

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ БЛОК ДЛЯ АДДИТИВНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

И.А. Зябрев, А.Н. Кравченко, В.В. Порошин, А.Д. Шляпин

В настоящее время особенно активно проводятся работы по созданию технологического оборудования для аддитивных лазерных технологий. Рассмотрены предложения и возможности применения для аддитивных технологий технологических лазерных головок. Показаны преимущества обработки с использованием системы сканирования для газопорошковой лазерной наплавки, ее возможности и модификации. Проведены эксперименты по изучению влияния частоты сканирования лазерного луча и траектории сканирования на геометрические характеристики наплавленных слоев. Эксперименты проводились с использованием углекислотного и волоконного лазера. По результатам исследований предложен multifunctional scanning unit, позволяющий значительно увеличить эффективность процесса газопорошковой лазерной наплавки, и устройство дозирования порошка, разработанные специально для аддитивной лазерной технологии. Рассмотрены их преимущества и возможность использования в составе лазерных обрабатывающих комплексов.

Ключевые слова: лазерная наплавка, аддитивная технология, сканатор лазерного излучения, дозатор порошковых материалов.

MULTIFUNCTIONAL SCANNING UNIT FOR ADDITIVE LASER TECHNOLOGY

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

At the present moment particularly active works are carried out on creation of technological equipment for the additive laser technology. The performance capabilities of technological laser heads for using in additive technologies have been considered. The advantages of laser beam treatment using a scanning system for laser gas-powder surfacing have been demonstrated as well as its possibilities and modifications. The effect has been studied of the laser beam scanning frequency and scanning trajectory on geometrical characteristics of deposited layers. The experiments have been carried out using a carbon dioxide and fiber lasers. According to the research results the multifunctional scanning unit, which allows the efficiency of laser gas-powder surfacing significantly increases, and powder dispensing device, designed specifically for laser additive technology have being proposed. Their advantages and opportunities for application in laser processing complexes have being described.

Keywords: laser surfacing, additive technology, scanner of laser radiation, the dispenser of powder materials.

Введение

В настоящее время в мире проводятся интенсивные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию технологического оборудования для аддитивных лазерных технологий. Одной из актуальных проблем машиностроения является разработка эффективных технологий обработки и восстановления тяжелонагруженных деталей и узлов, позволяющих обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики рабочих поверхностей.

В отличие от традиционных технологий лазерная аддитивная технология позволяет получать материалы со специфическими свойствами, характерными только для лазерной обработки, изменять состав материала во время нанесения согласно функциональной особенности поверхностной и внутренней части детали, осуществлять локальную обработку [1].

Лазерная наплавка может быть эффективна как для восстановления изношенных деталей, так и при изготовлении изделий. Исполь-

зование лазерного пучка, в отличие от других источников тепла, дает возможность управлять температурным полем в поверхностном слое обрабатываемого изделия, изменяя форму сечения и интенсивность излучения по сечению падающего пучка [2].

Разработкой лазерных технологических головок для волоконных лазеров занимается ряд ведущих фирм. В настоящее время на рынке представлены головки для лазерной сварки и резки, появились первые модели головок для наплавки. Можно проследить основные тенденции в дизайне лазерных головок – модульность, перестраиваемость, насыщение сенсорами и контрольными функциями [3]. Это лазерные головки компаний *Precitec*, *ScanSonic*, *JPG*, *Электроресурс*, *Kugler*, *ILV* и другие.

Модульный подход к конструкции лазерных головок дает пользователю достаточную гибкость в выборе параметров процесса, но только на стадии разработки технологического процесса [4]. Лазерная технологическая головка передает большую мощность, поэтому ее снабжают сенсорами и защитными функциями – мониторинг температуры и состояния оптики, контроль мощности излучения, давления и расхода технологических газов.

При проектировании лазерных головок необходимо учитывать особенности лазерных пучков, высокую мощность излучения, поглощение и отражение от поверхности оптической системы излучения, пространственное распределение плотности мощности [5].

Для технологии газопорошковой лазерной наплавки разработаны системы коаксиальной и боковой подачи порошка [6].

Однако наряду со всеми достоинствами, эти головки имеют ограничения по возможностям использования – значительная масса, высокая цена, отсутствие регулировок по увеличению зоны обработки и получения равномерного газопорошкового потока по ширине наплавленных слоев.

Целью данной работы является разработка способа и оборудования для расширения возможностей лазерной аддитивной технологии.

Газопорошковая лазерная наплавка со сканированием

При традиционной лазерной наплавке размеры зоны обработки определяются размерами пятна лазерного луча на поверхности детали. Для увеличения зоны обработки используют расфокусировку лазерного луча, однако эти размеры ограничены из-за уменьшения плотности мощности излучения, что приводит к необходимости использования лазеров большей мощности. Исправить этот недостаток позволяет система сканирования. В настоящее время существуют сканаторы акусто-оптического [7], механического [8], гальванометрического и других типов, однако их применение для излучения мощных лазеров ограничено из-за размера апертуры падающего луча (10-15 мм), недостаточной стойкости оптических элементов (до 400 Вт/см²) и конструктивной невозможности подведения дополнительного охлаждения.

В разработанном устройстве резонансного типа оптические элементы имеют систему водяного охлаждения, апертуру 50 мм, частоту сканирования 50-250 Гц и амплитуду 0-70 мрад.

На рисунке 1 показана схема традиционного способа наплавки расфокусированным лазерным

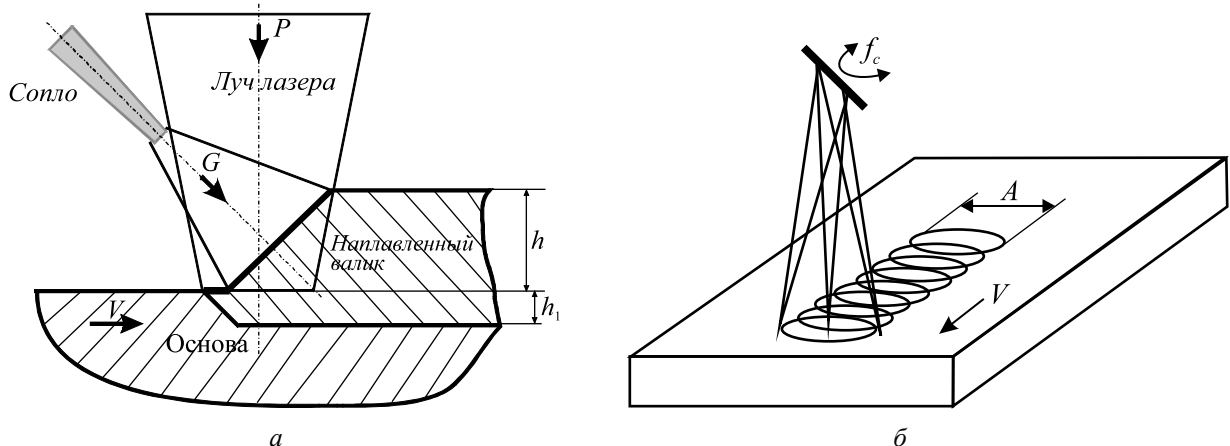


Рис. 1. Способ наплавки расфокусированным лазерным лучом (а) и со сканированием острогофокусированного излучения (б):

P – мощность излучения; G – расход порошка; V – скорость обработки; h – толщина слоя; h_1 – толщина подплавления основы; f_c – частота сканирования; A – амплитуда сканирования

ным лучом со сканированием остросфокусированного излучения.

Эксперименты проводились с использованием излучения непрерывного CO_2 -лазера (10,6 мкм) мощностью 2 кВт. В качестве присадочного материала использовался порошок Ni-Cr-B-Si сплава, который подавался в зону наплавки специальным дозирующим устройством. Расход порошка и газа не изменялся. Подложкой служили образцы из стали 45. Скорость перемещения образцов составляла 2–10 мм/с. Лазерный луч, сфокусированный в пятно диаметром 1,0 мм на поверхности, падал на образец вертикально, а порошок подавался из наклонного сопла. Сканирование луча производилось по линии, эллипсу и окружности с частотой $f_c = 50, 100, 150, 200$ и 250 Гц и амплитудой $A = 10$ мм (рис. 2).

В результате экспериментальных исследований по наплавке было установлено, что ширина наплавленного слоя зависит от амплитуды сканирования и диаметра пучка лазерного излучения. При увеличении скорости обработки с 1,0 до 9,0 мм/с толщина слоя h 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 [9].

Исследования показали, что оптимальной, с энергетической точки зрения, является частота сканирования $f_c = 150$ Гц. При этом лазерный луч активизирует гидродинамические процессы в зоне расплава, позволяет регулировать распределение энергии по траектории сканирования, что сказывается на скоростях нагрева и охлаждения и приводит к получению

качественного слоя без пор, трещин, раковин и других дефектов.

Проведенные эксперименты со сканированием луча по одномерной траектории (линии) и двумерной траектории (окружность, эллипс) показали, что наилучшие результаты были получены со сканированием лазерного луча по эллипсной траектории (рис. 3): стабильный слой наблюдался при скорости обработки 2–4 мм/с, что объясняется оптимальным вложением энергии по траектории сканирования. Следует заметить, что при скорости обработки 1,0 мм/с хотя и наблюдалось увеличение высоты наплавленного слоя, но был замечен явный перегрев основного материала.

Экспериментальные исследования, проведенные с использованием иттербиевого волоконного лазера (1,07 мкм), подтвердили полученные ранее результаты по газопорошковой наплавке за один проход широких (до 20 мм) слоев.

В Лаборатории лазерных аддитивных технологий Института развития новых образовательных технологий разработан многофункциональный сканирующий блок, позволяющий расширить возможности лазерной обработки [10]. Разработанное устройство дает возможность при газопорошковой лазерной наплавке получить слой шириной до 20 мм и высотой до 5 мм за один проход, сохраняя при этом все преимущества лазерной обработки – минимальное смешивание основного и присадочного материалов, контролируемое малое проплавление, высокие скорости нагрева и охлаждения, высокопрочное сцепление с основой и т.д. Сканирующий блок имеет ряд модификаций для ис-

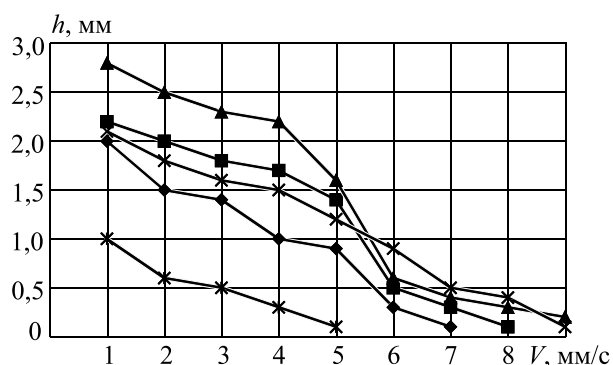


Рис. 2. Зависимость высоты наплавленного слоя от скорости обработки и частоты сканирования лазерного луча:

—♦— 50 Гц, —■— 100 Гц, —▲— 150 Гц, —✱— 200 Гц, —✱— 250 Гц

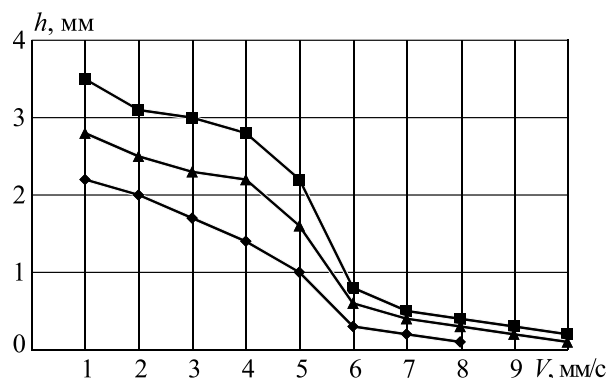


Рис. 3. Зависимость высоты наплавленного слоя от скорости обработки и траектории сканирования:

—♦— окружность, —■— линия, —▲— эллипс



Рис. 4. Сканирующий блок LT-8 волоконного лазера

пользования с волоконными лазерами (рис. 4) и CO_2 -лазерами (рис. 5), для обработки внешних и внутренних (рис. 6) локальных зон, а также для ручной обработки в труднодоступных местах и в составе мобильного комплекса (рис. 7).

Система сканирования лазерного луча позволяет наиболее эффективно использовать лазерное излучение и при этом получать зону обработки в 10-15 раз больше по сравнению с процессом без ее использования.

Для расширения возможностей обработки устройство снабжено коаксиальным и боковым соплами. Коаксиальное сопло предназначено для обработки зон со сложной конфигурацией, когда головка постоянно меняет направление движения. Для наплавки прямолинейных участков и поверхностей вращения с большими зонами обработки используется боковое сопло со сканатором. Газопорошковая смесь на выходе из сопла имеет нормальное распределе-



Рис. 6. Сканирующий блок LT-9 для обработки внутренних поверхностей

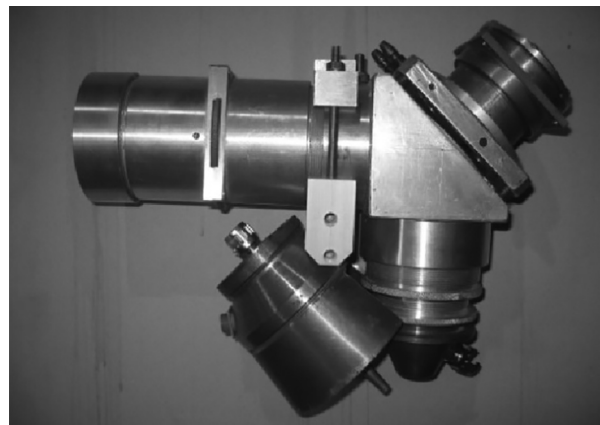


Рис. 5. Сканирующий блок LT-9 для CO_2 -лазера

ние по закону Гаусса, следовательно, плотность потока частиц порошка по краям газопорошковой струи будет меньше, чем в центральной части. При традиционной наплавке это обстоятельство практически не влияет на качество наплавленного слоя, так как размеры потока гораздо больше размеров лазерного луча в зоне расплава. При сканировании лазерного излучения зона взаимодействия увеличивается многократно, и недостаточное количество порошкового материала по краям слоя отрицательно сказывается на качестве наплавки.

Двухкоординатный сканатор сопла [11] позволяет получить равномерный поток газопорошковой струи по траектории сканирования лазерного луча. Данное устройство дает возможность использовать присадочный порошок с максимальной эффективностью, доводя коэффициент использования порошка до 89 %, в то время как традиционными методами наплавки можно достичь 65-67 %. При этом коэффициент формы (K_ϕ) наплавленного слоя может достигать до 0,8 против $K_\phi = 0,6$ при традиционной наплавке.



Рис. 7. Ручной блок для лазерной обработки

Для реализации процесса газопорошковой лазерной наплавки необходимо точное дозирование порошкового материала. Авторами был разработан специальный дозатор, который обладает рядом преимуществ перед существующими устройствами, представленными на рынке (рис. 8):

- расход порошка 0,1–50 г/с;
- возможность ступенчатой и плавной регулировки подачи порошка, транспортирующего и защитного газа с точностью дозирования 2,5 %;
- использование порошка любой фракции до 250 мкм и любой формы частиц без дополнительного просеивания;
- встроенная система антислипания и антислеживания частиц порошка в контейнере;
- наличие специального бункера со встроенной системой подогрева порошка;
- возможность изменения настроек дозатора, сканатора лазерного луча, сканатора газопорошкового сопла и расхода газов производится с единого пульта управления;
- система сопряжения обеспечивает дистанционное управление в составе лазерного комплекса.

Заключение

Сравнение возможностей технологических лазерных головок различного типа выявило преимущества обработки лазерным лучом с использованием разработанной системы сканирования для газопорошковой лазерной наплавки. Проведенные эксперименты дали возможность сделать выводы о том, что баланс вводимой энергии и отвода теплоты достигается при частоте сканирования остросфокусированного лазерного луча 150 Гц и траектории сканирования по эллипсу.

На основе полученных данных разработан многофункциональный сканирующий блок, расширяющий возможности лазерной обработки благодаря тому, что предложенная система сканирования лазерного луча позволяет наиболее эффективно использовать лазерное излучение и получать зону обработки в 10–15 раз больше, по сравнению с процессом без ее использования.

Многофункциональный сканирующий блок устанавливается на любую автоматизированную систему перемещения – координатный стол, робот, 3D принтер. Он может входить в состав многокоординатных обрабатывающих центров как один из инструментов при изготовлении, восстановлении и ремонте изношенных деталей машиностроения, авиа- и судострое-



Рис. 8. Дозатор порошковых материалов

ния, энергетического комплекса и металлургии, а также использоваться для лазерных аддитивных технологий «выращивания» деталей путем прямого инжестирования частиц порошка.

Список литературы

1. Кулиш А.М. Использование аддитивных технологий для получения деталей машиностроения // Молодежный научно-технический вестник. Электронный журнал. Эл. № ФС77-51038, МГТУ им. Н.Э. Баумана. № 5. 2015. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/issue/774080.html> (дата обращения: 15.12.2015).
2. Артюшкин Н.В., Соколов В.Г. Технологические применения мощных лазеров // Обсуждение современных проблем в мире физики. URL: <http://www.physics-online.ru/PaperLogos/6357/6357.pdf> (дата обращения: 07.11.2015).
3. Скрипченко А. Технологические головки для волоконных лазеров // Ритм. 2010. № 2 (50). С. 22–27.

4. Богданов А.В. Особенности оценки технологических возможностей промышленных лазеров // Технология машиностроения. 2011. № 11. С. 34–36.
5. Разработка оптических головок технологических установок с мощными волоконными лазерами / А.Ф. Ширанков, П.А. Носов, А.Г. Григорьянц, Р.С. Третьяков // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Приборостроение. 2012. С. 53–66.
6. Ермолаева А.С., Иванов А.М., Василенко С.А. Лазерные технологии и процессы при изготовлении и ремонте деталей газотурбинного двигателя // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2013. № 35. С. 49–53.
7. Акустооптические лазерные проекционные системы отображения телевизионной информации / Ю.В. Гуляев, М.А. Казарян, Ю.М. Мокрушин, О.В. Шакин // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 4. С. 283–300.
8. Пат. 158543 Российская Федерация, МПК В23К26/00. Зябрев И.А. Устройство для газопрошковой лазерной наплавки: заявл. 14.12.2015.
9. Шляпин А.Д., Порошин В.В., Зябрев И.А. Лазерная наплавка со сканированием излучения // Сб. науч. тр. Международ. Науч.-практич. конференция «Современные концепции научных исследований». Евразийский союз ученых. 2015. Ч. 2. № 6 (15). С. 89–91.
10. Пат. 2227313 Российская Федерация, МПК В23К26/00. Медведев Л.С., Браилко Н.Н., Каранетян К.Р. Способ и устройство лазерного сканирования: заявл. 29.10.2004 г.
11. Пат. 152718 Российская Федерация, МПК В23К26/00. Зябрев И.А. Сканатор сопла газопрошковой струи: заявл. 16.12.2014.

Материал поступил в редакцию 20.01.2016

**ЗЯБРЕВ
Игорь Александрович**

E-mail: scanrise@mail.ru
Тел.: (903) 720-55-58

Руководитель лаборатории лазерных аддитивных технологий Автономной некоммерческой организации «Институт развития новых образовательных технологий» (АНО «ИРНТО»). Сфера научных интересов – лазерные аддитивные технологии. Автор более 20 научных работ.

**КРАВЧЕНКОВ
Антон Николаевич**

E-mail: akravchenkov64@yandex.ru
Тел.: (499) 346-42-43

Кандидат технических наук, проректор по инновационному развитию АНО «ИРНТО». Сфера научных интересов – аддитивные технологии. Автор более 30 научных работ.

**ПОРОШИН
Валерий Владимирович**

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

Доктор технических наук, профессор, ректор АНО «ИРНТО». Сфера научных интересов – метрология, трибология. Автор более 200 научных работ.

**ШЛЯПИН
Анатолий Дмитриевич**

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

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение» Университета машиностроения (МАМИ). Сфера научных интересов – физика металлов, материаловедение. Автор более 200 научных работ.