

# Планирование и оптимизация лазерной наплавки с учетом влияния гидродинамики и геометрии теплоотвода деталей

В.Г.Низьев, М.Д.Хоменко, Ф.Х.Мирзаде

*Разработана гидродинамическая модель, позволяющая планировать процесс лазерной наплавки, учитывая специфику теплоотвода деталей. Для прямого моделирования процесса используется открытый пакет вычислительной гидродинамики OpenFoam. Рассмотрены типичные ситуации теплоотвода при создании трехмерных деталей: наплавление на массивную подложку, на край массивной детали и на тонкую стенку. Найдены режимы управления мощностью лазерного излучения при изменении условий теплоотвода. Показана возможность качественной наплавки при малых радиусах разворота.*

**Ключевые слова:** прямое численное моделирование, лазерная наплавка, геометрия теплоотвода.

## 1. Введение

Лазерная наплавка (ЛН) является перспективной аддитивной технологией выращивания и ремонта трехмерных металлических изделий. Этот процесс осуществляется при больших градиентах температуры в зоне взаимодействия [1]. Качество металла после такой технологической операции часто оказывается низким; могут возникать остаточные напряжения, поры, трещины и другие дефекты. Детали высокого качества могут быть выращены только при тщательно подобранных параметрах процесса, таких как мощность лазерного излучения (ЛИ), скорость сканирования пучка, массовый расход порошка и др.

Часто для стабилизации процесса используются системы с обратной связью, которые на основе информации о ванне расплава в режиме реального времени управляют мощностью излучения, скоростью сканирования пучка или подачей порошка [2]. Чаще всего работа таких систем основана на показаниях пирометров и направлена на поддержание температуры плавления [3], параметров ванны расплава [4] или микроструктуры получаемых слоев [5]. Однако эти системы имеют конечное время реагирования и требуют тщательной настройки, поэтому их сочетание с выверенным планированием процесса является залогом успешной наплавки.

Прямое численное моделирование позволяет эффективно исследовать [6, 7] и планировать процессы аддитивного производства, настраивая параметры как установок, так и систем обратной связи [8]. Поток энергии в зону наплавки складывается из доли энергии ЛИ, прошедшего через дисперсную среду до подложки, и энергии, переносимой частицами, нагретыми излучением в процессе их транспортировки от сопла до мишени [9].

**В.Г.Низьев, М.Д.Хоменко, Ф.Х.Мирзаде.** Институт проблем лазерных и информационных технологий, филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Россия, Московская обл., 140700 Шатура, ул. Святоозерская, 1; e-mail: hmd@laser.ru

Поступила в редакцию 19 апреля 2018 г., после доработки – 23 мая 2018 г.

Гидродинамический перенос является основным механизмом отвода энергии ЛИ внутри ванны расплава и определяет форму наплавленного валика, поэтому его учет важен для лазерных аддитивных технологий прямого нанесения. Однако теплоотвод в твердой подложке, внешний по отношению к ванне расплава, также имеет большое значение. В частности, при ЛН валиков с низкой степенью перемешивания этот механизм диссипации лазерной энергии может быть доминирующим, а гидродинамическим переносом в ванне расплава часто пренебрегают [10].

При выращивании и ремонте деталей со сложной геометрией можно выделить ряд типичных элементов с существенно различающимися условиями теплоотвода из зоны обработки. Чаще всего встречаются исследования ЛН единичных дорожек на массивную подложку [11]. Есть также работы по выращиванию тонких стенок, например в [12] показано, что дно ванны расплава в случае наплавления тонкой стенки меняет форму. Расширение представлений о влиянии геометрии теплоотвода на оптимальные параметры процесса является актуальной задачей.

Цель настоящей работы – развитие гидродинамических моделей ЛН на основе открытого пакета OpenFoam, а также планирование и оптимизация процесса наплавки с учетом изменения геометрии теплоотвода. Исследовано несколько типичных условий теплоотвода для массивной подложки, ее края и тонкой стенки.

## 2. Физическая модель

Рассматривается тепломассоперенос в многофазной системе газ–жидкий металл–твердая подложка. Поскольку в ванне расплава имеет место ряд взаимосвязанных процессов тепломассопереноса, решалась самосогласованная система уравнений теплопроводности с фазовыми превращениями и гидродинамики, а также уравнение для эволюции свободной границы. Мы ограничиваемся режимами лазерного воздействия, в которых не происходит стекания материала с основы. Для слежения за свободной границей раздела металл–газ используется метод, подобный VOF [13]. В [14] показано, что этот метод хорошо ра-

ботаает для многофазных сред с термокапиллярными силами на достаточно мелких сетках. Для согласования уравнения моментов и давления применяется алгоритм PISO [15]. Систему уравнений развитой самосогласованной модели ЛН можно представить в виде

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

(уравнение непрерывности),

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + c\rho \operatorname{div}(\mathbf{u}T) = \operatorname{div}(\lambda \nabla T) + q\delta\alpha + \rho(1 - f_{\text{liq}})\Delta c \frac{\partial T}{\partial t} - \rho L \frac{\partial f_{\text{liq}}}{\partial t} \quad (2)$$

(уравнение теплопроводности),

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}u_i) = \operatorname{div}(\mu \nabla u_i) - \frac{C_{\text{big}}(1 - f_{\text{liq}})^2}{f_{\text{liq}}^3 + C_{\text{small}}} u_i - \frac{\partial p}{\partial i} + \sigma \kappa \frac{\partial \alpha}{\partial i} + \left[ \frac{\partial T}{\partial i} - \mathbf{n} \left( \mathbf{n} \frac{\partial T}{\partial i} \right) \right] \frac{\partial \sigma}{\partial T} \delta \alpha \quad (3)$$

(уравнение количества движения),

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{u}\alpha) = q_{\text{powder}} |\nabla \alpha| \quad (4)$$

(уравнение для свободной поверхности). Здесь  $p$  – давление;  $T$  – температура;  $c$ ,  $\rho$  и  $\lambda$  – соответственно теплоемкость, плотность и теплопроводность многофазной среды;  $\Delta c$  – разность теплоемкостей твердой и жидкой фаз;  $L$  – скрытая теплота фазового перехода;  $f_{\text{liq}}$  – объемная доля жидкой фазы (линейно растет от нуля до единицы между температурами солидуса и ликвидуса [16]);  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкой фазы;  $u_i$  – компоненты скорости жидкости  $\mathbf{u}$ ;  $i = x, y, z$ ;  $\mu$  – вязкость;  $\alpha$  – VOF-функция для свободной поверхности;  $\mathbf{n}$  – нормаль к свободной поверхности;  $\kappa$  – кривизна свободной поверхности;  $C_{\text{big}} = 10^{10} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $C_{\text{small}} = 10^{-10}$  – константы.

В уравнении (2) два последних слагаемых в правой части связаны с фазовыми превращениями, а для источника  $q$ , учитывающего воздействие ЛИ и добавляемого порошка, а также конвективное охлаждение потоком газа, можно записать выражение

$$q = \alpha_{\text{beam}} q_{\text{laser}} + c\rho(T - T_{\text{powder}})q_{\text{powder}} + k_c(T - T_0), \quad (5)$$

где  $\alpha_{\text{beam}}$  – коэффициент поглощения ЛИ;  $q_{\text{laser}}$  – интенсивность ЛИ;  $T_{\text{powder}}$  и  $T_0$  – температуры добавляемого порошка и окружающего газа соответственно;  $k_c$  – коэффициент конвективного теплообмена.

Второе слагаемое в правой части уравнения (3) учитывает торможение движения жидкости на твердой границе, которая моделируется как пористая среда [16]. Последнее слагаемое в (3) – это источники, связанные с действием капиллярной и термокапиллярной сил [17]. Считается, что свободная поверхность движется по нормали со скоростью  $q_{\text{powder}}$ , связанной с добавлением порошка. В рамках настоящей модели захват порошка происходил в жидкой ванне расплава:

$$q_{\text{powder}} = F_{\text{liq}}(x, y, z) \frac{\alpha_p \dot{m}}{\pi \rho R_{\text{jet}}^2}, \quad (6)$$

где  $F_{\text{liq}}$  – флаг состояния подложки ( $F_{\text{liq}} = 1$  на жидкой подложке и  $F_{\text{liq}} = 0$  на твердой подложке);  $\alpha_p$  – коэффициент эффективности улавливания;  $\dot{m}$  – скорость подачи порошка;  $R_{\text{jet}}$  – радиус потока порошка на подложке. Для моделирования различной геометрии теплоотвода используются начальные условия взаимного расположения фаз при начальной температуре  $T_0 = 300 \text{ К}$ . Такая постановка задачи не учитывает нагрев детали от наплавки предыдущих слоев и оправдана при достаточной длине детали, которая успевает остыть за время обхода одного слоя. Учет влияния нагрева предыдущих слоев может осуществляться путем изменения начальной температуры детали.

### 3. Алгоритм расчета

Система уравнений математической модели ЛН решается с использованием открытого пакета OpenFoam 2.3x. Основная часть кода решателя написана на языке C++ в операционной системе Linux. В металле можно выделить три зоны: твердую, жидкую и переходную. Коэффициенты в уравнениях (2) и (3) (теплоемкость, плотность, теплопроводность и вязкость) рассчитываются по значениям объемной доли жидкой фазы  $f_{\text{liq}}$  и функции  $\alpha$  в каждой точке:

$$\begin{aligned} c &= [c_s(1 - f_{\text{liq}}) + c_{\text{liq}}f_{\text{liq}}]\alpha + c_g(1 - \alpha), \\ \lambda &= [\lambda_s(1 - f_{\text{liq}}) + \lambda_{\text{liq}}f_{\text{liq}}]\alpha + \lambda_g(1 - \alpha), \\ \rho &= \rho_m\alpha + \rho_g(1 - \alpha), \\ \mu &= \mu_m\alpha + \mu_g(1 - \alpha), \end{aligned} \quad (7)$$

где индексы s и liq соответствуют твердой и жидкой фазам, m и g – металлу и газу. Значения параметров определены в центрах ячеек; важной особенностью настоящей работы является использование гармонической интерполяции при расчете плотности на границах для конвективных членов. Линейная интерполяция приводит к чрезмерному «размыванию» граничных эффектов на стенках. Для автоматического нахождения границы применяются скрипты ruFoam и линейная интерполяция границ. Границей высоты наплавки остывшего валика считается уровень  $\alpha = 0.51$ , а границей ванны расплава – уровень  $f_{\text{liq}} = 0.49$ . Сетка создавалась с помощью встроенной в openFoam утилиты blockMesh. Используемая параметризованная сетка состоит из ортогональной густой зоны ( $6.75 \times 5.7 \times 2.5 \text{ мм}$ ) с шагом 0.05 мм по всем координатам и разреженных областей, окружающих ее со всех сторон. Для моделирования поворота на цилиндрической стенке также была опробована сетка из сшитых ортогональных и цилиндрических областей. Результаты расчета для такой сетки не отличались от результатов, полученных для ортогональной сетки, и поэтому здесь не приводятся.

### 4. Результаты

С помощью разработанной программы были проведены исследования коаксиальной ЛН порошка Ni на различные детали. Основные теплофизические параметры материалов, использованные в расчетах, представлены ниже.

Теплопроводность (Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>):

- твердая фаза . . . . . 11
- жидкая фаза . . . . . 24
- газ . . . . . 0.03

Плотность (кг/м<sup>3</sup>):

- металл . . . . . 7130
- газ . . . . . 1

Удельная теплоемкость (Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>):

- твердая фаза . . . . . 419
- жидкая фаза . . . . . 754
- газ . . . . . 1008

Динамическая вязкость (м<sup>2</sup>/с):

- жидкая фаза . . . . .  $6.872 \times 10^{-7}$  [18]
- газ . . . . .  $1.48 \times 10^{-5}$

Поверхностное натяжение жидкой фазы (Н/м) . . . . . 1.778 [18]

Градиент поверхностного натяжения (мН·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>) . . . . . -0.38 [18]

Коэффициент поглощения . . . . . 0.45

Температура солидус (К) . . . . . 1483

Температура ликвидус (К) . . . . . 1583

Скрытая теплота фазового перехода (кДж/кг) . . . . . 227

Табл.1. Карта процесса ЛН.

Параметры в стационарных условиях	CASE1		CASE2		CASE3	
	1	2	1	2	1	2
$V_{scan}$ (мм/с)	20	10	20	10	20	10
$\dot{m}$ (г/мин)	2	1	2	1	2	1
$P$ (Вт)	120	95	110	85	100	75
Ширина валика $W$ (мм)	0.83	0.82	0.81	0.82	0.8	0.89
Длина ванны расплава (мм)	1.7	1.52	1.5	1.53	2.1	1.99
Высота валика $H$ (мкм)	200	199	166	195	188	190
Глубина проплавления (мкм)	80	94	76	89	110	165
Коэффициент улавливания (%)	69	74	68	74	64	70

Диапазоны исследованных технологических параметров таковы: мощность ЛИ  $P = 70 - 150$  Вт, скорость сканирования  $V_{scan} = 10$  и  $20$  мм/с, скорость подачи порошка  $\dot{m} = 1 - 5$  г/мин, радиус лазерного пучка  $R_{beam} = 0.4$  мм, радиус потока порошка  $R_{jet} = 0.5$  мм. Использовались следующие схемы наплавки: на массивную деталь (CASE1), при повороте на массивной детали (CASE1a), на край массивной детали высотой 2 мм (CASE2), на угол массивной детали (CASE2a), на тонкую стенку высотой 2 мм и шириной 1 мм (CASE3), при повороте на тонкой стенке (CASE3a) и при повороте с критическим радиусом на тонкой стенке (CASE3б). Порошок подается при температуре  $T_{powder} = 1000$  К соосно с ЛИ, которое имеет поперечное распределение интенсивности topHat. В начальный момент времени лазерный пучок движется в положительную сторону оси  $x$ , а после достижения стационарных значений параметров наплавки осуществляется маневр (разворот или поворот пучка).

геометрий теплоотвода при условии наплавления одинаковых валиков ( $H \approx 200$  мкм,  $W \approx 0.81$  мм). На рис.1 показаны распределения высоты наплавленного слоя в схемах CASE1 и CASE2. Здесь и на последующих рисунках черной линией обозначена граница ванны расплава, белой окружностью – граница лазерного пучка, а белым контуром показан край детали. При наплавлении на массивную подложку (CASE1) теплоотвод в полубесконечное пространство металла подложки наиболее эффективен, поэтому для поддержания температуры плавления необходима максимальная мощность ЛИ. При движении пучка по краю массивной детали эффективность теплоотвода хуже (CASE2) из-за низкой теплопроводности воздуха.

Разработана карта процесса (табл.1), показывающая, какие параметры воздействия требуются для различных

На рис.2,а, б показаны температурные поля в продольном сечении по центру пучка для двух случаев теплоотвода, а на рис.2,в,г приведены линии тока и модули скоростей течения расплава в тех же условиях. Видно, что основной источник течения расплава находится сразу за пучком (показан тонкой белой линией). Это связано с большим градиентом температуры в этом месте для пучка с поперечным распределением интенсивности излучения topHat. Ванна расплава ощутимо вытянута в случае наплавки на тонкую стенку при одинаковых параметрах процесса. При этом линии тока развиты и модуль скорости течения расплава большой, что говорит о преобладающем влиянии поверхностного гидродинамического переноса тепла в схеме CASE3.

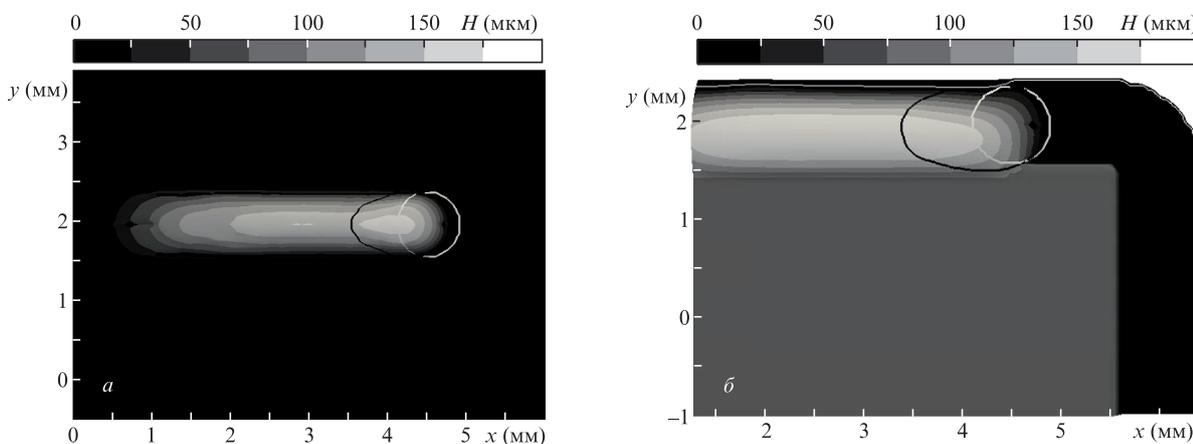


Рис.1. Распределения высоты наплавленного валика  $H$  для схем теплоотвода CASE1 (а) и CASE2 (б). Параметры расчета:  $V_{scan} = 10$  мм/с,  $\dot{m} = 1$  г/мин,  $t = 400$  мс (значения мощности даны в табл.1).

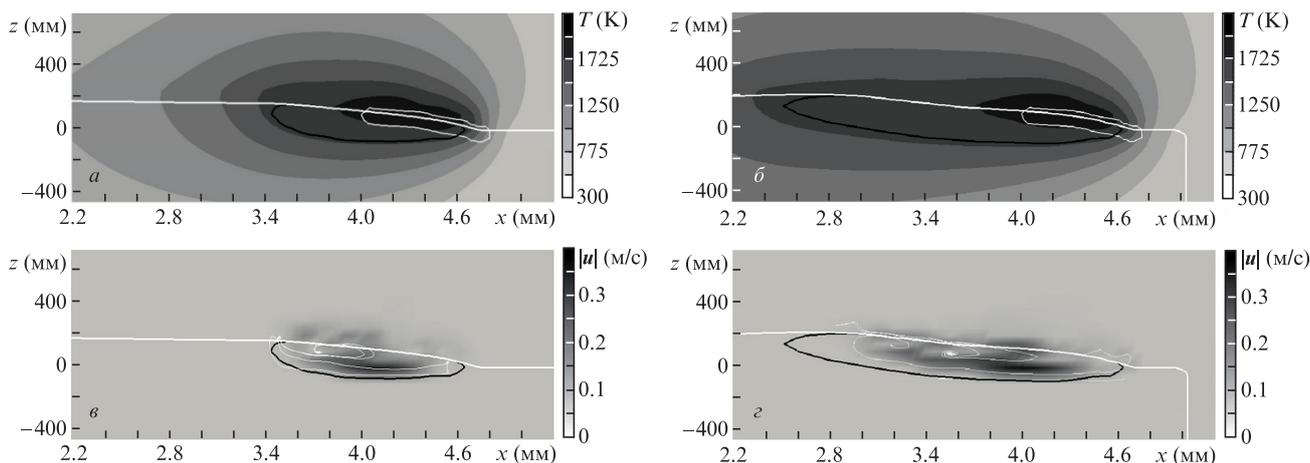


Рис.2. Температурное поле (*a, б*) и модуль скорости течения расплава (*в, г*) для одинаковых параметров процесса при наплавке на массивную подложку (*a, в*) и тонкую стенку (*б, г*). Белая линия – граница раздела металла и газа, черная – граница ванны расплава. Тонкими белыми линиями показана граница лазерного пучка (*a, б*) и линии тока (*в, г*). Параметры расчета:  $P = 100$  Вт,  $V_{\text{scan}} = 20$  мм/с,  $\dot{m} = 2$  г/мин,  $t = 200$  мс.

В случае наплавания на тонкую стенку (CASE3) эффективность внешнего теплоотвода снижается по сравнению со схемой CASE1; теплоотвод становится двумерным и направленным вдоль стенки (градиента температуры по ширине практически нет). Оптимальная мощность излучения для наплавки сравнимых по параметрам валочков исследуемого материала на 30% меньше, чем при наплавке на массивную подложку. На рис.3 показаны температурные поля при различных геометриях теплоотвода. Скорость сканирования достаточно высокая, поэтому поперечный размер зоны нагрева сравнительно мал, а ширина ванны расплава фактически совпадает с шириной пучка ЛИ. Поэтому в отсутствие теплоотвода в одну из сторон (CASE2) требуемая мощность снижается на 10%–15%, а в отсутствие теплоотвода в обе стороны (CASE3) – еще на 10%–15%. При меньшей скорости сканирования, когда теплоотвод в сторону больше, эффект усиливается, а при ширине ванны расплава, намного превышающей ширину пучка ЛИ, близость края подложки будет приводить к кардинальному изменению оптимальных параметров ЛИ.

Количество захваченного порошка определяется временем жизни ванны расплава в данной точке и распределением плотности потока порошка. Интегральным критерием захвата порошка является отношение количества захваченного порошка к суммарному количеству подаваемого порошка – эффективность улавливания порошка. На рис.4 показана динамика основных параметров наплавки при маневрах. Разрыв на кривой для ширины ванны расплава соответствует повороту, когда ширина имеет неопределенное значение. Эффективность улавливания порошка довольно высокая ( $\sim 0.8$ ). Для ее повышения важна как ширина ванны расплава, так и ее перекрытие с потоком порошка. Отметим, что при маневре эффективность улавливания порошка увеличивается благодаря этим двум факторам.

Маневры с увеличением плотности поглощенной мощности при торможении приводят к росту геометрических размеров валика и необходимости изменения параметров сканирования для исправления дефектов. Этот эффект еще более ощутим в случае маневров с остановкой, когда еще в большей степени требуется адаптация остальных параметров. Если замедление по одной координате ком-

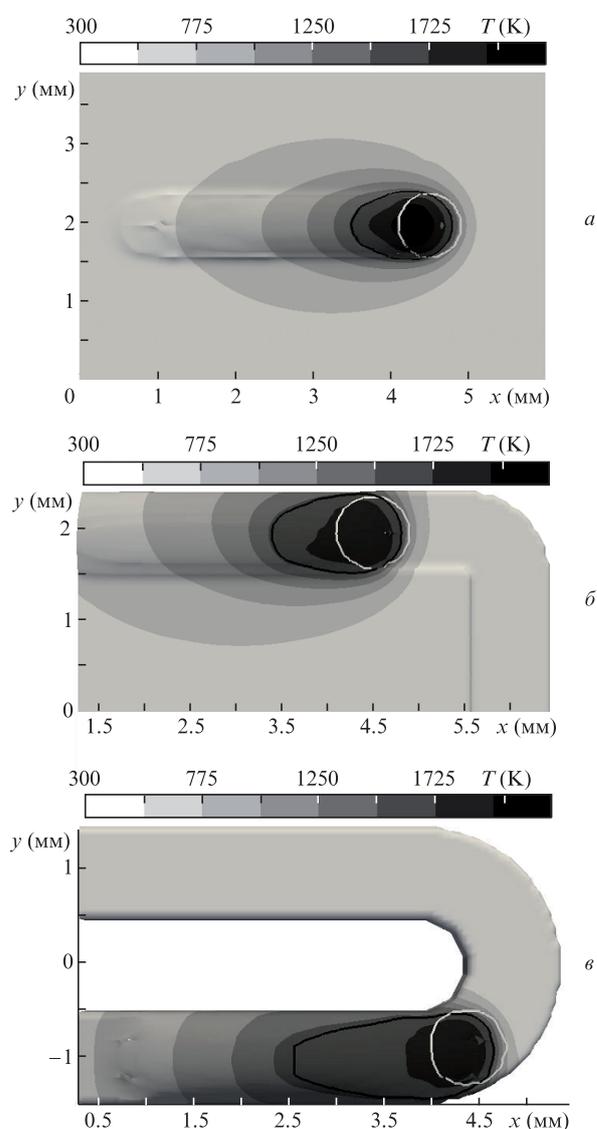


Рис.3. Распределения температуры наплавленного валика для исследуемых условий теплоотвода: на массивной подложке (*a*), на краю массивной детали (*б*) и на тонкой стенке (*в*). Параметры расчета:  $t = 400$  мс,  $V_{\text{scan}} = 10$  мм/с,  $\dot{m} = 1$  г/мин.

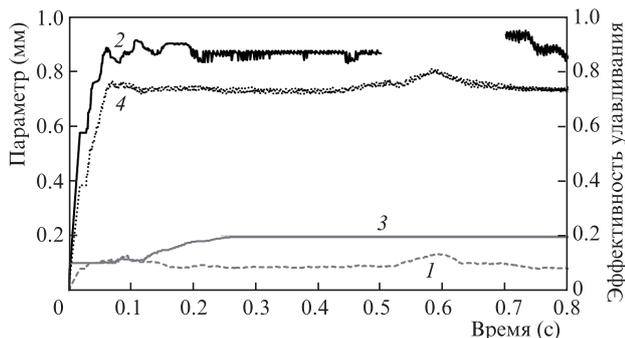


Рис.4. Динамика основных параметров наплавки (CASE2a,  $P = 85$  Вт,  $V_{scan} = 10$  мм/с,  $\dot{m} = 1$  г/мин): глубины проплавления (1), ширины ванны расплава (2), высоты наплавки (3) и эффективности улавливания (4).

пенсруется ускорением по другой и поддерживается постоянная линейная скорость, то плотность поглощенной мощности не увеличивается, и параметры валика остаются неизменными (рис.5). При большой скорости сканирования температурное поле в направлении движения пучка практически не выходит за его границу, поэтому параметры ванны расплава при приближении пучка к углу детали изменяются незначительно. Во время маневра по углу детали с малым радиусом поворота  $R$  внутренние области поглощают большие доли ЛИ и порошка, что обуславливает локальное увеличение поглощенной мощности и ширины ванны расплава. Соответствующее увеличение коэффициента улавливания может вызывать увеличение высоты валика, однако гидродинамическое перемешивание приводит к компенсации «лишней» высоты за счет ширины валика (рис.4). Видно, что его ширина даже после поворота несколько больше, а высота не меняется на всем протяжении дорожки.

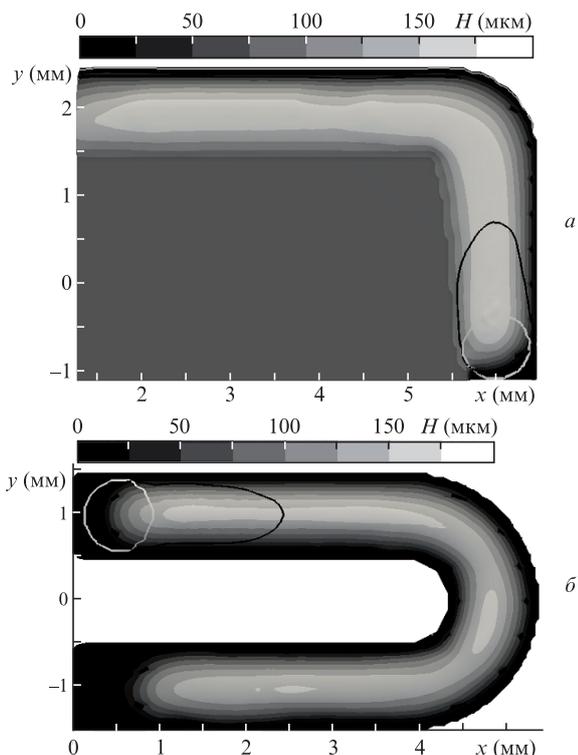


Рис.5. Маневры при постоянной скорости сканирования по углу массивной детали CASE2a (а) и на тонкой стенке CASE3a (б).

Для увеличения эффективности процесса часто используется максимально возможная скорость сканирования, однако при выборе параметров следует учитывать ограничение на максимальное ускорение ( $a = V^2/R$ ) при маневрах. Для поворота при постоянной скорости  $V_{scan} = 20$  мм/с по радиусу  $R = 1$  мм требуется, чтобы приводы обеспечивали ускорение  $a = 400$  мм/с<sup>2</sup>, что невозможно для многих отечественных и зарубежных приводов. Фактически существует критический радиус окружности, которую можно «обработать» при текущей скорости сканирования. Если требуется выполнить маневр с радиусом поворота меньше критического, скорость сканирования приходится снижать до начала маневра. При сохранении прочих условий наплавки это ведет к изменению параметров валика. Данный эффект еще более ощутим при маневрах с остановкой (при радиусе разворота, стремящемся к нулю). На рис.6,а показано изменение скорости сканирования при маневре с радиусом меньше (сплошные кривые) и больше (штриховые кривые) критического.

При снижении скорости сканирования поглощенная мощность на единицу поверхности увеличивается, что приводит к нежелательным последствиям (рис.6,б). На заднем плане рис.6,б радиус поворота оказывается больше критического и «отрабатывается» успешно, а на ближнем плане показан острый угол с радиусом поворота  $R \rightarrow 0$  и виден дефект. На рис.7 представлены результаты расчетов наплавки при адаптации технологических параметров. При маневре с пониженной скоростью без изменения массового расхода и мощности излучения ширина и высота валика увеличиваются по сравнению с таковыми в случае стационарного движения. Увеличение расхода порошка на единицу поверхности вызывает увеличение высоты валика, а повышение поглощенной плотности мощ-

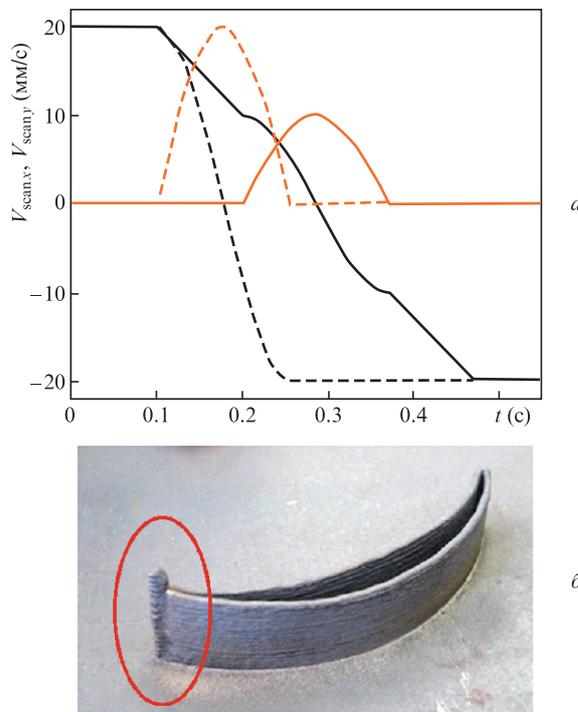


Рис.6. Компоненты скорости сканирования  $V_{scan,x}$  (черные кривые) и  $V_{scan,y}$  (серые кривые) при повороте с радиусом больше (штриховые кривые) и меньше (сплошные кривые) критического радиуса ( $V_{scan} = 20$  мм/с) (а), а также дефект при изготовлении лопатки турбины на американской установке Optomec (б). Продольный размер лопатки 5 см.

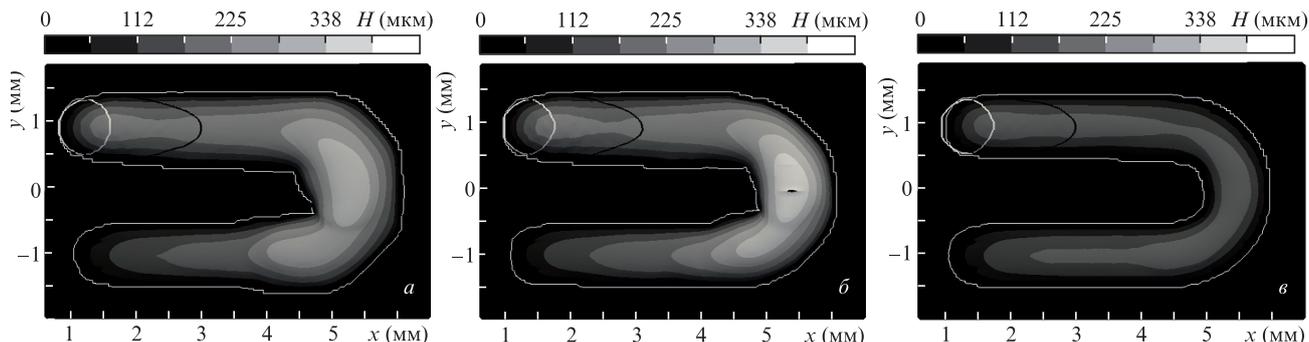


Рис.7. Поворот с радиусом меньше критического и пониженной скоростью сканирования по массивной подложке: без адаптации параметров (а), со снижением мощности (б) и со снижением мощности и расхода (в).

ности – растекание расплава на большую ширину. Расчеты показали (рис.7,б), что для исправления ситуации недостаточно одного лишь снижения мощности ЛИ до определенных оптимальных значений (табл.1). В этом случае ширина валика немного уменьшается, а высота увеличивается, степень растекания снижается, а поглощенное количество порошка сохраняется, что и обуславливает еще большее увеличение высоты. Для наплавки бездефектных дорожек необходимо уменьшить как мощность излучения, так и скорость подачи порошка (рис.7,в). Алгоритм такого управления зависит от радиуса поворота, скорости сканирования и геометрии теплоотвода и должен опираться на карту процесса, из которой выбираются оптимальные параметры для текущей скорости (табл.1).

Оптимизация параметров процесса может осуществляться путем использования как устройств с обратной связью, так и упреждающей стратегии управления. Получив динамику параметров валика из модельных расчетов, можно заранее корректировать параметры процесса так, чтобы отклонения от заданных параметров валика были минимальными.

## 5. Выводы

Разработана гидродинамическая модель ЛН на основе открытого пакета вычислительной гидродинамики OpenFoam. Она позволяет планировать процесс, учитывая специфику лазерного воздействия при создании трехмерных деталей. Движение расплава, включенное в численную модель наплавки, оказывает существенное влияние на соотношение высоты и ширины валика при разных режимах обработки.

Рассмотрены типичные ситуации теплоотвода: наплавление на массивную подложку, на край массивной детали или на тонкую стенку. Создана карта процесса для наплавления валиков одинакового размера. Численно найдены режимы изменения мощности ЛИ для поддержания постоянной высоты валика при различных маневрах.

Системы сканирования реальных установок имеют конечное допустимое значение ускорения. Это приводит к минимально возможному радиусу поворота, при котором линейная скорость постоянна; при меньших радиусах она должна изменяться. Показано, что для поддержания постоянными ширины и высоты валика при маневре с радиусом меньше критического и пониженной скоростью необходимо снижать как мощность излучения, так и скорость подачи порошка. Подобраны параметры

процесса для исправления негативных эффектов, связанных с торможением на таких резких поворотах.

Согласование полученных параметров с определенными экспериментально дает возможность уточнить численную модель и определить параметры расчетов для реальных условий.

Прямое численное моделирование является удобным инструментом как для планирования и оптимизации самого процесса ЛН, так и для настройки систем обратной связи. Его применение для тестирования проблемных участков детали, которые могут быть определены и устранены на этапе подготовки модели к выращиванию, может дать толчок к развитию качества, гибкости и автоматизации технологии ЛН.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26).

1. Быковский Д.П., Петровский В.Н., Успенский С.А. *Квантовая электроника*, **45** (3), 218 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (3), 218 (2015)].
2. Fathi A., Khajepour A., Toyserkani E., Durali M. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **35**, 280 (2007).
3. Song L., Mazumder J. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, **19** (6), 1349 (2011).
4. Devesse W., De Baere D., Hinderdael M., Guillaume P. *J. Laser Appl.*, **28** (2), 022302 (2016).
5. Farshidianfar M.H., Khajepour A., Gerlich A. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **82** (5-8), 1173 (2016).
6. Кривилев М.Д., Гордеев Г.А., Анкудинов В.Е., Шутов И.В., Ипатов А.Г., Матвеева Ю.Ю., Харанжевский Е.В. *Докл. III Междунар. конф. «Аддитивные технологии: настоящее и будущее»* (М., 2017, с. 10).
7. Mirzade F.Kh., Khomenko M.D., Niziev V.G. *Optical and Quantum Electronics*, **48**, 513 (2016).
8. Smurov I., Doubenskaia M., Zaitsev A. *Surf. Coat. Technol.*, **220**, 112 (2013).
9. Низьев В.Г., Мирзаде Ф.Х., Хоменко М.Д. *Квантовая электроника*, **44** (9), 885 (2014) [*Quantum Electron.*, **44** (9), 885 (2014)].
10. Bedenko D.V., Kovalev O.B., Smurov I., Zaitsev A.V. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **95**, 902 (2016).
11. Wen S., Shin Y.C. *J. Appl. Phys.*, **108**, 044908 (2010).
12. Lee Y., Farson D.F. *J. Laser Appl.*, **28**, 012006 (2016).
13. Albada A., Donoghue D.B., Robinson A.J., Murray D.B., Delauré Y.M.C. *Int. J. Multiphase Flow*, **53**, 11 (2013).
14. Yamamoto T., Okano Y., Dost S. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, **83**, 223 (2016).
15. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics an Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab* (London: Springer International Publishing, 2016).
16. Voller V.R., Prakash C. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **30** (8), 1709 (1987).
17. Yokoi K. *J. Comput. Phys.*, **278**, 221 (2014).
18. Gale W.F., Totemeier T.C. *Smithell's Metals Reference Book* (London: Elsevier, 2004).