

# Производительность и качество наплавки при коаксиальной подаче лазерного излучения и газопорошковой смеси (струи)

К. Занг<sup>а</sup>, Д. Яо<sup>а</sup>, В.С. Коваленко<sup>а,б</sup>, Х. Ху<sup>а</sup>, Н.И. Анякин<sup>б</sup>,  
П.В. Кондрашев<sup>б</sup>, Р.О. Жук<sup>б</sup>, А.Н. Степура<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Исследовательский центр лазерной обработки и техники,

Джэньцзянский университет технологий, КНР, e-mail: [laser@zjut.edu.cn](mailto:laser@zjut.edu.cn)

<sup>б</sup>Научно-исследовательский институт лазерной техники и технологии,

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,

пр. Победы, 37, г. Киев-56, 03056, Украина, e-mail: [anyakin@ukr.net](mailto:anyakin@ukr.net)

Исследуется технологический процесс лазерной наплавки с помощью коаксиальной схемы подачи порошка в зону обработки. Основное внимание уделяется изучению совместного влияния параметров сфокусированной газопорошковой струи и сфокусированного лазерного излучения на свойства наплавленного слоя (размеры, пористость и т.д.). Исследование выполнялось по двум направлениям: численного моделирования (с экспериментальной проверкой результатов) процесса фокусирования газопорошковой смеси соплами разной конфигурации и моделирования методами планирования экспериментов. Данные, полученные при численном моделировании процесса, были использованы при описании процесса наплавки методами планирования экспериментов. Полученные благодаря активной стратегии проведения исследований данные установили статистически значимое влияние этих параметров (взаимное положение перетяжки каустики, формы газопорошковой струи, обрабатываемой поверхности и пр.) на производительность (размеры) и качество (количество пор) в наплавляемой дорожке.

*Ключевые слова:* лазерная технология, лазерная наплавка, моделирование, оптимизация.

УДК 621.9.048

## ВВЕДЕНИЕ

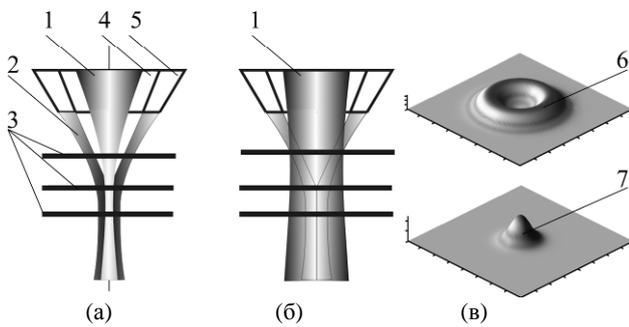
Влияние на результат обработки (таких технологических процессов (ТП) как наплавка, направленное выращивание, легирование) схемы подачи порошкового материала в зону действия лазерного излучения отмечено многими авторами [1]. Наиболее популярной при их реализации является коаксиальная (поток сфокусированного лазерного излучения) схема подачи порошка в зону обработки. Это связано с тем, что при ее использовании взаимное положение системы «лазерное излучение–порошок» не зависит от направления перемещения детали или сфокусированного лазерного пучка, что обеспечивает постоянство условий протекания процесса [1, 2]. При этом (как и при других схемах подачи порошкового материала в зону лазерного воздействия) результат обработки определяется не только свойствами системы порошок-деталь, свойствами сфокусированного лазерного излучения, режимами облучения, но и взаимным положением обрабатываемой детали, перетяжек каустики сфокусированного лазерного излучения и места «фокусирования» газопорошковой смеси (рис. 1) [1].

Следует отметить, что при исследовании процесса формирования струи порошка обычно ис-

пользуют простые зависимости [1, 3] или численное моделирование процесса [4–6]. В первом случае удастся установить место «фокусирования» порошковой струи, а при численном моделировании возможно определение распределения плотности порошка в потоке транспортирующего газа, ее зависимость от расстояния от среза сопла, самих конструкций сопел и пр. Кроме того, возможно и численное исследование процесса наплавки – формирование валика, определение его размеров и пр. [7]. Отметим, что последний процесс весьма трудоемкий, требует значительных затрат времени, не дает ответа о будущих эксплуатационных свойствах наплавленного и переходного слоев, их микротвердости, пористости и пр. А также адекватность полученных значений зависит от точного знания многих параметров (например, зависимостей теплофизических и оптических свойств порошка, материала детали от температуры, особенно в зонах, которые превышают температуру плавления) и требует обязательной экспериментальной проверки.

Применение для описания данных ТП моделирования с помощью методов «черного ящика» [8] (планирование экспериментов (ПЭ), метод группового учета аргумента), которые в прин-

ципе не предназначены для раскрытия сущности описываемых явлений, не позволяет установить причину появления того или иного результата лазерного воздействия при описании такого интересного процесса как лазерная наплавка.



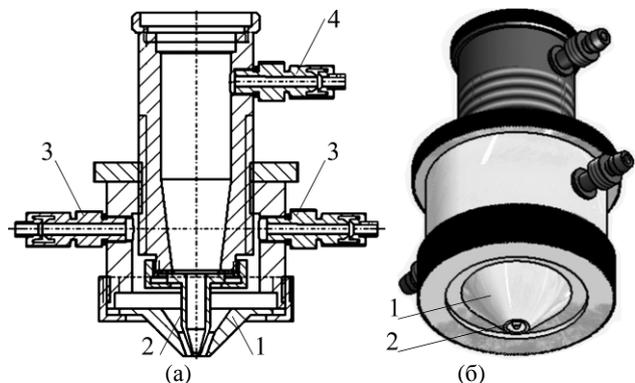
**Рис. 1.** Взаимное положение сопел и поверхности обрабатываемой детали (а, б) и распределение порошка в поперечном сечении на различном расстоянии от среза сопла (в): 1 – лазерное излучение; 2 – газопорошковая струя; 3 – возможные положения поверхности обрабатываемой детали; 4 – сопло для подачи защитного газа; 5 – сопло для подачи порошка; 6, 7 – «мгновенное» распределение плотности порошка в смеси до б и в месте «фокусировки» 7 газопорошковой смеси.

Совместное применение численных методов (позволяющих описать свойства газопорошковой смеси и методы влияния на нее) и методов ПЭ, дающих возможность определить статистически обоснованные оптимальные режимы технологии, которые обеспечивают создание изделий с заданными уровнями производительности и качества. Поэтому исследование влияния взаимодействия сфокусированного лазерного излучения и газопорошковой струи на качество обработки велось по двум направлениям: численного моделирования процесса формирования газопорошковой струи соплами различной конфигурации и непосредственное исследование процесса лазерной наплавки методами ПЭ [5].

#### МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИСПОЛЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

При реализации технологического процесса лазерной наплавки с коаксиальным вводом порошка в зону действия сфокусированного излучения возможно несколько вариантов (см. рис. 1) взаимного положения каустики сфокусированного лазерного излучения 1, газопорошковой струи 2 и обрабатываемой детали 3. Отметим, что одним из обязательных условий «фокусирования» газопорошковой струи является низкое давление газа, защищающего фокусирующую оптику в сопле 4. При соблюдении указанного условия, в зависимости от расстояния от среза сопла, распределение порошка в поперечном сечении будет изменяться от «кольцеобразного» 6 до «сплошного» 7.

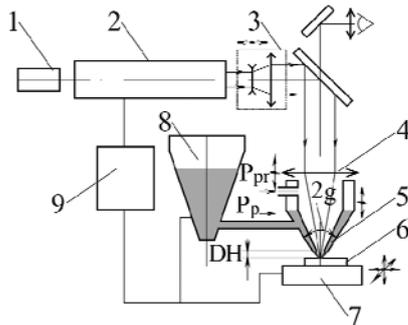
Известно [1–8], что при реализации технологии лазерной наплавки, быстрого изготовления изделий с помощью сфокусированного лазерного излучения обычно применяются тонкодисперсные фракции порошкового материала (диаметр частицы менее 60 мкм) [1–8]. Это позволяет считать среду с такими частицами сплошной, так как при уменьшении размера частицы ее масса стремится к нулю. Благодаря последнему моделированию процесса транспортировки и фокусирования газопорошковой смеси может служить Эйлера модель многофазного потока, которую и использовали при проведении вычислительных экспериментов (в среде программного комплекса Ansys CFX [9]). Полученные численные решения (форма струи, распределение порошка в поперечном сечении на различных расстояниях от среза сопла (рис. 1)) в дальнейшем сравнивались с экспериментальными результатами. При проведении вычислительных экспериментов (и их экспериментальной проверке) изменялись угол образующих сопел  $\varphi$ , их взаимное положение (рис. 2, 3), расход транспортирующего газа в проходном дозаторе (рис. 3) и соответственно расход порошка. При экспериментальной проверке численных результатов форма газопорошковой струи (в различных сечениях) фиксировалась с помощью цифровой камеры CANON Power Shot.



**Рис. 2.** Схема (а) и 3-мерная модель (б) системы коаксиальной подачи порошка в зону обработки: 1, 2 – сменные сопла; 3 – патрубки для подачи газопорошковой смеси; 4 – патрубок для подачи защитного газа.

Полученные знания о форме газопорошковой струи стали основой следующей серии исследований, проведенных методами ПЭ на лазерном экспериментальном оборудовании (схема приведена на рис. 3) в составе: лазера на алюмоиттриевом гранате (длина волны излучения 1,06 мкм, средняя мощность до 200 Вт) и 3-координатного стола. На выходе из резонатора рабочего лазера установлен оптический блок в составе 2-кратной телескопической системы (позволяющей изменять параметры каустики поверхности и

размеры пятна фокусирования), поворотного зеркала, визуального канала и фокусирующего объектива с фокусным расстоянием 100 мм. На фокусирующем объективе устанавливался узел (с возможностью перемещения вдоль оси сфокусированного пучка) для подачи порошка в зону обработки (рис. 2, 3) со сменными коаксиальными соплами с различными углами образующих  $\varphi$  (рис. 2, 3), позволяющими изменять параметры «сфокусированной» газопорошковой струи. Всеми параметрами оборудования управлял персональный компьютер с дополнительными контроллерами.



**Рис. 3.** Схема лазерного оборудования: 1 – вспомогательный лазер; 2 – рабочий лазер; 3 – телескопическая система; 4 – фокусирующий объектив; 5 – коаксиальное сопло; 6 – образец; 7 – рабочий стол; 8 – дозатор; 9 – система управления.

Для построения квадратичной модели процесса (1) методами ПЭ был выбран и реализован не композиционный ротатбельный план Бокса-Бенкена [10], позволяющий строить модели процесса (1), предсказывающие поведение отклика с одинаковой точностью при удалении от центра плана:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{i=k} b_i x_i + \sum_{i \neq j=1}^{i \neq j=k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{ii=1}^{ii=k} b_{ii} x_{ii}^2, \quad (1)$$

где  $k$  – количество технологических факторов;  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ij}$ ,  $b_{ii}$  – коэффициенты уравнения регрессии;  $i, j$  – индексы.

В качестве технологических факторов использовали (в таблице приведены уровни варьирования технологических факторов в кодированном и натуральном масштабах):  $\varphi$  – угол образующих сопел (X1);  $m_p$  – массовая подача порошка (X2);  $V_x$  – скорость перемещения полочки (X3);  $DH$  – положение заготовки относительно среза сопла (X4), а в качестве откликов – геометрию сплавленных валков [6, 8]: высоту (HCL) и ширину (WCL) сплавленного валка, цельность внутренней микроструктуры сплавленных примитивов (QCL) – пористость наплавленного валка.

Благодаря возможности перемещения системы коаксиальных сопел относительно фокусирующего объектива (рис. 2, 3) при изменении  $DH$ , плотность мощности сфокусированного из-

лучения в зоне обработки оставалась постоянной – перетяжка каустики длиной 10 мм равнялась 0,7 мм.

В качестве порошка использовали самофлюсующийся порошок ПГСП-3 (фракции 10–60 мкм), а транспортирующий газ – воздух. Размеры порошка (после просеивания на мерных ситах) контролировались на электронном растровом микроскопе РЭМ-100И.

При проведении исследований в каждой экспериментальной точке опыты повторяли 3 раза. В последующем образцы подвергались стандартным металловедческим исследованиям: разрезались на электроэрозионном оборудовании, делались и травились шлифы. С помощью микроскопа ПМТ-3 определялись размеры валков и зон термического воздействия. Цельность внутренней структуры измеряли в процентах как отношение сумм площадей дефектов (поры, микротрещины и пр.) на фотографиях микрошлифа к площади фотографий. Причем фотографии структур также делали на электронном растровом микроскопе РЭМ-100И в не менее трех случайных точках каждого шлифа.

Статистическая обработка результатов экспериментов показала, что ряды дисперсий (для каждого отклика) однородны, то есть рассчитанные критерии Кохрена  $G^{\text{calc}}$  (для данного уровня значимости, принятом в машиностроении,  $\alpha = 0,05$ , степеней свободы  $f = 2$  и числа опытов  $N = 27$ ) меньше табличных  $G^{\text{tabl}} = 2,2$ . В последующем были рассчитаны коэффициенты уравнений регрессии (представленные на рис. 6 в виде ранговых диаграмм) и проверена гипотеза об адекватности полученных моделей. Следует отметить, что все коэффициенты регрессии оказались статистически значимыми, а гипотеза об адекватности моделей подтвердилась (рассчитанные значения критерия Фишера  $F^{\text{calc}}$  были значительно меньше, чем табличный (для данного уровня значимости  $\alpha = 0,05$ , степеней свободы  $f_1 = 54$  и  $f_2 = 2$ ),  $F^{\text{tabl}} = 3,17$ ).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Вычислительные эксперименты проводились по стандартной процедуре, содержащей ряд шагов.

- Создание 3-мерной (параметрической) модели системы подачи порошка в зону обработки (рис. 2, рис. 4). Данная модель позволяет создать 3-мерные модели внутренней полости системы и соответственно задать краевые условия расчета.

- Создание расчетной сетки конечных элементов внутренней полости системы (на рис. 4а показан пример расчетной сетки, которая была

## Уровни варьирования технологических факторов

Факторы	Угол образующих сопел $\varrho$ (град)	Массовая подача порошка $m_p$ (г/с)	Скорость перемещения полочки $V_x$ (мм/с)	Положение заготовки относительно среза сопла $DH$ (мм)
Основной уровень ( $X_{i0}$ )	40	0,3	2	5
Интервал варьирования ( $DX_i$ )	10	0,1	2	2
Верхний уровень ( $x_i = +1$ )	50	0,4	3	7
Нижний уровень ( $x_i = -1$ )	30	0,2	1	3

использована в расчетах) и прилегающей к ней открытой области.

• Непосредственный расчет траектории движения потока порошка и анализ полученных результатов.

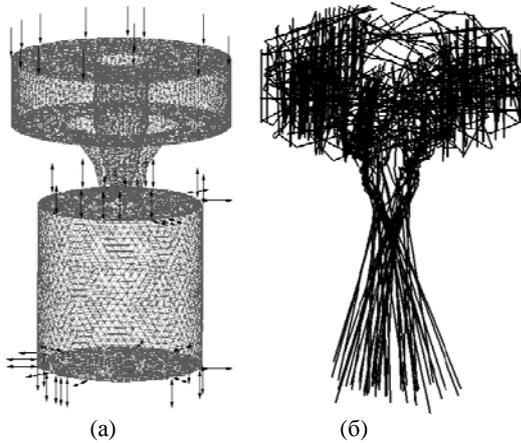


Рис. 4. Сетка конечных элементов (а) и траектория движения частиц (б).

Моделирование процесса формирования газопорошковой струи в среде Ansys CFX позволяет определить (для различных расходов транспортирующего и защитного газа, углов коаксиальных сопел) траекторию движения частиц (рис. 4б), распределение концентрации порошка в плоскости, перпендикулярной (рис. 1) и коллинеарной оси системы (рис. 4). Проведенные вычислительные эксперименты показали, что пространственное распределение концентрации порошкового материала в плоскости, перпендикулярной и коллинеарной оси системы коаксиальной подачи порошка (и соответственно оси сфокусированного лазерного излучения), прежде всего зависит от геометрии углов образующих сопел  $\varrho$ , что соответствует данным, которые получены другими авторами [3–5, 7].

Следует отметить, что во всех рассматриваемых случаях (углы образующих сопел  $30^\circ$ – $50^\circ$ ) при изменении расстояния от среза сопла распределение концентрации порошковой композиции изменяется от кольцеобразного (рис. 1) до полностью заполненной порошковым материалом окружности (рис. 1, 4, 5). Преобразования «кольцевого» распределения в окружность начинается в точке «фокусировки» газопорошковой

струи. Кроме того, увеличение углов образующих  $\varrho$  приводит к уменьшению «фокального» расстояния газопорошковой струи от среза сопла, что полностью подтверждается при экспериментальной проверке полученных результатов (рис. 6). Минимальное сечение газопорошковой струи лежит ниже места пересечения образующей внутренней поверхности наружного сопла с осью системы. Данное явление можно объяснить влиянием давления ( $P_{pr} = 1$  бар, рис. 1–3) защитного газа во внутренней полости системы подачи порошка.

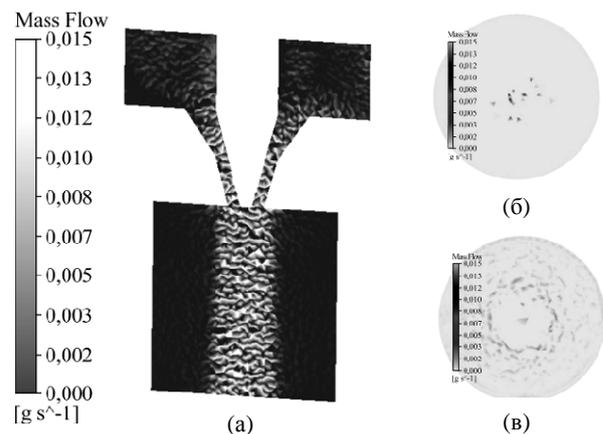


Рис. 5. Распределение концентрации порошковой смеси вдоль (а) и в поперечном сечении струи (б, в) на срезе сопла (б) и в месте его фокусировки (в).

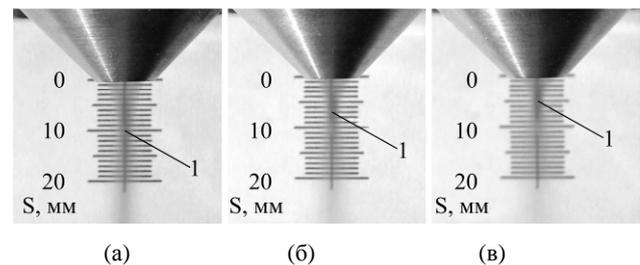
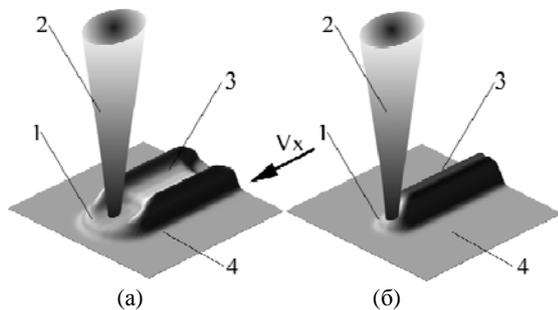


Рис. 6. Общий вид газопорошковых потоков на выходе из сопла: (а) – угол образующих  $\varrho = 30^\circ$ ; (б) –  $\varrho = 40^\circ$ ; (в) –  $\varrho = 50^\circ$ ; 1 – минимальное сечение газопорошковой струи.

Анализируя результаты численного моделирования и экспериментальной проверки полученных данных, мы можем отметить, что геометрия углов образующих сопел позволяет регулировать расстояние с минимальным пересечением газопорошковой струи от среза сопла, а также изменять крутизну огибающих поверхно-

стей потока порошкового материала. Как показали дальнейшие расчеты, при встрече порошковой струи с подвижной мишенью на ее поверхности распределение порошка изменяется. Так, «кольцевое» распределение порошка (рис. 1, 5) превращается в «сплошное» (рис. 7). Причем толщина слоя насыпанного порошка зависит от скорости перемещения детали, массового расхода и степени «фокусировки» газопорошковой струи. Так, при встрече газопорошковой смеси с обрабатываемой поверхностью над местом ее «фокусирования» (рис. 7а, 1а) насыпанный порошок можно условно разделить на ряд частей. Часть порошка (позиция 1, рис. 7), которая насыпана на поверхность перед (по ходу движения) зоной действия сфокусированного излучения, будет нагреваться и плавиться вместе с поверхностью детали. Часть порошка (позиция 3, рис. 1), в зависимости от теплофизических свойств и температуры образовавшейся системы «материал порошка – материал детали», скорости перемещения и расстояния от края «кольца» газопорошковой струи до расплавленной зоны, будет или переплавляться в образованном расплаве, или «прилипать» к нему, или просто нагреваться. Естественно, часть порошка не будет участвовать в процессе лазерной наплавки. При увеличении размеров каустики сфокусированного лазерного излучения (рис. 1б) результат наплавки будет определяться, как и в предыдущем случае, «плотностью» газопорошковой струи, формой, размерами каустики сфокусированного пучка и его мощностью. Однако, когда плотности мощности сфокусированного лазерного излучения будет достаточно для плавления порошка периферией пучка (рис. 1б), произойдет повторное переправление осевшего порошка (позиция 1, рис. 7а) с подложкой.



**Рис. 7.** Распределение порошка на поверхности детали при его «кольцевом» распределении в газопорошковой смеси (а) и «фокусировке» газопорошковой смеси на обрабатываемую поверхность (б): 1 – порошок, насыпанный по ходу сфокусированного лазерного излучения; 2; 3 – порошок после зоны лазерного воздействия; 4 – поверхность детали.

Для выбранного пространства проектирования определены места положения обрабатываемой детали относительно газопорошковой струи,

при которых возможно создание различных схем обработки:

1) «одновременное» сплавление порошка и подложки, когда деталь находится выше точки «фокусировки» газопорошковой струи (в случае «кольцевого» распределения газопорошковой струи в поперечном сечении), и их переплав;

2) «вдувание» расплавленного порошка в расплавленную подложку (в случае превращения «кольцевого» распределения порошковой струи в сплошное) – когда концентрации газопорошковой струи недостаточно для полного «перекрытия» потока лазерного излучения;

3) «вдувание» расплавленного порошка в твердую подложку – когда концентрации газопорошковой струи достаточно для полного «перекрытия» потока лазерного излучения.

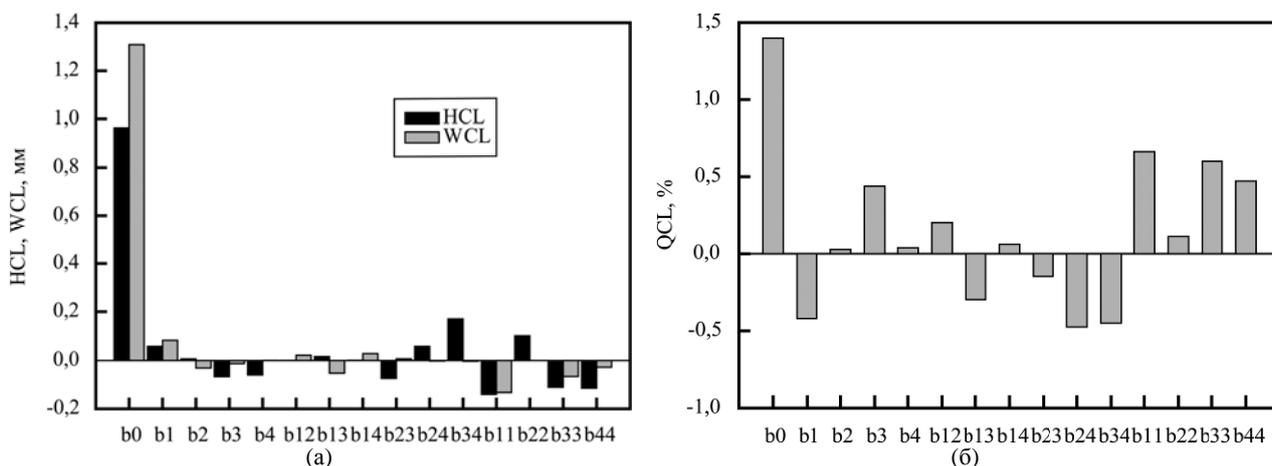
Анализируя результаты обработки экспериментов, проведенных методами ПФЭ (на рис. 8 приведены коэффициенты уравнений регрессии в виде ранговых диаграмм, по величине которых определяется их степень влияния на выход процесса), установили, что в исследуемом факторном пространстве максимальное влияние на размеры наплавленного валика, целостность микроструктуры оказывают линейное и квадратичное воздействия:

- угол образующих сопел (коэффициенты  $b_1$  и  $b_{11}$ , рис. 8);
- скорость перемещения детали (коэффициенты  $b_3$  и  $b_{33}$ , рис. 8),
- смешанные взаимодействия (коэффициенты  $b_{13}$ , рис. 8) и квадратичное влияние всех факторов на модели процесса.

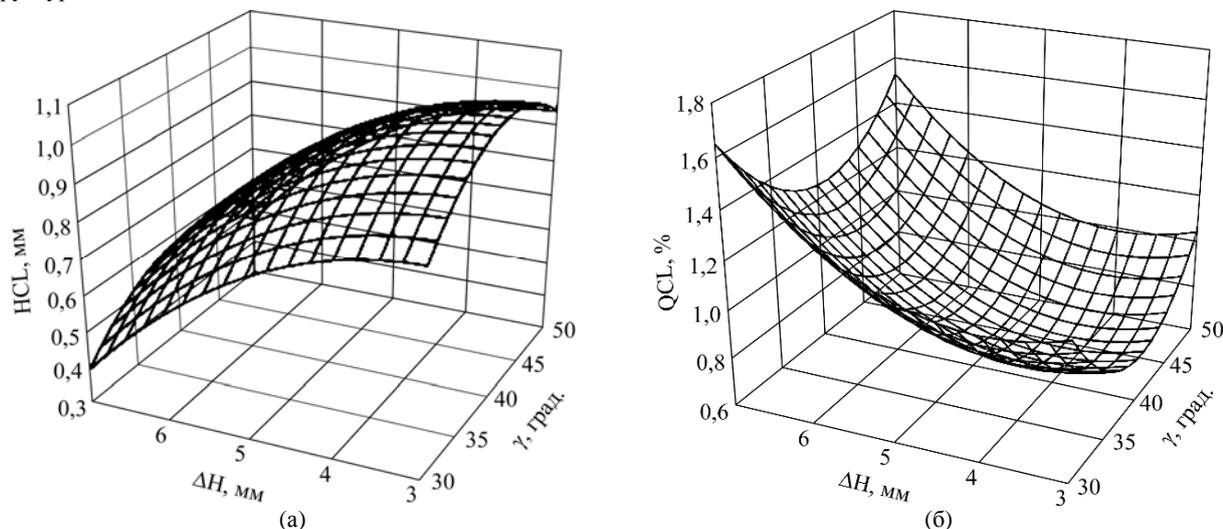
Следует отметить, что угол образующих коаксиальных сопел оказывает взаимно противоположное влияние на высоту и целостность наплавленного валика (знаки квадратичных коэффициентов уравнения регрессии (рис. 8) противоположны). Так, на рис. 9 приведены зависимости HCL и QCL от технологических факторов в случае, когда  $m_p = 0,2$  г/с и  $V_x = 1$  мм/с.

Как видно из приведенных зависимостей, минимальное количество пор в наплавленном слое (и максимальное качество наплавки) наблюдается в случае, когда угол наклона образующих сопел приблизительно равен  $40^\circ$ , причем минимум на зависимости QCL имеет место, когда начинается фокусирование порошковой струи на поверхности детали ( $DH = 5$  мм) и осуществляется «вдувание» порошка в жидкую ванну, образованной в обрабатываемой заготовке, с последующим их переплавом.

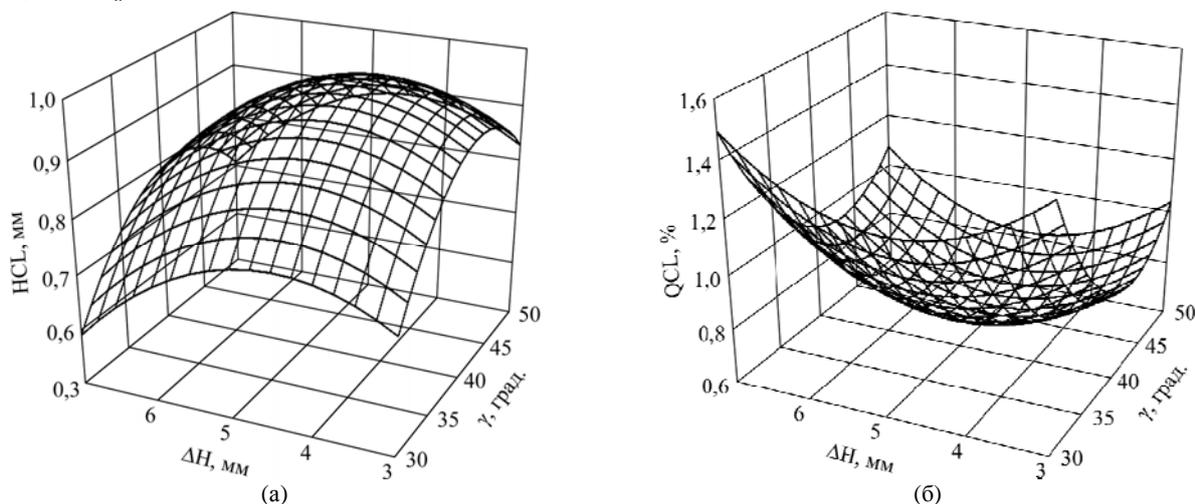
Увеличение скорости обработки (например, до 2 мм/с) позволяет создавать качественный наплавленный слой и по схеме вдувания расплавленного порошка в расплавленную подложку.



**Рис. 8.** Коэффициенты уравнений регрессии, описывающие процесс наплавки: (а) – коэффициенты модели, описывающие зависимость высоты и ширины валика от технологических факторов; (б) – коэффициенты модели для цельности микро-структуры валика.



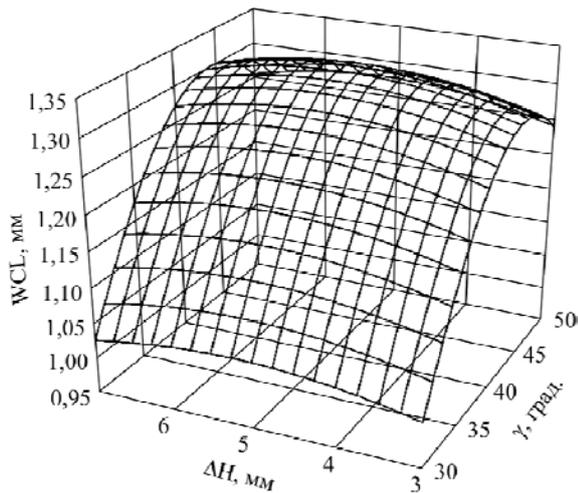
**Рис. 9.** Зависимости HCL (а) и QCL (б) от расстояния от среза сопла  $\Delta H$  и угла образующих сопел  $\gamma$  в случае, когда  $m_p = 0,2$  г/с и  $V_x = 1$  мм/с.



**Рис. 10.** Зависимости HCL (а) и QCL (б) от расстояния от среза сопла и угла образующих сопел в случае, когда  $m_p = 0,2$  г/с и  $V_x = 2$  мм/с.

ку (минимум на зависимости  $QCL = f(\Delta H, \gamma)$  (рис. 10) лежит в случае  $\Delta H = 6$  мм). Увеличение угла образующих сопел ведет к увеличению QCL и одновременному уменьшению WCL, HCL (рис. 8–11), что связано с увеличением площади поперечного сечения порошковой струи и недостаточности энергии лазерного излучения для

переплава всей массы порошка и поверхности детали. Аналогичная ситуация складывается и при уменьшении  $\gamma$ : большое количество порошка (из-за уменьшения поперечного сечения порошковой струи) не позволяет получить качественное соединение расплавленной порошковой струи с расплавленной подложкой.



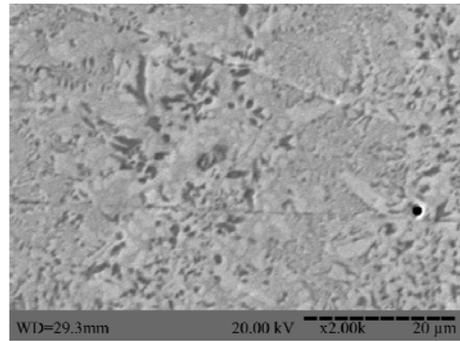
**Рис. 11.** Зависимость WCL от расстояния от среза сопла и угла образующих сопел в случае, когда  $m_p = 0,2$  г/с и  $V_x = 1$  мм/с.

Следует отметить, что при увеличении скорости обработки экстремумы на зависимостях  $HCL = f(DH, \gamma)$  и  $QCL = f(DH, \gamma)$  пропорционально смещаются в сторону увеличения  $DH$  (рис. 9, 10), причем HCL меньше, чем при более низкой  $V_x$ . Данное явление возможно объяснить уменьшением плотности энергии сфокусированного лазерного излучения, при которой количество порошка в «кольце» подобном потоке газопорошковой струи превышает (при сплавлении с подложкой) возможности используемого лазерного оборудования.

Анализируя полученные результаты (приведенные на рис. 8–11), отметим, что в исследуемом факторном пространстве (см. таблицу) на QCL оказывают максимальное влияние геометрия газопорошковой струи и положение детали относительно ее «фокуса». О данном факте свидетельствуют как величины коэффициентов регрессии (рис. 8), так и градиенты на приведенных зависимостях  $HCL = f(DH, \gamma)$  и  $QCL = f(DH, \gamma)$  (рис. 9, 10).

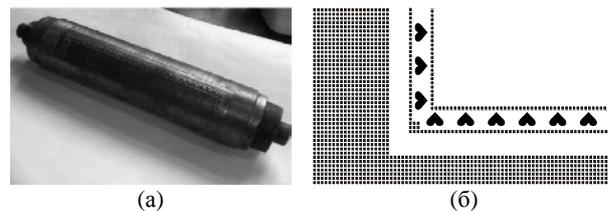
Исследование зависимостей (приведенных на рис. 8–11) в 5-мерном (для каждого оклика) пространстве можно продолжать до бесконечности, поэтому для сокращения времени проведения исследований поиск оптимальных режимов лазерной наплавки осуществляли с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа [11]. В качестве целевой функции использовали  $MIN(QCL)$  в пространстве проектирования (см. таблицу) и при максимальных значениях HCL и WCL.

В установленных (с помощью расчетов) точках факторного пространства была проведена дополнительная серия экспериментов, которая подтвердила правильность расчетов. Так, количество дефектов в наплавленном слое уменьшилось до 0,18% (рис. 12).



**Рис. 12.** Дефект в наплавленном слое (поры) на оптимальных режимах обработки ( $\gamma = 40^\circ$ ,  $m_p = 0,3$  г/с,  $V = 1,9$  мм/с,  $DH = 5$  мм): 1 – пора.

На установленных режимах лазерной наплавки был изготовлен фигурный прессовый вал (на рис. 13 приведено изображение прессового вала с фрагментом управляющей программы), который используется при изготовлении «тисненной» полиграфической продукции. При изготовлении вала его «рисунок» представлялся в виде черно-белого \*BMP-файла (в соответствующем масштабе), в котором черным цветом выделялись наплаваемые участки (размер черного квадрата 1x1 мм).



**Рис. 13.** Прессовый вал для полиграфической промышленности (а) и фрагмент файла управляющей программы (б), используемой при его изготовлении.

## ВЫВОДЫ

- Результаты исследований показали возможность повышения качества (путем уменьшения дефектов в наплавленном слое до 0,18%) технологии направленного лазерного выращивания путем оптимизации параметров газопорошковой струи и положения ее перетяжки относительно поверхности обрабатываемой детали.

- Наиболее действенный метод влияния на свойства газопорошковой струи (форма, концентрация и пр.) – изменения углов образующих сопел.

- В исследуемом факторном пространстве, в условиях низкой мощности потока лазерного излучения (и соответственно малого диаметра пятна фокусирования), минимальное количество дефектов в наплавленном слое образуется в случае, когда газопорошковая струя начинает «фокусироваться» на поверхности детали, обеспечивая одновременное плавление порошка (попавшего в «полете» в каустику сфокусированного

излучения, насыпавшегося на поверхность) и обрабатываемой поверхности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ready J. *LIA Handbook on Laser Materials Processing*. LIA, Magnolia Publishing, Inc., 2001. 715 p.
2. Xue L., Theriault A., Rubinger B., Parry D., Ranjbaran F., Doyon M. Investigation of Laser Consolidation Process for Manufacturing Structural Components for Advanced Robotic Mechatronics System (ARMS). *Proceedings of International Congress "ICALEO'2003"*, Jacksonville, USA, Oct. 2003, paper #909
3. Pinkerton A.J., Lin Li. A Verified Model of the Behaviour of the Axial Powder Stream Concentration from a Coaxial Laser Cladding Nozzle". *Proceedings of International Congress "ICALEO'2002"*, Scottdale. USA.
4. Pinkerton A., Moat R., Shah K., Lin Li., Preuss M., Withers P. A Verified Model of Laser Direct Metal Deposition Using An Analytical Enthalpy Balance Method. *Proceedings of International Congress "ICALEO'2007"*, Orlando. USA paper #1806
5. Pinkerton A.J., Lin Li. Modelling Powder Concentration Distribution from a Coaxial Deposition Nozzle for Laser-Based Rapid Tooling. *J Manuf Sci Eng*. 2004, **126**, 33-41. DOI: 10.1115/1.1643748.
6. Kovalenko V., Yao J., Zhang Q., Kondrashev P., Anyakin M., Zhuk R., Stepura O. Influence of the Interaction of Focused Laser Beam and Gas-Powder Stream on the Quality of Laser Processing. *Procedia CIRP*. 2013, **6**, 498–503. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.062.
7. Ibarra-Medina J., Vogel M., Pinkerton A.J. A CFD Model of Laser Cladding: from Deposition Head to Melt Pool Dynamics. *Proceeding of 30th International Congress on Applications of Lasers and Electro - optics (ICALEO) 2011*, Orlando. USA.
8. Yao J., Kovalenko V.S., Zhang Q., Anyakin M., Hu X., Wang W. Modeling of Laser Cladding with Diode Laser Robotized System. *ЭОМ*. 2010, **46**(3), 82–86.
9. ANSYS CFX-SolverTheory Guide, ANSYS CFX Release 11.0, Ansys Inc.
10. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. *Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов*. М.: Наука, 1980. 304 с.
11. Химмельблау Д. *Прикладное нелинейное программирование*. М.: Мир, 1975, 534 с.

Поступила 12.06.14

После доработки 31.07.14

#### Summary

Technological process of laser cladding with laser beam and powder jet delivered coaxially into processing zone is investigated in this paper. Mutual influence of focused laser beam and gas-powder stream on parameters of clad layer (dimensions, porosity etc.). Two research methods were used for investigation of gas-powder jet focusing with nozzles of different configurations: numerical simulation with further experimental verification and experiment planning technique. Statistically significant influence technological parameters (mutual position of laser beam waist, gas-powder jet profile, workpiece etc.) on the productivity (dimensions) and quality (number of pores) of the clad layer.

*Keywords: laser technology, laser cladding, simulation, optimization.*