

7. Егоров О. Д. Структурный анализ механизмов мехатронных устройств // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. № 2. С. 16—19.

8. Илюхин Ю. В. Роль метода компьютерного моделирования в познании технических объектов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2013. № 4 (27). С. 141—145.

9. Лукинов А. П. Применение метода сканирования пространства параметров в функциях натурального ряда чисел для решения задач проектирования и управления в машиностроении // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2009. № 3. С. 71—78.

10. Башевская О. С., Бушуев С. В., Подураев Ю. В., Ковальский М. Г., Кайнер Г. Б., Ромаш Е. В., Мельниченко Е. А. Разработка экспериментально-аналитической методики определения температурных деформаций концевых мер длины в нанометровом диапазоне // Измерительная техника. 2014. № 3. С. 8—11.

11. Башевская О. С., Бушуев С. В., Подураев Ю. В., Ковальский М. Г., Кайнер Г. Б., Ромаш Е. В. Исследование влияния температурных деформаций на точность линейных измерений // Измерительная техника. 2013. № 9. С. 34—36.

12. Grigoriev S. N., Krasnovskii A. N., Kazakov I. A. An international journal for the science and application of composite materials // Appl. Compos. Mater. 2014. Т. 21. № 4. С. 651—659.

13. Andreev V., Kuvshinov S., Pryanichnikov V., Poduraev Y. Education on the Basis of Virtual S.Learning Robotics Laboratory and Group-Controlled Robots // Conf. Proc. 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation — 2013: Procedia Engineering. 2014. V. 69. P. 35—40.

14. Марков Б. Н., Шарамков А. Б. Использование результатов калибровки координатно-измерительных машин Faro Arm для сравнительной оценки их точностных возможностей // Измерительная техника. 2014. № 8. С. 19—21.

15. Григорьев С. Н., Телешевский В. И., Глубоков А. В., Педь С. Е., Глубокова С. В. Проблемы метрологического обеспечения подготовки производства в машиностроении // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 27—29.

16. Григорьев С. Н., Мастеренко Д. А., Телешевский В. И., Емельянов П. Н. Современное состояние и перспективы развития метрологического обеспечения машиностроительного производства // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 56—59.

17. Егоров О. Д. Механика электромеханических роботов. М.: МГТУ «СТАНКИН», 2009.

18. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, 1989.

19. Chernov N. Circular and Linear Regression Fitting Circles and Lines by Least Squares. London: CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.

Дата принятия 29.05.2015 г.

681.786.42

Средства оптического диагностирования селективного лазерного плавления с излучением, альтернативным гауссову

А. В. ГУСАРОВ, А. А. ОКУНЬКОВА, П. Ю. ПЕРЕТЯГИН, И. В. ЖИРНОВ,
П. А. ПОДРАБИННИК

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, e-mail: a.okunkova@stankin.ru

Разработана система оптического мониторинга и диагностики процесса селективного плавления лазерным лучом с различными распределениями плотности мощности. Выявлена взаимосвязь между распределениями плотности мощности и геометрическими параметрами единичных треков. Обнаружены технологические окна формирования стабильных единичных треков для различных распределений, произведена высокоскоростная съемка процесса.

Ключевые слова: аддитивное производство, селективное лазерное плавление, модуляция лазерного луча, оптический контроль и диагностика.

A system of optical monitoring and diagnostics of the selective laser melting process with alternative beam power density distributions is developed. The experimental work showed the correlation between obtained power density distribution and geometrical parameters of single tracks. The technological gaps of stable track formation for different distributions were detected, high-speed process photography have been realized.

Key words: additive manufacturing, selective laser melting, laser beam modulation, optical control and diagnostics.

В настоящее время интенсивно развиваются способы быстрого прототипирования. Одним из перспективных методов, позволяющих за короткое время получать изделия сложной конфигурации из широкого спектра материалов, является метод селективного лазерного плавления (СЛП) [1—3]. Он находит широкое применение в машино- и авиастроении, медицине, где существует необходимость созда-

ния индивидуальных протезов и имплантов. Суть метода — послойное сплавление порошка под действием лазерного излучения в соответствии с исходной 3D-моделью. Порошок наносят на подложку, разравнивают роликом или ракелем и сплавляют лазером в соответствии с текущим сечением 3D-модели. Затем подложку опускают на один уровень и процесс повторяют. Будущее изделие формируется в слое по-

рошка, таким образом минимизируется количество поддержек, необходимых для бездефектного построения изделия [4, 5].

Однако до сих пор не решены задачи по уменьшению негативных последствий этой технологии, отражающиеся на качестве конечного изделия. В основном, это связано с процессом СЛП гранул порошка [6]. В момент сплавления происходит некоторый выброс гранул в зоне обработки. В результате они разлетаются, нарушая околослойный гранулометрический состав каждого слоя, что приводит к ряду отрицательных явлений, например к химическому взаимодействию гранул с защитной средой в камере и др. Также среди негативных эффектов выделяют перегрев ванны расплава и эффект Марангони [7]. Описанные эффекты могут быть непосредственно связаны с особенностью распределения градиента плотности мощности излучения в пятне лазерного луча, когда создается высокоскоростной поток жидкого металла в зоне обработки. Такое распределение получило название гауссова распределение или TEM₀₀-мода. Данную проблему можно решить или уменьшить ее влияние с помощью модификации оптической системы для модуляции излучения в пятне. Таким образом, градиент плотности мощности можно скорректировать для создания на поверхности ванны расплава оптимальных условий тепломассопереноса, ликвидирующих и снижающих эффект выброса гранул порошка [8–10].

Также можно повысить качество изделий, подобрав оптимальные параметры процесса. Критерий их определения — соответствие изделия заявленным характеристикам по геометрической точности, качеству микроструктуры и механическим свойствам. Процесс плавления порошка включает множество непостоянных входных параметров и их комбинаций, что существенно усложняет поиск оптимальных режимов. Поэтому целесообразно использовать системы оптического мониторинга процесса СЛП, что позволяет собирать достаточное количество данных для диагностирования возникающих негативных эффектов и объяснения некоторых процессов [11].

В настоящее время ни на одной из промышленных машин не установлена система контроля процесса плавления [12]. Производственный контроль качества выполняет на глаз оператор оборудования. Таким образом, разработка средств оптического диагностирования СЛП с альтернативным гауссовым излучением является актуальной задачей.

Постановка задачи. Исследования в области модуляции лазерного излучения показали возможность получения равномерных температурных полей в зоне нагрева при использовании обратного гауссова распределения плотности мощности лазерного луча и распределения с плоским верхом [13]. Многие ученые отмечали примерно одинаковый набор (12 позиций) параметров процесса СЛП, связанных с лазерным излучением, установочной платформой, газовой средой и характеристиками порошка [14, 15]. Все эти параметры были разделены на входные и выходные.

К основным входным контролируемым параметрам можно отнести мощность лазерного излучения, длину лазерной волны, режим пульсации, диаметр луча в фокусе, профиль и фактор качества луча, его скорость сканирования по поверхности обработки, используемую стратегию обработки лазерным лучом. Выходными параметрами обработки принято считать измеряемые характеристики, влияющие на функциональность изделия: полученные геометрическая точ-

ность, шероховатость поверхностей и микроструктура (поры, остаточные трещины), механические свойства изделия. В свою очередь, при СЛП указанные измеряемые выходные параметры изделия находятся в прямой зависимости от измеряемых параметров формирования единичного трека изделия: геометрические параметры (высота, ширина, глубина проплавления), металлургическая и геометрическая однородность, зона консолидации порошка (термического воздействия). Кроме контролируемых входных параметров существуют неконтролируемые и частично контролируемые параметры атмосферы в камере плавления и параметры порошка. Атмосфера характеризуется составом, термическими свойствами, температурой. Также учитываются температура подложки, на которой выращивается изделие, непроницаемость камеры установки (присутствие кислорода). Основные свойства порошка: его состав и термические свойства (не все порошки пригодны для использования при СЛП); характеристики гранул (форма и размер: считается, что круглая форма более предпочтительна для лучшей абсорбции энергии луча). Необходимо учитывать толщину насыпаемого слоя, которая должна, прежде всего, соответствовать размеру гранул порошка. Среди негативных эффектов обработки можно выделить такие, как выброс гранул порошка вследствие термического удара и их химическое взаимодействие с атмосферой.

Таким образом, основные задачи исследования — анализ существующих установок для СЛП, разработка оптической системы экспериментальной установки, выявление параметров системы, при которых наблюдается формирование альтернативных распределений лазерного луча, апробирование разработанной системы с помощью средств оптического мониторинга и диагностики.

Экспериментальный стенд оптического диагностирования. Существует несколько основных производителей установок для СЛП, например EOS и Concept (Германия), Phenix Systems (Франция), Renishaw (Англия). Принципиально эти установки устроены одинаково: лазерный луч выходит из коллиматора, попадает в сканатор и затем обрабатывает необходимую область нанесенного слоя порошка в рабочей плоскости в соответствии с текущим сечением, потом рабочая платформа опускается на толщину порошкового слоя и процесс повторяется. Везде используют в конструкции лазер с гауссовым распределением плотности мощности и, как следствие, все установки имеют описанные выше недостатки, присущие данному распределению.

Для исследований в лаборатории инновационных аддитивных технологий МГТУ «СТАНКИН» был сконструирован экспериментальный стенд оптического диагностирования (рис. 1). Процесс конструирования состоял из двух основных этапов. Первый — размещение комплекса оптических модулей для формирования лазерного луча необходимого сечения и его перемещения, а также оборудования для проведения оптического мониторинга и диагностики. Второй направлен на обеспечение точного перемещения бункера с порошком, высокоточной платформы, являющейся подложкой для будущего изделия, и разравнивающей системы. Все перечисленные узлы соединяли с автоматически управляемым контроллером для перемещений.

В качестве источника лазерного излучения использован волоконный иттербиевый лазер ЛК-200-В 8 (см. рис. 1) с дли-

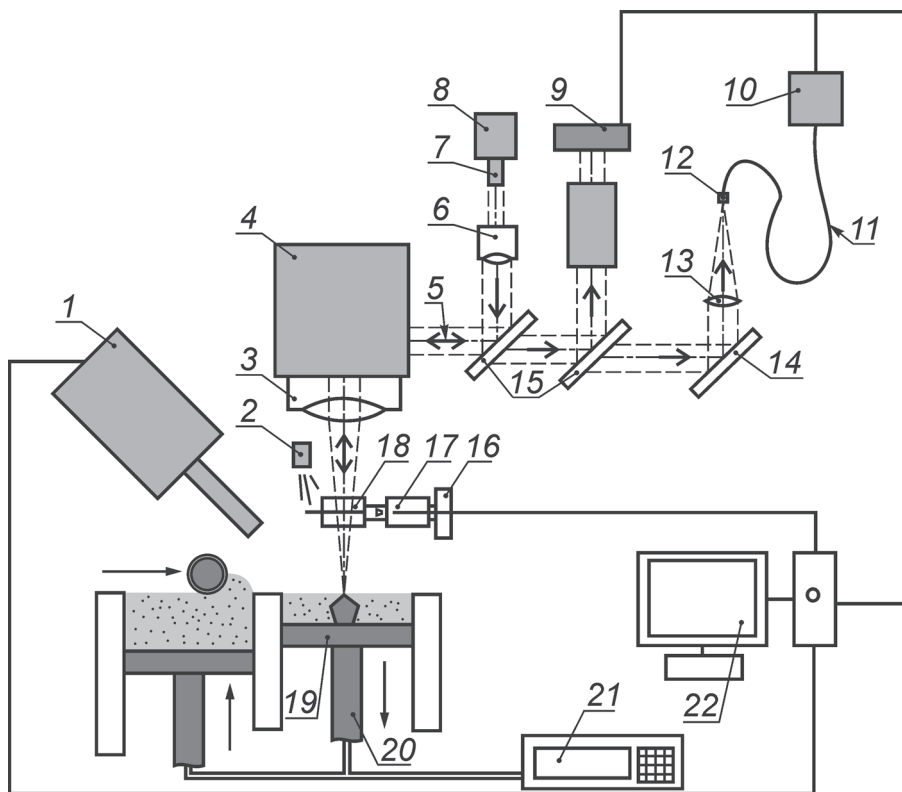


Рис. 1. Схема экспериментального стенда оптического диагностирования:

1 — высокоскоростная ПЗС-камера; 2 — лазерная подсветка; 3 — f-theta линза; 4 — сканатор; 5 — траектория движения лазерного луча; 6 — модуль pi-Shaper; 7 — коллиматор; 8 — источник лазерного излучения; 9 — ИК-камера ближнего диапазона; 10 — пирометр; 11 — оптическое волокно; 12 — приемник сигнала; 13 — линза пирометра; 14, 15 — зеркала; 16 — ПЗС-камера LaserCam-HRTM; 17 — аттенюатор; 18 — оптическое зеркало BCube; 19 — рабочая платформа; 20 — движущийся поршень; 21 — электронный микрометр; 22 — электронно-вычислительная машина

ной волны $\lambda = 1,07$ нм и максимальной мощностью $P = 200$ Вт. Для перемещений луча по необходимому контуру в рабочей плоскости в оптической системе установки применен сканатор 4. Между сканатором и источником лазерного излучения установлен модуль pi-Shaper 6 для трансформации гауссова распределения плотности мощности лазерного луча по принципу его преломления асферичными оптическими поверхностями. Непосредственно после сканатора луч проходит через фокусирующую f-theta линзу 3, которая увеличивает маркируемую площадь при лазерной обработке. Далее луч попадает непосредственно на рабочую поверхность для обработки нанесенного слоя порошка. Контроль профиля лазерного луча осуществляет система, состоящая из оптического зеркала BCube 18, аттенюатора 17 и ПЗС-камеры LaserCam-HRTM 16. Сигнал регистрирует ПЗС-камера. Однако технические характеристики устройства позволяют обрабатывать лазерный луч мощностью не более 4 Вт. В связи с этим возникает необходимость в использовании аттенюатора — пассивного устройства, ослабляющего проходящий через него сигнал в необходимом количестве раз перед подачей его на камеру. Сигнал с камеры передается на электронно-вычислительную машину 22, которая обрабатывает его с помощью специального программного обеспечения и представляет перед оператором в удобном для интерпретации виде. Первый элемент системы оптического монито-

ринга и диагностики — высокоскоростная ПЗС-камера 1 фиксирует процесс СЛП в видимом диапазоне; максимальная скорость съемки 775000 кадр/с, максимальное разрешение 1024×1024 пикселей. Для функционирования камеры области съемки освещают лазерной подсветкой CaviLux 2. Также камера оснащена световым фильтром, защищающим получаемое изображение от генерируемого подсветкой излучения, и макрообъективом для съемки мелких деталей. Инфракрасная камера ближнего диапазона 9 необходима для получения информации о зоне термического влияния в процессе обработки, ее разрешение 560×760 пикселей и время выдержки 3 мс. Калибруют устройство с помощью черного тела в диапазоне температур 1200—1800 К. Для измерений температуры непосредственно в зоне воздействия лазерного луча используют двухволновый пирометр 10, способный регистрировать значения 1200—2900 К. Механическая часть экспериментальной установки — изготовленная из низкоуглеродистой стали высокоточная рабочая платформа 19, на которой формируется изделие; она расположена на поршне 20, приводимом в движение шаговым двигателем, которым управляет электронный микрометр 21.

В качестве материала порошка для проведения эксперимента выбран сплав CoCrMo. Химический состав CoCrMo: Co — 60—65 %; Cr — 26—30 %; Mo — 5—7 %; Si — >1 %; Mn — >1 %; Fe — >0,75 %; C — >0,16 %; Ni — >0,1 %. Порошок получен методом газовой атомизации, имеет сферическую форму частиц, средний диаметр которых менее 50 мкм. Ввиду ограниченности пространства и большого количества используемого оборудования, процесс сплавления происходил на воздухе, без установки дополнительного защитного кожуха. Применение CoCrMo сплава в процессе в СЛП показало, что данный материал обладает наибольшей жаростойкостью по сравнению с другими используемыми в этом процессе материалами (Ti6Al4V, мартенситно-стареющая сталь и т. д.).

Толщину слоя порошка контролировали с помощью оптического микроскопа Olympus BX51M. Шлифы изготавливали на оборудовании пробоподготовки ATM Machine Tools (Германия), состоящем из отрезного станка, гидравлического пресса и станка для полирования. Чтобы исследовать глубину проплавления и структуру треков, применяли тот же микроскоп. Номинальная толщина слоя порошкового материала составила 80 мкм. В соответствии с техническими требованиями эксплуатации сканатора подложку с нанесенным порошком устанавливали так, чтобы расстояние от линзы до рабочей зоны составило 420 мм. В результате этого фокус лазерного луча находился непосредственно на нанесенном слое. Такое положение подложки принимали за нулевое.

Ввиду особенностей экспериментального стенда и для снижения влияния возможных погрешностей на результаты поворотное кольцо системы профилирования лазерного пучка pi-Shaper зафиксировали. Распределение плотнос-

ти мощности зависит от расстояния между фокусом линзы сканатора и рабочей зоной. Для лазерного луча были определены эффективные диаметр и площадь, составившие 0,111 мм и 0,261 мм², соответственно. Для расчета расстояния между различными распределениями плотности мощности в луче использовали формулу

$$R = 8\lambda f^2 / (\pi D^2),$$

где f — фокусное расстояние f -theta объектива; D — диаметр луча на выходе коллиматора.

Зная расстояние R , можно так перемещать рабочую поверхность, чтобы плавление металлического порошка происходило при различных плотностях мощности. Было проведено пробное сплавление треков на пустой подложке. Со поставление толщины полученных треков с эффективными диаметрами лазерного луча при различных распределениях позволяет судить о достижении на данном уровне той или иной моды. Перемещение рабочей поверхности проводили следующим образом. За абсолютный нуль принимали положение рабочей поверхности на одном уровне с рабочей платформой экспериментальной установки, которое соответствовало обратному гауссову распределению. В фокусе f -theta объектива, а именно в положении –15 мм относительно нулевой отметки, имело место гауссово распределение, а положение –5 мм соответствовало плоскопараллельному распределению. С помощью ПЗС-камеры были определены эффективные диаметр и площадь лазерного луча для плоскопараллельного распределения и обратного гауссову (таблица).

Измеренные ПЗС-камерой LaserCam HRTM параметры распределений плотности мощности

Вид распределения	Эффективный диаметр, мм	Эффективная площадь, мм ²
Гауссово	0,111	0,261
Плоскопараллельное	0,260	0,165
Обратное гауссову	0,347	0,124

Так как готовое изделие является суперпозицией единичных треков, то подбор оптимальных параметров целесообразно начинать с них. План эксперимента предполагал проработку 25 групп параметров, в каждой по 5 единичных треков. Все эксперименты выполняли с применением средств оптической диагностики. Например, визуализировали процесс высокоскоростной камерой Photron SA5 с фильтром на 810 нм для исключения негативного влияния лазерного и термального излучений. Чтобы обеспечить наилучшую фиксацию вылета частиц порошка из ванны расплава были выбраны такие параметры съемки: скорость срабатывания затвора 999 мкс, разрешение 1024×1024 пикселей.

Результаты исследования. С помощью полученных излучений были обработаны единичные СЛП-треки. Для каждого распределения варьировали два входных параметра: мощность лазерного излучения в диапазоне $P = 10...200$ Вт и скорость сканирования $v = 5...100$ мм/с. Для всех распределений наблюдали два основных технологических окна формирования стабильных треков на малых и больших мощностях: гауссово — $P = 30...70$ Вт, $v = 5...20$ мм/с и $P = 130...150$ Вт, $v = 40...70$ мм/с; плоскопараллельное — $P = 50...70$ Вт, $v = 5...20$ мм/с и $P = 130...200$ Вт, $v = 40...80$ мм/с;

обратное гауссову — $P = 70...130$ Вт, $v = 5...20$ мм/с и $P = 150...200$ Вт, $v = 40...100$ мм/с. При этом в соответствии с изменениями распределений в сторону увеличения пятна наблюдали расширение технологических окон и их смещение в зону сверхвысоких мощностей и скоростей, что дало оптимистический прогноз использования при СЛП лазеров повышенной мощности. Для двух технологических окон были выбраны две средние группы параметров: $v = 10$ мм/с, $P = 70$ Вт; $v = 70$ мм/с, $P = 170$ Вт (рис. 2), которые наиболее ярко демонстрируют влияние оптических средств изменения профиля луча на выходные параметра процесса. При этом значения $P = 200$ Вт и $v = 100$ мм/с — границы технологических окон.

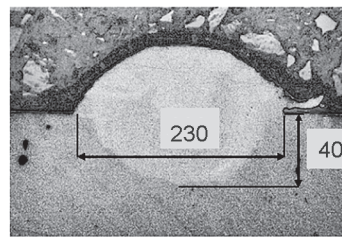
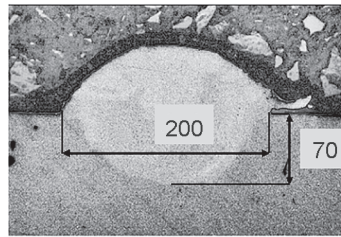
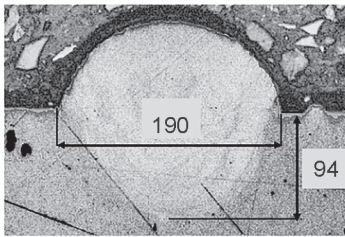
При обработке на малых мощностях при гауссовом распределении наблюдали большую глубину проплавления из-за большой концентрации энергии в центре пятна, что свидетельствует о кинжальном характере проплавления. Это негативно влияет на качество будущего изделия, так как нижележащие слои подвергаются многократному расплавлению и затвердеванию. Для образования прочной связи с подложкой достаточно небольшой глубины проплавления, которая наблюдается при изменении плотности мощности на плоскопараллельное и обратное гауссову.

При работе на повышенных мощностях присутствует обратный эффект — глубина ванны расплава увеличивается при изменении плотности мощности. Минимальную глубину проплавления в этом случае наблюдали при гауссовом распределении. Вследствие неравномерного увеличения скорости и мощности происходит уменьшение погонной энергии. Однако оптическая диагностика показала наличие некоторой динамической составляющей при формировании трека. Это всегда является причиной появления таких дефектов микроструктуры, как поры и трещины, а сами треки имеют волнообразный характер затвердевания. Необходимо отметить, что при работе на больших мощностях с распределением, обратным гауссову, получили большое технологическое окно стабильных параметров, ограниченное техническими характеристиками используемого оборудования. В дальнейшем эксперимент планируется продолжить с применением более мощного оборудования.

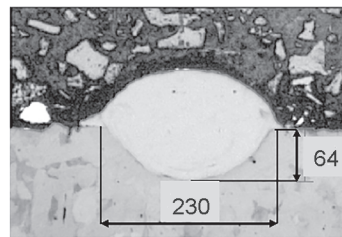
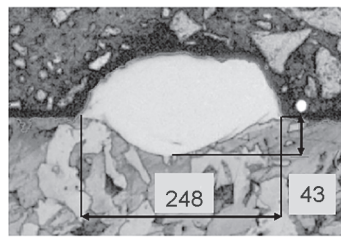
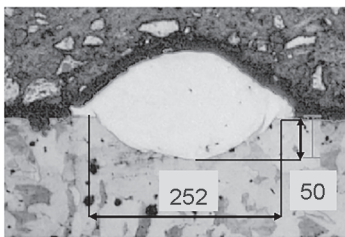
С помощью системы оптического мониторинга были получены данные о выбросе частиц порошка из зоны воздействия лазерного луча. Удалось проанализировать это явление для всех трех распределений плотности мощности по таким параметрам, как скорость вылета частиц, их количество и направление. Так, запись процесса СЛП на высокоскоростную камеру продемонстрировала уменьшение количества гранул, вылетающих из ванны расплава, и заметно сниженную скорость этих частиц при распределении плотности мощности, обратном гауссову. Также было зафиксировано снижение воздействия эффекта Марангони, что должно оказать положительное влияние на микроструктуру единичных треков, приводя к уменьшению образования пор и трещин.

Выводы. Разработана система оптического мониторинга и диагностирования процесса СЛП и выполнен комплекс исследований процесса с альтернативными гауссову распределениями плотности мощности, проведен анализ полученных данных. В ходе исследования выявлено, что единичные треки, получаемые при различных распределениях плотности мощности, имеют отличия как по качеству микроструктуры, так и по геометрии валиков (см. рис. 2). Использование отличного от гауссова распределения приводит к значительному уменьшению свободной от порошка зоны, что является

$P = 70 \text{ Вт}$
 $v = 10 \text{ мм/с}$



$P = 170 \text{ Вт}$
 $v = 70 \text{ мм/с}$



а

б

в

Рис. 2. Результаты оптической микроскопии единичных треков:

цифрами в микрометрах указаны их геометрические параметры а, б, в — соответствуют видам распределений — гауссову, плоскопараллельному, обратному гауссову

ся положительным моментом при соблюдении допусков на размер изготавливаемой детали. При плоскопараллельном распределении улучшается качество проплавления трека в подложку, где наблюдается более однородная структура, обуславливающая хорошую металлургическую связку. Эти явления позволяют сделать вывод, что процесс СЛП имеет большую зависимость от распределения плотности мощности, особенно при ее больших значениях.

Исследования в области оптического контроля технологического процесса СЛП показали, что система видеонаблюдения за рабочей зоной позволяет контролировать геометрические параметры зоны траектории сканирования и интегрально оценивать процесс плавления, выявлять дефекты. С помощью аксиальной системы диагностики можно детально определить влияние главных входящих параметров процесса (скорости сканирования, мощности излучения, толщины слоя порошка, шага траектории сканирования), которое необходимо учитывать при внедрении новых типов порошковых материалов с композитным гранулометрическим составом. Решение конструкторских задач позволит применить рассмотренную систему в промышленных установках для СЛП и осуществить оптический контроль технологического процесса непосредственно во время производства изделия.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (гос. задание № 9.811.2014/К).

Л и т е р а т у р а

1. Kruth J.-P., Leu M. C., Nakagawa T. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping // Annals CIRP. 1998. V. 47. P. 525—540.
2. Григорьев С. Н., Смуров И. Ю. Перспективы развития инновационного аддитивного производства в России и за рубежом // Инновации. 2013. № 10 (180). С. 76—82.
3. Григорьев С. Н. Тенденции и проблемы модернизации машиностроительного производства на базе отечественного станкостроения // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2010. № 3. С. 7—13.

4. Волосова М. А., Окунькова А. А. Пути оптимизации процесса селективного лазерного плавления при помощи выбора стратегии обработки лазерным лучом // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4. С. 587—591.

5. Doubenskaia M., Smurov I., Grigoriev S., Pavlov M. Complex analysis of elaboration of steel-TiC composites by direct metal deposition // J. Laser Appl. 2013. V. 25. N. 4. P. 042009.

6. Doubenskaia M., Pavlov M., Grigoriev S., Smurov I. Definition of brightness temperature and restoration of true temperature in laser cladding using infrared camera // Surf. Coat. Techn. 2013. V. 220. P. 244—247.

7. Okunkova A., Peretyagin P., Vladimirov Yu., Volosova M., Torrecillas R., Fedorov S. V. Laser-beam modulation to improve efficiency of selecting laser

melting for metal powders // Proc. SPIE. 2014. V. 9135: Laser Sources and Applications II, 913524. DOI:10.1117/12.2053602.

8. Okunkova A., Volosova M., Peretyagin P., Vladimirov Yu., Zhirnov I., Gusarov A. V. Experimental Approbation of Selective Laser Melting of Powders by the Use of Non-Gaussian Power Density Distributions // Phys. Proc. 2014. V. 56. P. 48—57.

9. Смуров И. Ю., Ядроцев И. А., Мовчан И. А., Окунькова А. А., Черкасова Н. Ю., Антоненкова Г. В. Аддитивное производство с помощью лазера. Проведение экспериментальных работ // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. № 1. С. 36—38.

10. Тарасова Т. В., Гвоздева Г. О., Тихонова Е. П. Перспективы использования лазерного излучения для поверхностной обработки цветных сплавов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. Т. 2 (20). С. 140—143.

11. Павлов М. Д., Конов С. Г., Окунькова А. А., Назаров А. П. Особенности использования средств оптического контроля при изготовлении изделий методом селективного лазерного плавления // Контроль. Диагностика. 2012. № 12. С. 45—50.

12. Смуров И., Дубенская М., Григорьев С. Н., Котобан Д. В., Подрабинник П. А. Применение методов лазерной инженерии поверхности для решения трибологических проблем // Трение и износ. 2014. Т. 35. № 6. С. 682—690.

13. Hendriks A., Naidoo D., Roux F.S., López-Mariscal C., Forbes A. The generation of flat-top beams by complex amplitude modulation with a phase-only spatial light modulator // Proc. SPIE. 2012. P. 8490.

14. Klocke F., Wagner C., Ader C. Development of an integrated model for selective laser sintering // Proc. 36th CIRP Intern. Seminar on Manufacturing Systems, Saarbrücken, Germany. 2003. P. 387—392.

15. Voelkel R., Weible K. J. Laser Beam Homogenizing: Limitations and Constraints // Proc. SPIE. 2008. [Электрон. ресурс] www.suss.com (дата обращения 01.03.2015 г.).

Дата принятия 27.05.2015 г.