

Математическое моделирование макропроцессов при лазерном сплавлении с инъекцией металлических порошков

А.В. Дубров^а, Ф.Х. Мирзаде^а, В.Д. Дубров^а

^аИИЛИТ РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 140700, ул. Святозерская, 1, Шатура, Россия

Аннотация

В работе изложена математическая модель макропроцессов, протекающих при лазерном сплавлении с инъекцией металлических порошков. Модель включает в себя самосогласованные уравнения для динамики свободной поверхности, температуры, концентрации компонентов и скоростей течения расплава. Приводится алгоритм её численной реализации, а также результаты тестовых расчетов полей температуры, структуры конвективных течений расплава, распределения примеси и геометрических характеристик формируемого объекта.

Ключевые слова: лазерное сплавление порошков; численное моделирование; теплоперенос; термокапиллярные течения; аддитивные технологии.

1. Введение

В настоящее время лазерное сплавление (ЛС) металлических порошков является одним из наиболее быстро развивающихся методов среди лазерных аддитивных производств (АП) функциональных изделий или прототипов [1-5]. ЛС позволяет осуществлять послойное нанесение металлического материала, что дает возможность создавать 3D объекты любой степени сложности. Этот метод широко применяется для создания, ремонта и восстановления функциональных деталей в различных отраслях промышленности, таких как авиастроение, автомобилестроение и т.д. Его использование весьма перспективно также с точки зрения биомедицинских приложений (например, при производстве имплантатов). ЛС с коаксиальной инъекцией порошков позволяет вести обработку изделий со значительной производительностью с минимальным проплавлением основы, с возможностью точного контроля параметров процесса, геометрических и микроструктурных характеристик наплавленных слоев.

Процесс ЛС определяется большим количеством факторов, таких как скорость обработки, мощность источника энергии, скорость подачи порошка, физико-химическими свойствами исходного порошка и т.д. Параметрическое исследование позволяет определить оптимальные технологические параметры для изготовления изделия. Следует отметить взаимосвязь факторов, влияющих на процесс, нелинейность процессов, происходящих при лазерном воздействии, а также особенности взаимодействия лазерного излучения (ЛИ) с материалами (например, поглощение и рассеяние на частицах, плавление, образование ванны расплава, испарение, образование плазмы) [1,3]. Формирование свободной поверхности расплава происходит под действием как давления потока порошка, так и капиллярных (в том числе термокапиллярных) сил. Процессы кристаллизации и формирование микроструктуры синтезируемого объекта протекают в условиях больших градиентов температуры и скоростей охлаждения, напряжений и деформаций, что указывает на неравновесный характер рассматриваемых процессов.

Важным направлением разработок лазерных АП является математическое моделирование (в том числе численное) гидродинамических и тепло-массообменных процессов, контролирующих процессы кристаллизации расплава, соответственно, микроструктурные свойства и качество синтезируемой детали при ЛС. Большой интерес также вызывает предсказательное моделирование геометрических параметров изготавливаемого изделия.

Существенной проблемой при исследовании многофазных течений, сопровождающих фазовый переход (ФП), является определение положения свободной поверхности (границы раздела фаз жидкость-газ). В ряде работ термодинамические процессы моделируются с использованием заранее заданной геометрии поверхности. При необходимости учета движения свободной границы применяется ряд подходов. Могут использоваться адаптивные расчетные сетки, узлы которых смещаются вместе с поверхностью (“interface tracking”), либо отслеживается движение ряда точек границы на фиксированной сетке. Оба подхода, однако, применимы при относительно простом движении поверхности. Также используется «захват» границы (“interface capturing”) – группа методов, использующий транспортное уравнение для скалярного поля (маркерной функции), характеризующего искомую фазу. Распространенными маркерными функциями являются: функция уровня (*Level Set – LS*) [6, 7] и объемная доля жидкости в ячейке (*Volume of Fluid - VOF*) [8]. *LS* функция задаётся в ячейках как расстояние до поверхности, которая считается нулевым уровнем. В *VOF* отслеживается динамика объёмной доли фазы в ячейках, принимающая значения в диапазоне [0, 1]. Граничными считаются ячейки, содержащие промежуточные значения между “0” и “1”, что приводит к некоторому «размазыванию» границы. Метод *LS* позволяет более точно определить положение и кривизну границы, но не гарантирует консервативность массы.

Целью настоящей работы является численное моделирование макропроцессов тепло-массообмена и гидродинамики, протекающих при лазерном сплавлении с инъекцией металлических порошков. Исследование процессов макроуровня проводится на основе математической модели, включающей в себя самосогласованные уравнения для динамики свободной поверхности, температуры, концентрации компонентов и скоростей течения

расплава. При численном решении конвективно-диффузионных уравнений используется метод конечных объемов. Эволюция свободной поверхности моделируется с использованием комбинированного VOF и LS метода. Приводятся результаты тестовых расчетов полей температуры, структуры конвективных течений расплава, распределения примеси и геометрических характеристик формируемого объекта.

2. Математическая модель

Процесс ЛС с коаксиальной подачей порошков схематически представлен на рис.1. Математическая модель нестационарного процесса ЛС учитывает перенос массы, энергии, конвективные течения и эволюцию границы раздела газ-жидкость (свободной поверхности).

Перенос энергии описывается уравнением вида [9]

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} h) = \nabla \cdot (k \nabla T) - \nabla \cdot (\rho f_s (h_L - h_s) \mathbf{v}) + Q_{enthalpy}^{add}, \quad (1)$$

где h , k и ρ – энтальпия, теплопроводность и плотность среды, соответственно; T – температура; \mathbf{v} – вектор скорости жидкости. Дополнительно введенный в правую часть (1) член с $Q_{enthalpy}^{add}$ учитывает скорость изменения энтальпии из-за инъекции частиц порошка. $f_s(\vec{r}, t) = 1 - f_L(\vec{r}, t)$, $f_L(\vec{r}, t) = M_L / M_0$ – массовая доля жидкой фазы, образовавшейся в точке \vec{r} . Коэффициенты уравнения теплопроводности (теплоемкость, плотность и теплопроводность) в двухфазной зоне (*mushy zone*) определяются по значениям объемной и массовой долей.

Далее учитывая, что энтальпии твердой и жидкой фаз, соответственно, $h_s = c_s T$ и $h_L = c_L T + (c_s - c_1) T_s + L_m$, а массовая доля жидкой фазы линейно зависит от температуры

$$f_L = \begin{cases} 0, & T > T_L, \\ \frac{T - T_s}{T_L - T_s}, & T_s \leq T \leq T_L, \\ 1, & T < T_s \end{cases}$$

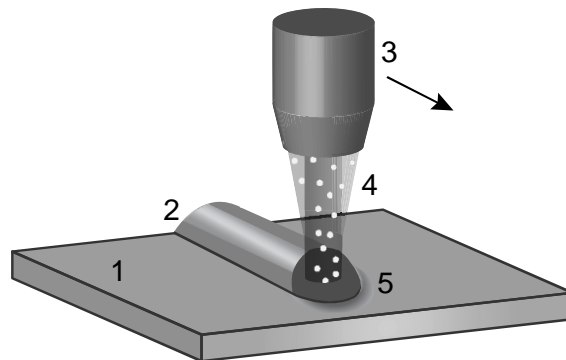


Рис. 1. Схема ЛС с коаксиальной инъекцией порошков. 1) подложка; 2) формируемый валик; 3) направление движения; 4) лазерное излучение + порошок; 5) ванна расплава.

(T_s и T_L – температуры солидус и ликвидус, соответственно, L_m – скрытая теплота ФП), уравнение энергии запишем в виде

$$\frac{\partial(\rho c_L T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_L T \mathbf{v}) - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q_{enthalpy}^{add} - \frac{\partial(\rho f_L L_m)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho f_s \Delta c_p T)}{\partial t} \quad (2)$$

На свободной поверхности, выполняется закон сохранения энергии, учитывающий поглощение энергии ЛИ поверхностью (q_{Las}), конвективные (q_H) и радиационные потери (q_T)

$$\begin{aligned} -k \nabla T &= q_{L/g} = q_{Las} + q_H + q_T, \\ q_{Las} &= \frac{2 \beta_{Las} P_{Las}}{\pi r_{Las}^2} \exp(-2r^2/r_{Las}^2) \exp(-3\dot{m}l/\pi r_p d^2 \rho_p v_p), \\ q_H &= -h_c (T - T_0), \quad q_T = -\sigma_B \varepsilon (T^4 - T_0^4), \end{aligned} \quad (3)$$

где P_{Las} – мощность ЛИ; β_{Las} – коэффициент поглощения ЛИ мишенью; r_{Las} – радиус лазерного луча; l – расстояние от сопла до мишени; h_c – коэффициент конвективной теплопередачи; T_0 – температура воздуха; $r^2 = (x - V_s t)^2 + y^2$, V_s – скорость сканирования. В (3) второй экспоненциальный множитель учитывает ослабление ЛИ вследствие рассеяния на частицах порошка.

Конвективные течения в жидкости описывается уравнениями Навье-Стокса для вектора скорости ($\mathbf{v} = (u, v, w)$) и неразрывности

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) - \text{div}(\mu \nabla \mathbf{v}) = -\nabla P - \frac{\mu_m}{K} \mathbf{v} + \mathbf{S}_{add}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = S_{mass}, \quad (5)$$

где P – давление жидкости, $\mu = \mu_L(\rho/\rho_L)$ – вязкость, S_{mass} – источник массы. \mathbf{S}_{add} – учитывает изменение моментов импульса за счет добавления массы порошка. Последнее слагаемое в правой части (4) характеризует изменение моментов импульса за счет фильтрации жидкости через пористую среду (закон Дарси) (\mathbf{S}_{U}^{mom}), где K – проницаемость среды: $K = K_0 f_L^3 (1 - f_L)^{-2}$.

На свободной поверхности жидкости действуют капиллярные силы (\mathbf{F}_c) и силы Марангони (\mathbf{F}_M), обусловленные градиентом поверхностного натяжения, связанным с неоднородностью температурного поля (термокапиллярные силы): $\mathbf{F}_{S/L} = \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_M = \gamma \kappa \mathbf{n} + \gamma_T (\nabla T - \mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \nabla T))$, где $\kappa = -(\nabla \cdot \mathbf{n})$ – кривизна свободной поверхности, $\gamma_T = -\partial \gamma_0 / \partial T_m$ – термический коэффициент поверхностного натяжения.

Уравнение массопереноса растворенного компонента (с концентрацией N) в расплаве имеет вид

$$\frac{\partial \rho N}{\partial t} + \nabla \rho \mathbf{v} N = \nabla \cdot (\rho D \nabla N) + \rho_L (1 - k_0) N \frac{\partial f_L}{\partial t}, \quad (6)$$

где D – коэффициент диффузии растворенного вещества, k_0 – равновесный коэффициент распределения.

Свободная поверхность в процессе ЛС изменяет свою форму в результате как инъекции частиц порошка, так и конвективных течений жидкости. Для определения эволюции свободной границы используется уравнение VOF для объемной доли (α) жидкой фазы в ячейке, имеющее вид

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \alpha = -F_p \mathbf{n} \cdot \nabla \alpha, \quad (7)$$

где F_p – характеризует поток порошка. Физические свойства среды в переходной зоне (газ-жидкость/твердое тело) определяются по функции VOF .

Для объемных источников массы (S_{mass}), энтальпии ($Q_{enthalpy}^{add}$) и моментов (\mathbf{S}_{add}), фигурирующих в уравнениях (2), (4) и (5), имеем следующие выражения

$$\begin{aligned} S_{mass} &= (\rho_m - \rho_g) \frac{\partial \alpha}{\partial t}, \\ Q_{enthalpy}^{add} &= [h(\rho_m - \rho_g) + \rho(h_m - h_g)] \frac{\partial \alpha}{\partial t}, \\ \mathbf{S}_{add} &= \mathbf{v} (\rho_m - \rho_g) \frac{\partial \alpha}{\partial t}. \end{aligned}$$

Поверхностные силы ($\mathbf{F}_{S/L}$), действующие на единицу площади свободной поверхности, могут быть преобразованы в объемные силы с помощью дельта-функции $\delta(\alpha)$, т.е.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{S/L}^{vol} &= \mathbf{F}_{S/L} \delta(\alpha) = [\gamma \kappa \mathbf{n} + \gamma_T (\nabla T - \mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \nabla T))] \delta(\alpha) \\ &= \gamma \kappa(\alpha) \nabla \alpha + \gamma_T (\nabla T - \mathbf{n}(\alpha) (\mathbf{n}(\alpha) \cdot \nabla T)) |\nabla \alpha|. \end{aligned}$$

Соответственно, для объемных поверхностных источников тепла, имеем $q_{L/g}^{vol} = q_{L/g} \delta(\alpha)$.

По градиенту функции VOF определяется нормаль к свободной поверхности: $\mathbf{n} = \nabla \alpha / |\nabla \alpha|$, а с помощью самой функции VOF – ее положение. Однако, в этом методе, ввиду размазывания фронта функции VOF из-за схемной вязкости, происходит схемное диспергирование фазы. Для преодоления этого недостатка используется метод LS . В нем вводится функция $\phi = \pm d$ – фактическое расстояние от свободной поверхности. Если $\phi < 0$, то область заполнена газом, если $\phi > 0$ – жидкостью. На свободной поверхности $\phi = 0$. Преимуществом данного метода является хорошая точность в определении положения свободной поверхности расплава в процессе ЛС. Соответственно, более точно можно определить нормаль $\mathbf{n} = \nabla \phi / |\nabla \phi|$ и кривизну поверхности $\kappa = -(\nabla \cdot \mathbf{n}(\phi))$, что особенно важно при наличии моментов импульсов, действующих на свободной поверхности расплава. Объемные силы выражаются как

$$\mathbf{F}_{S/L}^{vol} = \mathbf{F}_{S/L} \delta(\phi) = \gamma \kappa(\phi) \delta(\phi) \nabla \phi + \gamma_T [\nabla T - \mathbf{n}(\phi) (\mathbf{n}(\phi) \cdot \nabla T)] \delta(\phi),$$

где

$$\delta(\phi) = \begin{cases} 0 & |\phi| > \varepsilon \\ (2\varepsilon)^{-1} (1 + \cos(\pi\phi\varepsilon^{-1})) & |\phi| < \varepsilon, \end{cases} \quad (8)$$

(ε – толщина переходной зоны, которая выбирается равной $1.5\Delta x$ – шага сетки).

3. Расчетный алгоритм

Программная реализация разработанной физико-математической модели процессов макроуровня при ЛС осуществлена на языке C++. Разработано программное обеспечение с использованием библиотеки C++ классов для численного моделирования OpenFOAM 2.4. Данная библиотека обладает открытым свободным кодом. Она предоставляет широкий базовый функционал для описания и исследования новых процессов и явлений, и позволяет реализовать новые физико-математические модели с использованием парадигмы объектно-ориентированного программирования.

Общая структура алгоритма представлена на рис. 2. В начальный момент времени во всех ячейках расчетной области устанавливается температура 300 K и нулевое значение скорости течения. Ячейки с координатой $z \leq 0$ (примерно нижняя половина сетки) заняты металлической фазой в твердом состоянии (объемная доля (VOF) $\alpha = 1$). На каждом шаге по времени производится определение характеристик источников ЛИ и инжестируемого металлического порошка, а также их пространственное положение. Таким образом могут быть заданы произвольные стратегии сканирования и динамические характеристики распределения мощности ЛИ и потока массы для воссоздания особенностей технологического процесса ЛС.

Для решения VOF уравнения используется метод MULES [10]. Это процедура решения в которой применяется техника уменьшения размытия фазовой границы, и обеспечивается ограниченность объемной доли в диапазоне значений $[0, 1]$. Для сокращения размытия границы VOF используется дополнительный поток коррекции. В этом случае уравнение для свободной поверхности (7) записывается следующим образом:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \alpha + \nabla \cdot ((1 - \alpha) \mathbf{u}_r, \alpha) = -F_p \mathbf{n} \cdot \nabla \alpha.$$

Относительная скорость движения металла и газа $\mathbf{u}_r = \mathbf{u}_m - \mathbf{u}_g$ используется для расчета потока коррекции, который принимает ненулевые значения только на свободной границе. Источниковый член, связанный с инъекцией массы, входит в уравнение с дельта-функцией, которая рассчитывается через значения VOF функции.

В разработанной модели формулировка термокапиллярных и капиллярных сил производится через функцию уровня (LS). Для этого, после решения уравнения свободной поверхности VOF осуществляется реконструкция поля LS [11]. Полученное поле VOF используется, как начальное распределение LS функции ϕ (ϕ_0). При этом значение VOF равно 0.5 выбирается как граница раздела металла и окружающего газа: $\phi_0 = (2\alpha - 1) * \zeta$. Здесь ζ – малый безразмерный параметр, зависящий от шага сетки: $\zeta = 0.75\Delta x$. Для установления окончательного распределения функции решается уравнение реинициализации:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{\phi_0}{|\phi_0|} (1 - |\nabla \phi|),$$

$$\phi(x, 0) = \phi_0(x)$$

где τ – фиктивный временной шаг ($\Delta \tau = 0.1\Delta x$). По рассчитанному полю LS задается поле дельта-функции, определяющей ширину границы (ур. (8)). Ширина переходной зоны устанавливается $1.5\Delta x$. Полученное поле LS и дельта-функция используются для вычисления нормали к свободной поверхности и её кривизны в формулировке поверхностных сил.

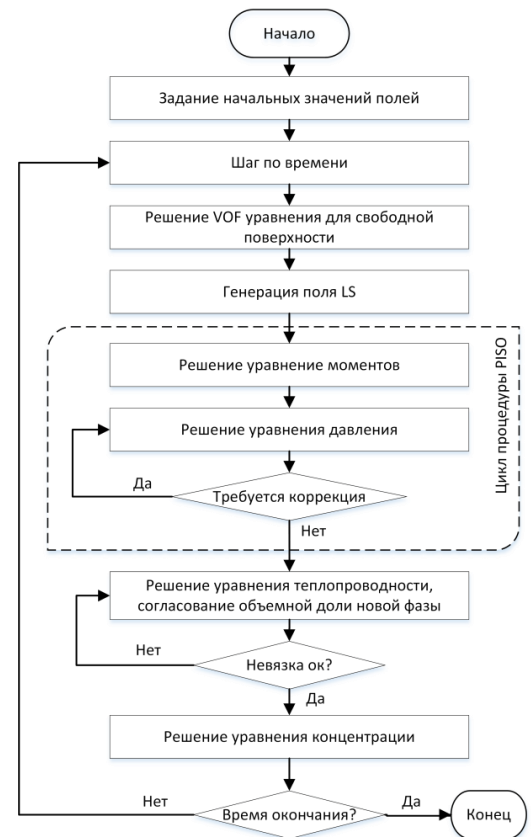


Рис. 2. Блок-схема алгоритма.

Для вычисления динамики жидкости используется метод связывания уравнений для скорости и давления. Применяется итеративный алгоритм со стратегией предиктор-корректор, основанный на процедуре PISO. Для ввода поверхностных сил в объемные уравнения используется дельта-функция, рассчитанная по полю LS (ур. (8)). Определение касательного направления для вектора силы осуществляется через вектор нормали к свободной поверхности, который также определяется через LS . Граница раздела фаз металл-газ имеет конечную толщину, задаваемую дельта функцией, и включает в себя как металлическую фазу, так и газ. Фазы сильно различаются по плотности, и сила, равномерно распределенная по толщине границы, создает неравномерный момент импульса и ведёт к чрезмерному ускорению в менее плотной фазе. В программе используется подход [12], перераспределяющий объёмные источники в более плотную фазу. Тангенциальная компонента поверхностного натяжения, отвечающая за термокапиллярный эффект, входит только в уравнение шага-предиктора (уравнение баланса импульсов). Нормальная компонента участвует во всех уравнениях, где присутствует градиент давления. Описание возможных состояний металлической фазы (твёрдое, жидкое, а также их смесь), реализуется через введение фазового поля, характеризующего долю жидкой фазы в металлической фазе и использованием члена Дарси в уравнении моментов (4).

После того, как в результате итеративной процедуры PISO на данном временном шаге устанавливается бездивергентное поле скорости, решаются уравнения энергии и концентрации. Поскольку в задаче с фазовым переходом температурное уравнение является нелинейным, для его линеаризации и решения используется итеративный алгоритм [13]. Конечная толщина границы, которая захватывает две фазы с сильно различающейся теплоемкостью (металл и газ), ведёт к перегреву газовой фазы при равномерном распределении по толщине энергетического источника q_{Lg} , связанного с воздействием ЛИ. В программе применяется перераспределение объёмного источника в направлении металлической фазы. При записи источника используется дельта функция, рассчитанная по полю VOF . В источниковом члене, связанным с фазовым переходом Q_c^{MC} , доля жидкой фазы f_L рассчитывается по формуле [13]:

$$f_L = \max(\min(f_L^{old} + f_{Lrel} * Cp * (T - T^*) / L, 1), 0)$$

где $T^* = (T_l - T_s) * f_L + T_s$, f_L^{old} - доля жидкой фазы на предыдущем шаге по времени, Cp - теплоемкость, L - скрытая теплота плавления, T - температура, а f_{Lrel} - коэффициент нижней релаксации (используется значение $f_{Lrel} = 0.8$).

Для дискретизации и решения дифференциальных уравнений макромодели в программе используется метод конечных объёмов. Для дискретизации по времени используется неявная схема Эйлера первого порядка точности. Конвективные члены дискретизируются с использованием схемы с разностями против потока второго порядка точности, кроме уравнения на объёмную долю VOF - здесь используется схема ван Леера (van-Leer-TVD). Для диффузионных членов применяется схема центральных разностей. Полученные системы линейных алгебраических уравнений решаются итерационными методами (предобусловленные методы сопряженных и бисопряженных градиентов).

Поскольку при расчете не учитывается влияние газовой фазы на гидродинамику, и границы расчетной области находятся достаточно далеко от зоны воздействия ЛИ на материал, на всех границах устанавливалось условие отсутствия движения ($V=0$). Для давления на верхней границе расчетного объёма задавалось нулевое значение, а на остальных границах фиксировалось нулевое значение градиента. Также нулевое значение градиента устанавливалось на всех границах для полей температуры, концентрации, объёмной доли VOF и LS . Шаг по времени динамически подстраивался исходя из удовлетворения критерия Куранта-Фридрихса-Леви: $Co = U\Delta t / \Delta x < 0.3$. Итоговое значение временного шага принимало значения порядка $\Delta t \sim 1 \cdot 10^{-5} c$.

Для проведения расчетов использовалась блочно-структурная гексаэдрическая сетка. Сетка представлена на рис. 3. Расчетная область имеет размеры 12.6x10.1x9.45 мм. Центральная часть сетки размером 4.5x2x1.35 мм измельчена (подробная область) и состоит из почти кубических ячеек размером 50x50x48 мкм каждая. Это требуется для увеличения точности определения скоростей течения, расчета фазовых переходов, поглощения ЛИ и определения геометрии наплавленного валика. Внешняя часть сетки неравномерно разрежена по всем координатам, она сгущается по направлению к подробной области, в которой осуществляется инъекция порошка и воздействие ЛИ. Внешняя область сетки необходима для учета диффузионного оттока тепла в подложку. При этом в ней не происходит плавления и

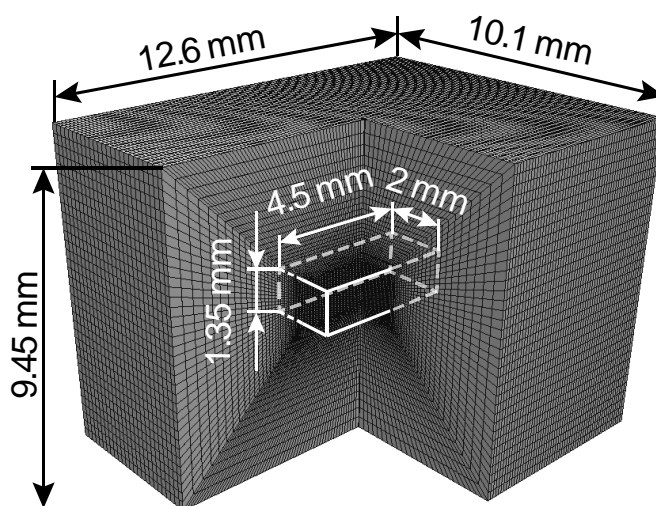


Рис.3. Общий вид расчетной сетки (передняя четверть удалена для наглядности) с обозначением подробной области (белые линии).

гидродинамических процессов. Возможная погрешность определения теплового поля на грубой сетке не влияет на корректность расчетов в подробной области и позволяет значительно сэкономить вычислительные ресурсы.

Динамика жидкой фазы и эволюция формы свободной поверхности ванны расплава при воздействии лазерного излучения и газопорошкового потока является выражено нестационарной. Переход к моделированию второй и последующих дорожек и слоёв исключает симметрию протекающих процессов. В этой связи моделированию подвергался полный объём интересующей области, без применения приближения симметрии.

Для определения оптимального количества ячеек при расчете процессов макромасштаба было проведено исследование сеточной сходимости численного решения. Процесс ЛС моделировался на 5 различных сетках. Самая грубая сетка содержала 144 тыс. ячеек (размер ячеек в подробной области 100x100x73 мкм), самая мелкая – 1.15 млн. ячеек (размер ячеек в подробной области 36x36x35 мкм). Исследовались зависимости максимальных регистрируемых значений температуры и скорости в ванне расплава от количества ячеек в сетке. При переходе от сетки №4 (794 тыс. ячеек) к сетке №5 (1.15 млн. ячеек) значения максимальной скорости изменяются менее чем на 6%, а максимальной температуры – менее чем на 4%. Длительность расчета на 32 вычислительных ядрах с использованием сетки №4 составляла 7.6 часов, а расчет на сетке №5 на 64 ядрах длился 11.4 часов. В результате для дальнейшего проведения вычислений была выбрана сетка №4, состоящая из 794 тыс. ячеек. Размер ячеек в подробной области – 50x50x48 мкм.

Для верификации учета в модели термокапиллярных сил, было проведено моделирование случая двухмерного термокапиллярного течения в прямоугольной каверне. В задаче определяются высоты на которые смещается уровень жидкости вдоль левой и правой стенки. Данный случай имеет аналитическое решение [14] на основе асимптотического приближения. Полученные расчетные величины находятся в допустимом диапазоне, обозначенном в аналитической модели.

Все расчеты по разработанной модели проводились на вычислительном кластере ИПЛИТ РАН.

4. Расчетные результаты

С использованием разработанного программного обеспечения, реализующего сформулированную в работе модель, было проведено численное моделирование ЛС при различных комбинациях параметров технологического процесса. При проведении расчетов предполагается, что инжектируемый порошок состоит из того же материала, что и подложка. В качестве свойств материала использовались данные, характерные для низкоуглеродистой стали (таблица 1). Мощность лазерного излучения варьировалась в пределах (0.9-1.4) кВт, а скорость сканирования подложки в пределах (6-10) мм/с. Массовый расход порошка устанавливался на 4 или 6 г/мин. Радиус лазерного пятна совпадал с радиусом струи порошка и был равен 0.6 мм. Распределение лазерной мощности по пятну в разных экспериментах выбиралось гауссово или типа «полочка». Распределение плотности потока массы в струе порошка считалось гауссовым. Параметры технологического процесса представлены в таблице 2.

На рис. 4-7 приведены отдельные результаты тестовых расчетов. Подробное описание результатов расчетов будет опубликовано в отдельной статье. Изображение общего вида образующегося валика и температурного поля на его поверхности в процессе обработки показаны на рис. 4а. Характерный вид 3D поля скоростей в ванне расплава представлен на рис. 4б.

В ходе процесса ЛС под действием капиллярных и термокапиллярных сил, а также подачи порошка в ванне расплава формируется определённая структура течений. Конвективные потоки играют важную роль в перераспределении температуры и примеси и определяющим образом влияют на форму ванны расплава. Они участвуют в передаче поглощенной энергии ЛИ с поверхности к боковым стенкам и дну ванны, могут интенсифицировать или замедлять теплопередачу и, как следствие, влиять на эффективность проплавления и затвердевания стенок ванны. На рис. 5 представлена картина развитой структуры течений с образованием вихрей в продольном и поперечном сечениях.

На рис. 6 представлены зависимости геометрических характеристик валика от параметров технологического процесса ЛС. Результаты приведены для условий массового расхода 4 г/мин и гауссова распределения в пучке. Высота валика уменьшается с ростом скорости сканирования и увеличивается с ростом энергоклада. Такое поведение сохраняется независимо от массового расхода и профиля мощности. Ширина валика сохраняется примерно постоянной при варьировании скорости сканирования и немонотонно зависит от мощности. При гауссовом распределении мощности ширина валика увеличивается с 0.9 кВт до 1.15 кВт, затем снижается на 1.4 кВт. При распределении мощности «полочка» - увеличение мощности с 1.15 кВт до 1.4 кВт не приводит к увеличению ширины валика.

При заглоблении ванны расплава в подложку имеющаяся в ней примесь захватывается конвективными потоками, смешивается с поступающим материалом и перераспределяется по объёму валика. Итоговый профиль примеси может быть использован для формулировки критерия контакта наплавленного валика с подложкой, определяющего функциональное качество синтезируемого изделия. На рис. 7 представлен характерный случай динамики поля концентрации в процессе ЛС. Видно, что картина распределения примеси, хоть и меняясь по структуре, в достаточной степени охватывает наплавленный объём, что свидетельствует о хорошем взаимопроникновении и контакте материалов валика и подложки.

Таблица 1. Свойства материала подложки и порошка

Кинематическая вязкость	м ² /с	7.67·10 ⁻⁷
Термический коэффициент поверхностного натяжения	Н/(м·°К)	4.9·10 ⁻⁴
Поверхностное натяжение	Н/м	1.65
Плотность твердой фазы	кг/м ³	7870
Удельная теплоёмкость твердой фазы	Дж/(кг·°К)	658.6
Теплопроводность твердой фазы	Вт/(м·°К)	34
Плотность жидкой фазы	кг/м ³	6518.5
Удельная теплоёмкость жидкой фазы	Дж/(кг·°К)	804
Теплопроводность жидкой фазы	Вт/(м·°К)	36
Температура плавления	°К	1809
Скрытая теплота плавления	Дж/кг	2.72·10 ⁵

Таблица 2. Параметры технологического процесса

Мощность лазерного излучения	Вт	900; 1150; 1400
Форма распределения мощности в лазерном пучке		Гаусс; «полочка»
Радиус лазерного пучка	мм	0.6
Скорость сканирования	мм/с	6; 8; 10
Массовый расход порошка	г/мин	4; 6
Коэффициент захвата порошка		0.4
Форма распределение плотности потока массы в струе порошка		Гаусс
Радиус струи порошка	мм	0.6
Концентрация примеси в подложке		0.11

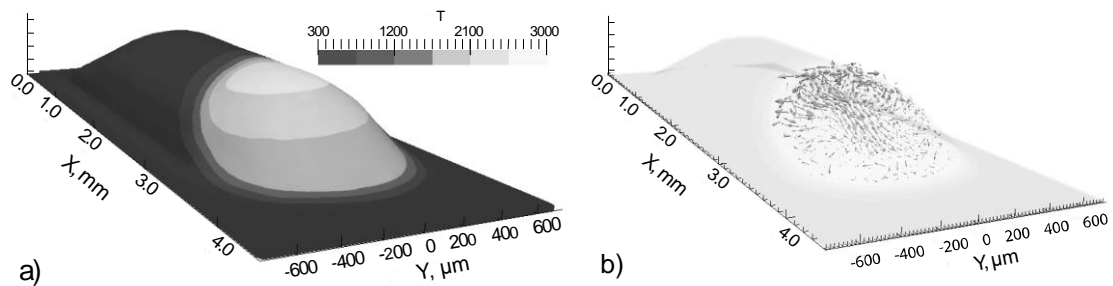


Рис. 4. Внешний вид формируемого валика в процессе ЛС. а) распределение температуры на поверхности; б) поле скоростей в расплаве.

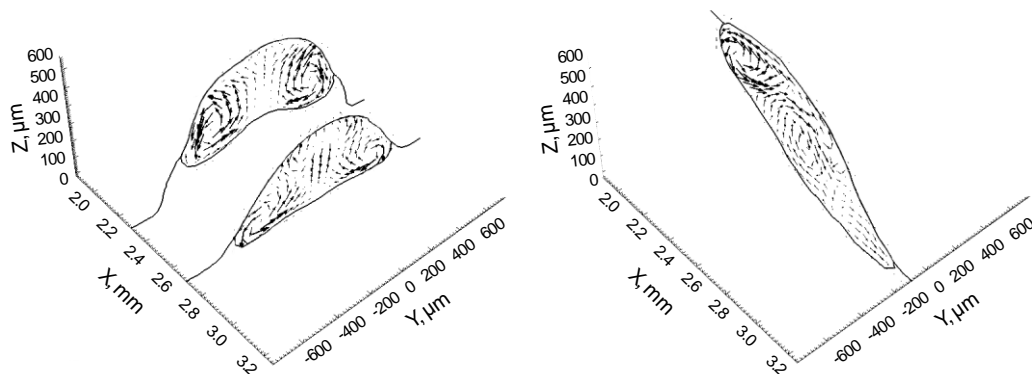


Рис. 5. Поля скоростей в ванне расплава (сечения YZ и XZ). Параметры процесса: P=1400 Вт, V_s=6 мм/с, ṁ=4 г/мин, «полочка».

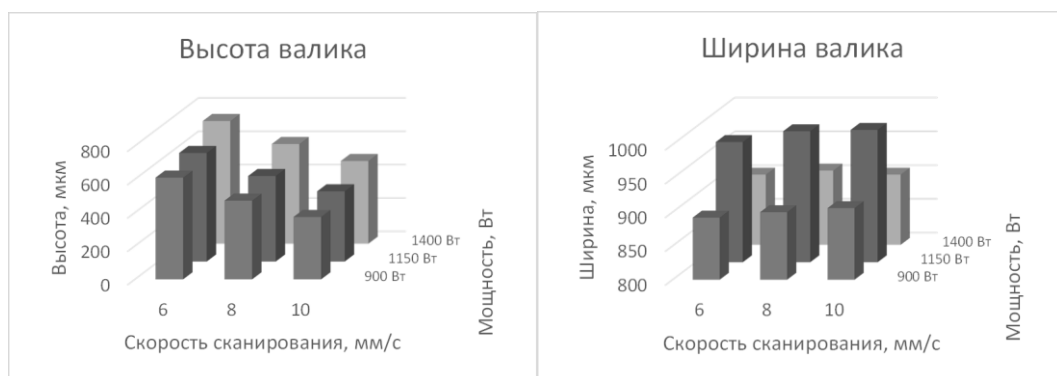


Рис 6. Зависимость геометрических характеристик валика от скорости сканирования и мощности лазерного излучения. Массовый расход порошка: 4 г/мин; гауссово распределение мощности в пучке.

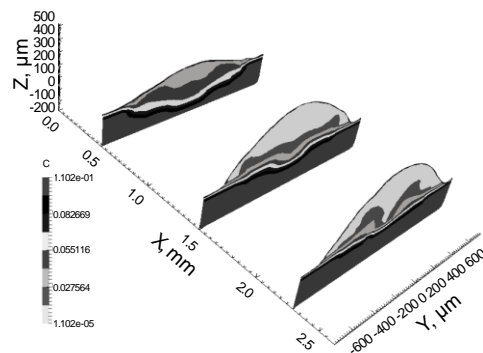


Рис 7. Распределение примеси в трех поперечных сечениях валика: $x = 0.5$ мм, 1.5 мм, 2.3 мм. Параметры процесса: P=1150 Вт, $V_s=10$ мм/с, $\dot{m}=4$ г/мин, гаусс; б) P=900 Вт, $V_s=8$ мм/с, $\dot{m}=4$ г/мин, гаусс.

5. Заключение

Проведено 3D численное моделирование макропроцессов теплопереноса и конвекции при ЛС с коаксиальным вводом порошков в зону действия луча. Исследование проведено на основе математической модели, включающей совместную динамику свободной поверхности расплава, тепломассопереноса и гидродинамики. Она самосогласованно учитывает распределение температуры и концентрации компонентов, конвективное движение расплава, добавление массы порошка в зону сплавления. Эволюция свободной поверхности моделируется с использованием комбинированного *VOF* и *LS* метода. Разработаны 3D вычислительные алгоритмы и описывающие их компьютерные программы для исследования макропроцессов сопряженных процессов термокапиллярной конвекции и тепломассопереноса в зависимости от технологических параметров (сканирования, мощность луча, скорость потока массы порошка) проведения процесса ЛС. При численной реализации расчетного алгоритма макромоделю применялся метод конечных объемов. Компьютерная программа расчета основных макрохарактеристик ЛС создана на языке программирования C++ с использованием открытого пакета вычислительных библиотек и утилит OpenFOAM и ориентирована на высокопроизводительные вычислительные кластеры. Проведена верификация термокапиллярного течения со свободной границей по аналитической модели. Приводятся результаты тестовых расчетов полей температуры, структуры конвективных течений расплава, распределения примеси и геометрических характеристик формируемого объекта.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-11-10342).

Литература

- [1] Панченко, В. Я. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / В. Я. Панченко, В. С. Голубев, В. В. Васильцов и др. – Москва: Физматлит, 2009. – 664 с.
- [2] Шишковский, И.В. Лазерный синтез функциональных мезоструктур и объемных изделий / И.В. Шишковский – Москва: Физматлит, 2009. – 424 с.
- [3] Gladush, G. G. Physics of Laser Materials Processing: Theory and Experiment / G. G. Gladush, I. Smurov – Berlin: Springer-Verlag. 2011. – 534 p.
- [4] Han, L. Modeling of Laser Cladding with Powder Injection / L. Han, F.W. Liou, K.M. Phatak. // Metall. Trans. B – 2004 – Vol. 35B, P. 1139-1150.
- [5] Frenk, A. Analysis of the laser-cladding process for stellite on steel / Frenk, A., Vandyoussefi, M., Wagniere, J. D., Kurz, W., Zryd, A. // Metallurgical and Materials transactions B. – 1997. – Vol. 28(3). – P. 501-508.
- [6] Osher, S. Fronts propagation with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations / S. Osher, J.A. Sethian // J. Comput. Phys. – 1988. – Vol. 79. – P. 12-49.
- [7] Olsson, E. A conservative level set method for two phase flow / E. Olsson, G. Kreiss G. // J. Comput. Physics. – 2005. – Vol. 210. – P. 225-246.
- [8] Hirt, C. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries / C. Hirt, B. Nichols // J. Comput. Phys. – 1981. – Vol. 39. – P. 201-225.
- [9] Bennon, W. D. A continuum model for momentum, heat and species transport in binary solid-liquid phase change systems - I. Model formulation / W. D. Bennon, F. P. Incropera // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1987. – Vol. 30. – P. 2161.
- [10] Marquez Damian S. An Extended Mixture Model for the Simultaneous Treatment of Short and Long Scale Interfaces: Doctor Thesis / S. Marquez Damian – Santa Fe: Universidad Nacional Del Litoral, 2013. – 231 p.
- [11] Albadawi, A. Influence of surface tension implementation in volume of fluid and coupled volume of fluid with level set methods for bubble growth and detachment / A. Albadawi, D. B. Donoghue, A. J. Robinson, D. B. Murray, Y. M. C. Delauré // International Journal of Multiphase Flow. – 2013. – Vol. 53. – P. 11-28.
- [12] Yokoi, K. A density-scaled continuum surface force model within a balanced force formulation / K. Yokoi // Journal of Computational Physics. – 2014. – Vol. 278. – P. 221-228.
- [13] Voller, V. R. General source-based method for solidification phase change / V. R. Voller, C. R. Swaminathan // Numerical Heat Transfer B. – 1991. – Vol. 19. – P. 175-189.
- [14] Sen, A.K. Steady thermocapillary flows in two-dimensional slots / A.K. Sen, S.H. Davis // Journal of Fluid Mechanics. – 1982. – Vol. 121. – P. 163-186.