захвата порошка для соответствующей трубки.

Оптимизация функции (2.6) поможет уточнить угол расходимости  $\theta$  газопорошковой струи на разных расстояниях от сопла.

После уточнения угла  $\theta$ , были сравнены значения расчетных и экспериментальных значений коэффициента захвата. На рисунке 2.3 представлены графики распределения массы порошка  $G$  в эффективном радиусе газопорошковой струи при изменении расстояния от среза сопла (слева) и изменение  $R_{ef}$  от  $f$  (справа).

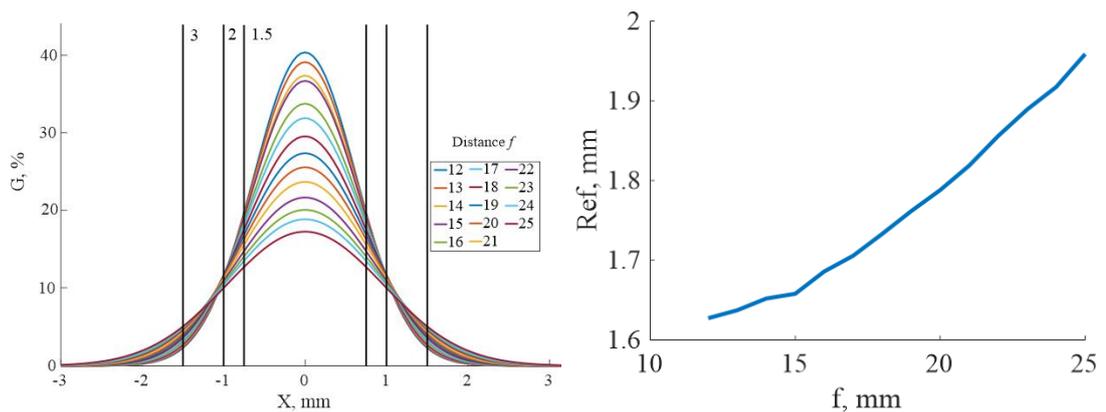


Рисунок 2.3. Распределение массы порошка  $G$  в газопорошковой струе, ограниченной областью радиусом  $R_{ef}$ , при изменении расстояния от среза сопла (слева), изменение  $R_{ef}$  от  $f$  (справа)

На рисунке 2.4 представлены результаты расчетных и экспериментальных значений коэффициента захвата порошка. При сравнении

отклонение экспериментальных значений от расчетных получилось не более 4%.

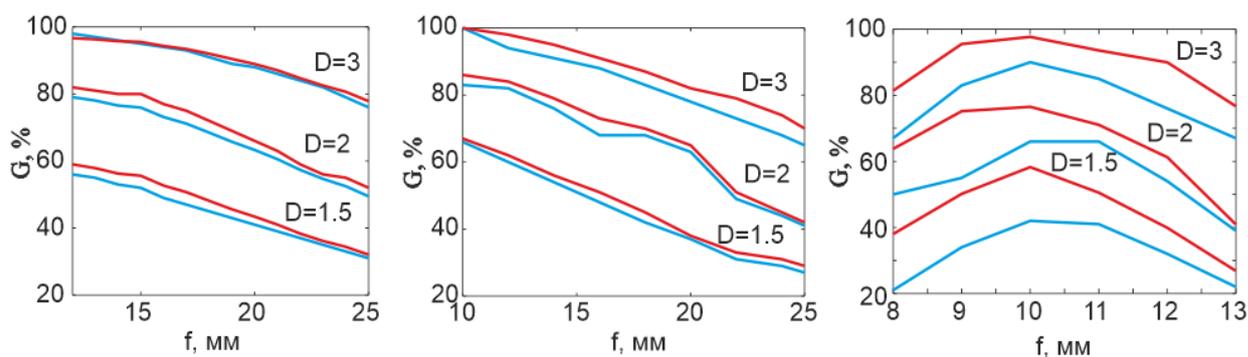


Рисунок 2.4. Результаты измерения и расчета коэффициента захвата порошка (красная линия – расчетное значение, синяя линия – экспериментальное значение)

Разница расчетных и экспериментальных значений в случае падения струи под углом составляет не более 6%, однако, оно выше, чем при нормальном падении. Это можно объяснить влиянием сил гравитации.

В ходе работы было определено значение коэффициента захвата порошка для различных вариантов конфигурации сопел. Также были проведены эксперименты по измерению КЗП для случаев с однотрубчатым и трехтрубчатым соплами. Анализ экспериментальных и расчетных значений КЗП показал, что модель хорошо описывает однотрубчатые и трехтрубчатые сопла, и расхождение результатов эксперимента и аналитической модели не превышает 15%. Данная модель может использоваться и используется для расчета массы порошка участвующего в формировании наплавляемого слоя.

### Глава 3. Влияние гидродинамических сил на формирование геометрии наплавляемого валика

Для анализа механизма формирования профиля поверхности наплавляемых слоев применимо уравнение равновесия жидкой фазы в поле сил тяжести, связывающее кривизну свободной поверхности ванны жидкого металла и поверхностное натяжение с гидростатическим давлением (рисунок 3.1):

$$\sigma \kappa = -\rho \cdot g \cdot z_o + C, \quad (3.1)$$

где  $\sigma$  - поверхностное натяжение;  $\kappa$  - кривизна свободной поверхности жидкой ванны;  $\rho$  - плотность;  $g$  - ускорение свободного падения;  $C$  - константа (множитель Лагранжа).

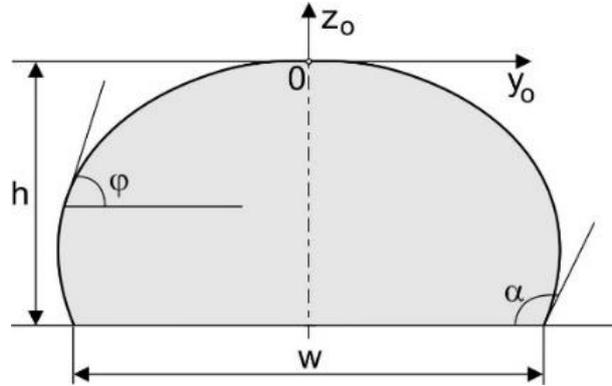


Рисунок 3.1. Расчетная схема определения формы поверхности наплавленного валика

Кривизна кривой  $y_o = f(z_o)$ , описывающей формы поперечного сечения наплавленного слоя, может быть определена следующим образом:

$$\kappa = \frac{f''}{(1+f'^2)^{3/2}} = \frac{1}{f'} \left( \frac{1}{1+f'^2} \right). \quad (3.2)$$

Зададим искомую кривую в параметрическом виде:

$$\begin{cases} z_o = z_o(\phi) \\ y_o = y_o(\phi) \end{cases} \quad 0 \leq \phi \leq \alpha.$$

Нетрудно заметить, что в таком случае

$$f' = -ctg\phi = \frac{dy_o}{dz_o}. \quad (3.3)$$

Выполнив элементарные преобразования, кривизна профиля наплавленного слоя может быть записана в следующем виде:

$$\kappa = \frac{d \cos \phi}{dz_o}. \quad (3.4)$$

Преобразовав выражение (1.4) с учетом (1.7) получаем:

$$\frac{dz_o}{d\phi} = \frac{\sin \phi}{B}, \quad \text{где } B = \frac{\rho g z_o}{\sigma} + C. \quad (3.5)$$

Для получения аналогичной параметрической зависимости для  $y_o$  преобразуем (1.6) в следующий вид:

$$\frac{dy_o}{d\phi} = -\frac{\cos \phi}{B}. \quad (3.6)$$

Уравнения (3.5) и (3.6) представляют собой системы обыкновенных дифференциальных уравнений со следующими граничными условиями:

$$1) z_o(0) = 0; y_o(0) = 0.$$

$$2) y_o(-\square) = 0.5w,$$

где  $w$  - ширина ванны расплава.

$$3) 2 \int_{-\square}^0 y_o dz_o = S_{lay},$$

где  $h$  - расчетная высота наплавляемого слоя;  $S_{lay}$  - площадь поперечного сечения наплавляемого слоя.

Площадь поперечного сечения слоя складывается из суммы площади поперечного сечения проплавления подложки и наплавляемого в единицу времени присадочного металла. Последняя из которых может быть определена путем интегрирования плотности потока массы газопорошковой струи по поверхности ванны расплава. С учетом угла наклона  $\beta$  оси потока частиц порошка пятно распределения плотности струи в координатах поверхности детали будут иметь эллиптическую форму, описывающуюся следующим выражением:

$$q_{2P}(x, y) = \frac{q_P \sin \beta}{\pi r_P^2} \exp \left[ -\frac{(x \sin \beta)^2 + y^2}{r_P^2} \right],$$

где  $q_P$  - массовый расход порошка;  $r_P$  - эффективный радиус газопорошковой струи.

Искомая форма наплавляемого слоя определяется исходя из предварительно рассчитанной ширины ванны расплава и площади наплавляемого металла путем подбора значений краевого угла  $\alpha$  и множителя Лагранжа  $C$ , удовлетворяющих граничным условиям.

В качестве примера рассмотрим процесс лазерного выращивания стенки из титанового сплава ВТ6. Наплавка производилась на кромку пластины из аналогичного сплава размером  $200 \times 100 \times 2.4$  мм на следующем режиме: мощность  $q_L = 400$  Вт; коэффициент полезного действия  $\eta = 0.35$ ; распределение плотности мощности в пятне нагрева радиусом  $r_L = 0.85$  мм равномерное; угол наклона головки к оси  $x$   $\beta = 90^\circ$ ; скорость наплавки  $v = 3.33$

мм/с; массовый расход порошка  $q_p = 0.042$  г/с; эффективный радиус газопорошковой струи  $r_p = 0.9$  мм; Наплавка каждого из слоев производилась при начальной температуре  $T_o = 20-50$  оС. Среднее значение поверхностного натяжения жидкого титана в интервале температур 1670 – 1770 оС принято равным  $\gamma = 1.55$  Н/м.

Сравнение расчетной формы поверхности наплавленных слоев стенки с экспериментально полученным макрошлифом рисунок 3.2 показало хорошее совпадение. Расчетная методика позволяет также определить температурное поле от каждого из слоев, что может быть использовано для изучения кинетики фазовых превращений в выращиваемом изделии и определения морфологии затвердевания металла наплавляемых слоев.

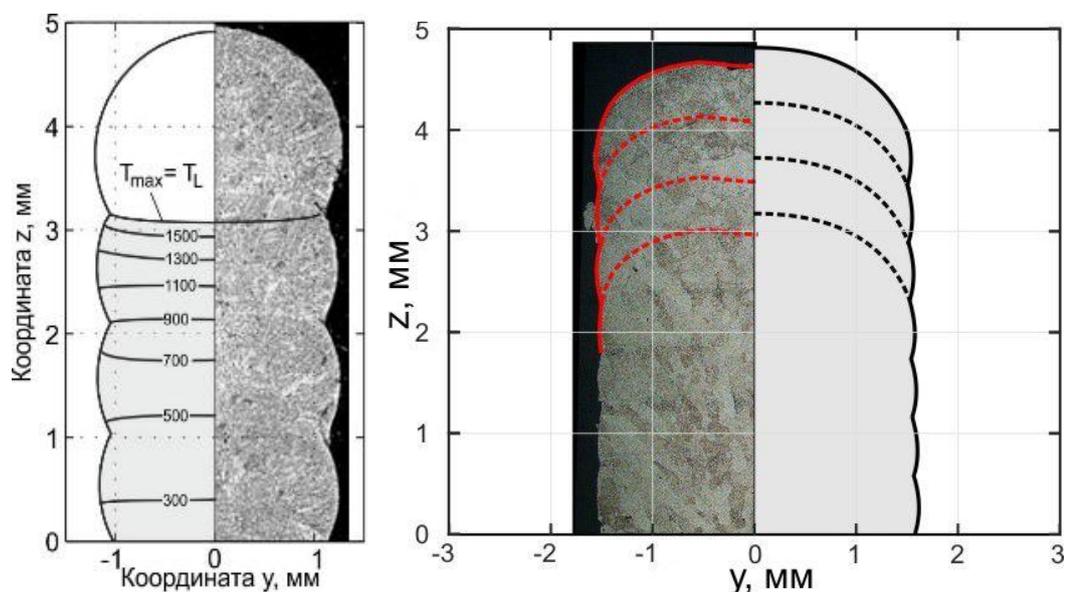


Рисунок 3.2. Расчетное поле максимальных температур и форма поперечного сечения наплавленной стенки для двух разных образцов из ВТ6 (слева) и 316L (справа)

#### Глава 4. Стабильность процесса выращивания, зона самостабилизации

Устойчивость формирования поверхности в процессе прямого лазерного выращивания определяется комплексом физических процессов, протекающих на поверхности ванны расплава, движущейся с высокой скоростью по выращиваемому изделию при постоянном потоке вещества на ее поверхность. Начнем рассмотрение с анализа влияния термокапиллярного эффекта на течение расплава. В случае прямого лазерного выращивания скорость

расплава относительно твердой фазы определяется скоростью термокапиллярного течения. Ограничимся для анализа практически интересным случаем, когда длина ванны расплава «L» много больше ее ширины «b» и ее глубины «H», характерным для реальных режимов выращивания. Согласно работе (Turichin G. et al. Hydrodynamic instability in high-speed direct laser deposition for additive manufacturing //Physics Procedia. – 2016. – Т. 83. – С. 674-683.) условие стабильности можно выразить как:

$$2 \frac{\sigma H^2}{v_0 b^3 L} < \frac{\partial j}{\partial z} \quad (4.1),$$

,где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжение; H – глубина ванны расплава;  $v_0$  – линейная скорость перемещения лазерного луча; b – половина ширины ванны расплава;  $\partial j / \partial z$  – градиент плотности потока в газопорошковой струе по нормали к поверхности слоя.

Таким образом критической величиной, определяющей устойчивость (или неустойчивость) процесса выращивания является величина градиента плотности потока частиц в газопорошковой струе по нормали к выращиваемой поверхности. Качественно этот факт легко понять – для стабилизации положения поверхности необходимо, чтобы при ее смещениях вверх относительно стационарного значения она попадала бы под менее плотный поток частиц, что снижало бы толщину наплавленного слоя, а при смещениях вниз – под более плотный поток, что повышало бы его толщину и соответственно, гасило бы возникающие возмущения, как показано на рисунке 4.1.

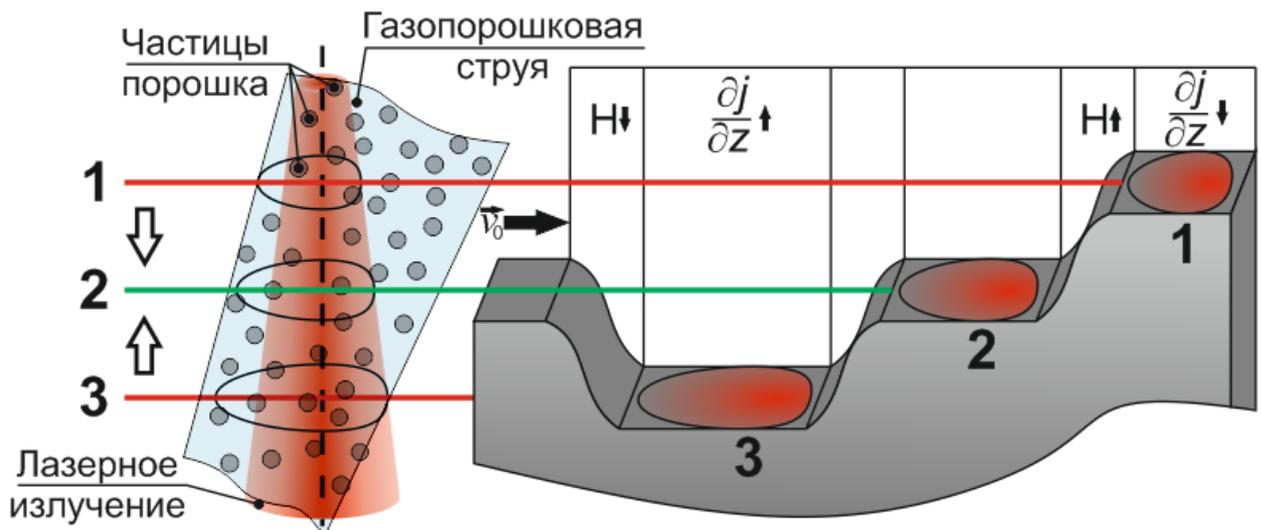


Рисунок 4.1. Схема самостабилизации процесса прямого лазерного выращивания

Очевидно, что для устойчивости процесса необходимо также, чтобы длина зоны, в которой выполняется условие (4.1), была бы больше толщины наплавленного за один проход слоя. При количественном анализе следует также учитывать, что не все частицы прилипают к выращиваемой поверхности, поэтому необходимо иметь величину градиента несколько больше, чем даваемая выражением (4.1). Итак, линейный анализ устойчивости процесса прямого лазерного выращивания позволяет заключить, что устойчивое выращивание возможно только при положении выращиваемой поверхности выше перетяжки газопорошковой струи, а необходимым условием устойчивости является выполнение неравенства (4.1). Более точный анализ особенностей динамических процессов при прямом лазерном выращивании требует решения связанных задач о динамике поверхности, течения газопорошковой струи и ее разбиении о поверхность, движении, нагреве и плавлении частиц порошка.

### Заключение

В ходе работы была разработана модель процесса прямого лазерного выращивания, позволяющая установить взаимосвязь между параметрами режима и формированием поверхности выращиваемого изделия. Предложен метод решения задачи нагрева материала лазерным излучением. Проведен

анализ и моделирование газопорошковой струи, позволяющий определить коэффициент использования модельного материала. Также определено влияние гидродинамических сил на формирование геометрии наплавляемого валика. Совокупность решенных в ходе работы задач позволяет с высокой точностью определить форму наплавляемого валика при минимальных затратах вычислительных ресурсов. Следует отметить, что еще одним немаловажным фактором, описанным в работе, является критерий стабильности процесса, который определяется балансом технологических параметров, обеспечивающих повторяемость геометрии наносимых валиков от слоя к слою. Все вышеперечисленные тезисы работы успешно прошли экспериментальную проверку.

В качестве дальнейшего развития темы исследования необходимо создание компьютерного приложения для технологических расчетов. Подобные расчеты необходимы инженерам технологам при подборе режима выращивания изделий.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

1. Stankevich S. L., Korsmik R. S., Valdaytseva E. A. Modeling of bead formation process during laser cladding //Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – С. 012045.
2. Stankevich S. L. et al. Study of metallic powder flow in discrete coaxial nozzles //J Phys Conf Ser. – 2018. – Т. 1109. – С. 012008.
3. Babkin K. D. et al. High-Speed Laser Direct Deposition Technology: Theoretical Aspects, Experimental Researches, Analysis of Structure, and Properties of Metallic Products //Proceedings of the Scientific-Practical Conference " Research and Development-2016". – Springer, Cham, 2018. – С. 501-509.
4. Yun N. G. et al. Design and optimization of discrete powder nozzle for laser metal deposition //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 666. – №. 1. – С. 012012.

5. Stankevich S., Gumenyuk A., Rethmeier M. Measurement of thermal cycle at multi-pass layer build-up with different travel path strategies during DLMD process //Key Engineering Materials. – Trans Tech Publications Ltd, 2019. – T. 822. – C. 396-403.
6. Ivanov S. et al. A simplified model for numerical simulation of laser metal deposition process with beam oscillation. – 2018.
7. Turichin G. A., Valdaytseva E. A., Stankevich S. L., Udin I.N. Computer simulation of hydrodynamic and thermal processes in DMD technology // Lasers in Manufacturing Conference 2019, 2019. – T. 682. – C. 160-165.