УДК 681.7.069.24: 621.81-023.5

# ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОПОРОШКОВОГО ПОТОКА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ

# И.А. Зябрев, А.Н. Кравченков, В.В. Порошин, А.Д. Шляпин

Статья посвящена исследованию процесса формирования газопорошкового потока при использовании двух- и трехкамерного сопла для лазерной наплавки. Рассмотрены вопросы формирования наплавленного слоя со сканированием сфокусированного лазерного излучения, формирование газопорошковой струи и достижение большей равномерности распределения частиц в газопорошковом потоке. Использование трехкамерного сопла дало возможность получения наплавленного слоя шириной 10 мм и высотой 3,2 мм за один проход. Приведены результаты экспериментов с использованием CO<sub>2</sub>-лазера при изменении ряда параметров: расхода транспортирующего газа, расстояния от среза сопла до зоны плавления, расхода присадочного порошка и скорости обработки. Найдены оптимальные параметры процесса газопорошковой лазерной обработки для получения заданных характеристик наплавленных слоев.

**Ключевые слова:** лазерная наплавка, лазерный луч, сканатор лазерного излучения, дозатор порошковых материалов.

# FEATURES OF GAS-POWDER FLOW FORMATION DURING LASER COATING

### I.A. Zyabrev, A.N. Kravchenkov, V.V. Poroshin, A.D. Shlyapin

The article is devoted to the process of gas-powder flow formation at using two- and threechamber nozzles for laser coating. The issues of the built-up layer formation with a scanning focused laser beam, as well as of gas-powder jet formation and gain in the particles equitability in the gas-powder flow have been considered. Using the three-chamber nozzle made it possible to obtain the alloy of 10 mm in wide and 3.2 mm in height per pass. Results of experiments with  $CO_2$  laser at changing parameters: the conveying gas flow, the distance from the nozzle section to the melting zone, as well as the flow of filler powder and processing speed, have been given. The optimal parameters of laser gas-powder processing for obtaining built-up layers with the specified characteristics have been determined.

Keywords: laser building-up, laser beam, scanner of laser radiation, dispenser of powder materials.

#### Введение

Одним из перспективных направлений применения лазерных технологий в машиностроении является лазерная наплавка, с помощью которой получают поверхностный слой с химическим составом и физическими свойствами, отличными от свойств основного материала.

Главное преимущество этого способа заключается в незначительном термическом воздействии на деталь и низком коэффициенте перемешивания наносимых элементов с материалом подложки [1–3]. Особенно перспективен подход, обеспечивающий самоорганизацию поверхностных явлений при послойном формировании структур поверхностных слоев и управление свойствами наплавленного материала. Самоорганизация поверхностных явлений обеспечивает устойчивое образование слоя определенной толщины при значительных изменениях расстояния от источника энергии или подаваемого материала до формируемой поверхности, а также позволяет в результате взаимопроникновения сращивать последовательно наносимые слои [4]. В настоящее время оборудование для лазерной наплавки не является достаточно совершенным для решения широкого круга технологических задач в силу многообразия протекающих физических процессов и непрерывно расширяющегося спектра используемых материалов [5].

Целью данной работы является исследование возможности стабилизации газопорошковой струи, достижения равномерности распределения частиц в газопорошковом потоке путем использования дополнительного внешнего сопла.

# Формирование газопорошкового потока при лазерной наплавке

Подачу порошка в зону обработки можно осуществлять двумя способами:

 предварительным нанесением присадочного материала на подложку;

 инжектированием порошкового материала непосредственно в процессе обработки [6].

При втором способе порошок, транспортируемый газом, поступает из дозирующего устройства и через специальное сопло вдувается в зону обработки. Используются две схемы внесения порошка – через боковое и коаксиальное сопло (рис. 1) со следующими характеристиками: V – скорость обработки, мм/с; G – расход порошка, г/с; P – мощность излучения, кВт; h – высота наплавленного слоя, мм;  $h_1$  – глубина проплавления, мм;  $Q_3$  – расход защитного газа, л/мин;  $Q_{\tau}$  – расход транспортирующего газа, л/мин; d – диаметр луча, мм.

Инжектирование порошка с помощью бокового сопла – наиболее простая схема лазерной наплавки. Однако такое расположение сопла отрицательно сказывается на качестве наплавленных слоев при изменении направления движения образца. У коаксиальной подачи присадочного материала такой недостаток отсутствует.

Коаксиальное сопло состоит из внешнего и внутреннего сопла [7]. Лазерный луч проходит через внутреннюю часть сопла и попадает на обрабатываемую поверхность, инициируя создание ванны расплавленного металла. Соосно с лазерным лучом подается защитный газ, предохраняющий оптику от продуктов горения. Между внешним и внутренним соплами имеется полость, куда подается газопорошковая смесь. За счет угла наклона образующих сопла газопорошковый поток фокусируется при выходе из него и попадает в ванну расплава. Порошок плавится и после затвердевания образует наплавленный слой, полностью состоящий из материала порошка.

Однако основным недостатком данной схемы является неравномерность газопорошкового потока на выходе из сопла. Проводились исследования [8], где авторы, вводя дополнительные направляющие в полость между соплами и закручивая поток, пытаются его стабилизировать, улучшить перемешивание и избежать расслоения по фракциям. Это дает определенные результаты, но на небольшом расстоянии от среза сопла, что ограничивает ширину наплавляемых дорожек.

Для получения наплавленных дорожек значительной ширины (более 5 мм) необходимо расфокусировать лазерный луч до размеров наплавляемого слоя. Однако это приводит к необходимости увеличения мощности излучения,





Рис. 2. Схема процесса наплавки со сканированием лазерного луча и трехкамерным соплом: 1 – деталь; 2 – газопорошковая смесь; 3 – внутреннее сопло; 4 – луч лазера; 5 – сканатор; 6 – газ защитный; 7 – внешнее сопло; 8 – газ формирующий; 9 – внешняя обойма

так как при расфокусировке луча плотность мощности в пятне уменьшается, что приводит к недостатку энергии для формирования наплавленного слоя. Устранение данного недостатка возможно сканированием максимально сфокусированного лазерного луча, но при этом возникает ряд проблем: недостаточное количество порошка по зоне обработки в фокусе; малая зона «перетяжки» (минимальный диаметр) газопорошкового потока и неравномерность распределения частиц порошка в зоне расфокусировки потока.

Лазерная газопорошковая наплавка со сканированием луча и трехкамерным соплом (рис. 2) происходит следующим образом. При подаче газопорошковой струи от дозирующего устройства газопорошковая смесь проходит между внешним и внутренним соплами, формируя на выходе из сопла конусный факел газопорошковой струи. Внутреннее сопло может перемещаться относительно внешнего сопла, что необходимо для точной настройки для совмещения фокуса потока газопорошковой струи и фокуса лазерного луча.

# Трехкамерное сопло

Для защиты оптического тракта от продуктов горения во внутреннее сопло подается защитный газ. Для формирования равномерного потока газопорошковой струи и изменения размера перетяжки фокуса во внешнюю обойму подается формирующий газ. Штуцера для ввода газов направлены в одну сторону и тангенциально к камерам ввода газов, что приводит к закручиванию газовых потоков. Поток защитного газа на выходе из сопла оказывается охваченным газопорошковым потоком, а поток формирующего газа обжимает потоки, формируя узконаправленную, цилиндрическую струю [9].

Сфокусированный лазерный луч, отраженный зеркалом сканатора, попадает на обрабатываемую поверхность в зоне фокусировки. Фокусы лазерного луча и газопорошкового потока должны быть совмещены. При сканировании лазерного луча по траектории окружности формирование наплавленного слоя происходит в два этапа (рис. 3):

 расплавление подложки, образование и наращивание слоя от переднего фронта траектории сканирования луча;

2) увеличение слоя за счет прохождения заднего фронта траектории.

### Постановка эксперимента

В качестве присадочного материала использовался порошок сплава Cr-B-Ni с разме-



Рис. 3. Формирование наплавленного слоя со сканированием лазерного излучения: 1 – луч лазера; 2 – газопорошковая смесь

ром частиц 40-100 мкм, который подавался в зону наплавки специальным дозирующим устройством. Подложкой служили образцы из стали 45. Скорость перемещения образцов составляла 2–10 мм/с.

Эксперименты проводились с использованием CO<sub>2</sub>-лазера мощностью 2 кВт и двухкамерного и трехкамерного сопла. Сканирование лазерного луча [10] производилось с размером пятна в фокусе 1,2 мм, амплитудой 10 мм и частотой 150 Гц по круговой траектории.

# Результаты экспериментальных исследований

Результаты экспериментов показали, что, используя двухкамерное сопло, получить наплавленные слои шириной 10 мм за один проход не представляется возможным. Использование трехкамерного сопла дало возможность получить наплавленный слой шириной 14 мм за один проход.

Результаты экспериментов по изменению расхода транспортирующего газа Q и расстояния от среза сопла до зоны плавления L приведены на рис. 4.

Эксперименты показали, что оптимальным расстоянием от среза сопла, т.е. от зоны формирования газопорошкового потока до зоны плавления основного материала, является расстояние 15 мм. При изменении расстояния наблюдается уменьшение высоты и качества наплавленного слоя. На расстоянии до 10 мм газопорошковый поток не успевает полностью сформироваться, и наблюдается неравномерность частиц в потоке. При расстоянии более 20 мм формирующий газ уже не оказывает значительного воздействия на газопорошковый поток, он приобретает форму конуса, и концентрация частиц, попадающих в зону расплава, уменьшается.

Оптимальный расход транспортирующего газа должен составлять, как показали опыты, 2–4 л/мин. С увеличением расхода газа средняя скорость частиц возрастает, но ухудшается степень фокусировки потока. Уменьшение расхода газа приводит к уменьшению диаметра газопорошкового потока и недостатку порошка по краям наплавленного слоя.

Исследование влияния расхода присадочного порошка и скорости обработки на высоту наплавленного слоя представлены на рис. 5.

Из экспериментов по наплавке было установлено, что ширина наплавленного слоя зависит от амплитуды сканирования и диаметра



Рис. 4. Зависимость высоты наплавленного слоя от расхода транспортирующего газа и расстояния от среза сопла до зоны плавления: → 5 мм, → 10 мм, → 15 мм, → 15 мм





пучка лазерного излучения. При увеличении скорости обработки с 1,0 до 9,0 мм/с высота слоя уменьшается с 3,5 до 0,1 мм, что объясняется снижением количества порошка, приходящегося на единицу площади поверхности образца и уменьшением времени взаимодействия с излучением [11].

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что скорость обработки напрямую влияет на наплавленный слой. Однако низкие скорости вызывают значительное термическое воздействие на основу, что сводит на нет все преимущества лазерной технологии перед другими способами наплавки – газопламенной и плазменной.



Рис. 6. Микрошлифы переходной зоны (а) и наплавленного слоя (б)

Оптимальной скоростью обработки можно считать 2–4 мм/с. При этой скорости сохраняется баланс высоты, качества наплавленного слоя и термического влияния на основу. Увеличение расхода порошка с 0,3 до 0,8 г/с показывает, что при 0,3 г/с порошка недостаточно для формирования качественного слоя. При 0,8 г/с на скорости 2–4 мм/с происходит экранирование лазерного излучения частицами порошка, попавшими под луч, что приводит к уменьшению зоны расплава в связи с избытком присадочного материала. Таким образом, оптимальным расходом порошка устанавливаем 0,5–0,7 г/с.

Общий вид наплавленных слоев представлен на микрофотографиях переходной зоны и наплавленного слоя на рис. 6. В покрытиях отсутствуют поры, раковины и трещины.

#### Выводы

1. Использование трехкамерного сопла, позволяющего формировать равномерный газопорошковый поток с возможностью изменения фокуса и размера перетяжки по траектории сканирования лазерного луча, обеспечивает увеличение зоны подачи порошка, равномерность, размеры и качество наплавленного слоя.

2. В процессе наплавки установленное трехкамерное сопло дало возможность получить качественный наплавленный слой шириной 14 мм и высотой 3,2 мм за один проход. При этом оптимальным расстоянием от среза сопла, т.е. от зоны формирования газопорошкового потока и до зоны плавления основного материала, является расстояние 15 мм при расходе транспортирующего газа 2-4 л/мин. 3. Оптимальной скоростью обработки, при которой сохраняется баланс геометрических характеристик, качества наплавленного слоя и термического влияния на основу можно считать 2–4 мм/с. Оптимальный расход порошка 0,5–0,7 г/с.

#### Заключение

Таким образом, использование дополнительного внешнего сопла при лазерной газопорошковой наплавке путем прямого инжектирования частиц порошка, позволяет стабилизировать и увеличивать равномерность распределения частиц в газопорошковом потоке, повышать производительность процесса за счет получения одновременно двух наплавленных слоев путем сканирования сфокусированного лазерного луча в зоне расфокусировки газопорошкового потока, наплавлять слои с различными химическими составами, регулировать геометрические размеры наплавленного слоя.

#### Список литературы

- 1. Гречин А.Н., Зябрев И.А. Лазерная наплавка со сканированием излучения // Сварочное производство. 1989. № 3(653). С. 1–2.
- 2. Андрияхин В.М. Процессы лазерной сварки и термообработки. М.: Наука, 2002. 176 с.
- Шляпин А.Д., Порошин В.В., Зябрев И.А. Влияние траектории сканирования лазерного луча и газопорошковой струи при наплавке износостойких покрытий // Международный научный е-симпозиум «Технические науки: теория и практика». Москва, 29–30 июня 2015. С. 18–26.

38

- Хейфец М.Л. Аддитивные синерготехнологии послойного синтеза изделий из композиционных материалов при воздействии потоками энергии // Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2016. No. 4. P. 3–9.
- Ковалев О.Б., Зайцев А.В. Моделирование термодинамики и транспорта частиц при лазерной наплавке с коаксиальной подачей порошка // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. Вып. 4. Ч. 1. С. 232–240.
- 6. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
- 7. Бирюков В.П. Повышение ресурса работы деталей машин при лазерной наплавке // Фотоника. 2014. № 3(45). С. 24–31.
- 8. Патент Российская Федерация RU 2002128384 А. Сопло для лазерной обработки / Сто-

ляров В.И.; МПК В23К26/00, опубл. 27.04.2004.

- 9. Шляпин А.Д., Порошин В.В., Зябрев И.А. Лазерная наплавка со сканированием излучения // Сборник научных трудов. Евразийский союз ученых, Международная научно-практическая конференция «Современные концепции научных исследований». 2015. Часть 2. № 6 (15). С. 89–91.
- Патент на полезную модель № 160350 Российская Федерация, Автоматизированный комплекс для газопорошковой лазерной наплавки / Зябрев И.А.; МПК В23К26/00. опубл. 19.05.2015.
- Порошин В.В., Зябрев И.А., Кравченков А.Н. Влияние сканирования лазерного луча и газопорошковой струи при аддитивной технологии // Единый всероссийский научный вестник. 2016. № 2. С. 40–45.

Материал поступил в редакцию 11.05.2016

ЗЯБРЕВ Руководитель лаборатории лазерных аддитивных технологий АНО «ИРНОТ». Игорь Александрович Сфера научных интересов – лазерные аддитивные технологии. Автор более 20 научных работ. E-mail: scanrise@mail.ru Тел.: (903) 720-55-58 КРАВЧЕНКОВ Кандидат технических наук, проректор по инновационному развитию Антон Николаевич АНО «ИРНОТ». Сфера научных интересов – аддитивные технологии. Автор более 30 научных работ. E-mail: akravchenkov64@yandex.ru Тел.: (499) 346-42-43 порошин Доктор технических наук, профессор, ректор АНО «ИРНОТ». Сфера научных Валерий Владимирович интересов – метрология, трибология. Автор более 200 научных работ.

E-mail: **vporoshin@mail.ru** Тел.: **(916) 155-02-70** 

#### ШЛЯПИН Анатолий Дмитриевич

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения МГУМ (МАМИ). Сфера научных интересов – физика металлов, материаловедение. Автор более 200 научных работ.

E-mail: vporoshin@mail.ru ashliapin@list.ru Тел.: (906) 688-34-12