

Адаптивное регулирование процесса лазерного нанесения металла по оптическому сигналу

Ю. Н. Завалов, А. В. Дубров,* П. С. Родин, В. Д. Дубров
ИПЛИТ РАН — филиал ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН
Россия, 140700, Московская область, Шатура, Святоозерская, д. 1.
(Статья поступила 19.03.2020; подписана в печать 19.03.2020)

Рассмотрены особенности управления параметрами процесса лазерного нанесения металла по оптическому сигналу. Показано, что для контроля и управления процессом необходимо использование принципов адаптивного регулирования. Проведен обзор исследований в области систем управления процессом лазерного аддитивного производства металлических изделий. Описана разработанная система оперативного управления лазерным нанесением металла с обратной связью по оптическому сигналу из зоны обработки. Система обеспечивает распознавание отклонений в течении процесса в реальном времени и выполняет корректирующие воздействия для поддержания процессов в требуемом режиме. Использование разработанной системы управления привело к снижению отклонения высоты дорожки от заданного значения на траекториях с резкими поворотами.

PACS: 42.62.Cf

УДК: 535.8.

Ключевые слова: адаптивное регулирование, лазерное нанесение металла, оптическая диагностика.

ВВЕДЕНИЕ

Физические процессы, сопровождающие технологию лазерного нанесения металла (ЛНМ) характеризуются меньшей стабильностью по сравнению с традиционными производственными технологиями. Такое непостоянство ведёт к возникновению неоднородностей при построении и ограничивает применение ЛНМ для изготовления критических структурных элементов, а также в аэрокосмической и медицинской отраслях [1]. Для обеспечения требуемого уровня качества и стабильности процесса ЛНМ необходимо своевременно и точно определять аномалии в динамике процесса для того, чтобы иметь возможность провести корректирующую процедуру. Необходимо в реальном времени управлять технологическими параметрами ЛНМ, например, такими как скорость сканирования и лазерная мощность, контролируя характеристики наносимого слоя: температуру и площадь области расплава, высоту наносимого слоя и т.д. [2]. В данной работе представлены результаты исследования разрабатываемой системы адаптивного регулирования, которая должна обеспечить распознавание отклонений характеристик наносимого слоя в реальном времени с выработкой необходимого корректирующего воздействия для поддержания требуемого режима процесса ЛНМ.

1. ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛА ПО ОПТИЧЕСКОМУ СИГНАЛУ

В настоящее время в мире активно ведутся исследования в отношении оперативного мониторинга и управ-

ления процессами при ЛНМ из металлических материалов [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. В [3] предложены основные параметрические зависимости для построения системы управления с обратной связью. В ряде работ были рассмотрены схемы обратной связи с управлением скоростью сканирования и контролем высоты формируемой дорожки, или, в более общей формулировке, с контролем скорости нанесения массы материала. Подобные системы управления исследованы в работах [1, 4] и более ранних работах, обзор которых представлен в [5]. Также изучалось построение системы управления мощностью лазера с контролем температуры расплава. Система такого рода была исследована в работе [6], где также показана необходимость многопараметрического управления технологическим процессом. Контроль привносимого количества тепла и скорости охлаждения с управлением мощностью лазера использовался в [7]. В работе [8] предложено учитывать текущее значение расхода порошка при контроле высоты формируемой дорожки. В [9] обращено внимание на то обстоятельство, что формирование микроструктуры материала зависит от скорости охлаждения на фронте кристаллизации, которая, в свою очередь, может существенно варьироваться при изменении управляемых параметров, таких как мощность лазера и скорость сканирования. В таком случае при построении системы управления предложено ориентироваться на результирующие значения скорости охлаждения. В работах [6, 8, 9] величина теплового притока оценивается путем измерения размера ванны расплава с использованием SWIR или MWIR регистрирующих матриц. В [10] показана необходимость контроля как высоты дорожки, так и температуры поверхности расплава.

Проблема идентификации объекта контроля рассмотрена в работах [3, 4, 7, 8, 9, 10]. Для идентификации статической модели ЛНМ нами ранее были определены зависимости производительности процес-

*E-mail: dubrov.av@mail.ru

са, геометрических размеров дорожки и глубины проплавления подложки от обобщенного технологического параметра, интенсивности излучения и энергии на единицу облученной поверхности. Результаты проведенных экспериментов опубликованы в работах [12, 13], где также предложен метод параметризации экспериментальных данных в пространстве обобщенных технологических параметров при масштабировании производительности процесса ЛНМ. В данных работах показано, что яркостная температура (T^*), определяемая максимальной температурой поверхности расплава, и массовая производительность формирования дорожки (G) снижаются с ростом расстояния от подложки до перетяжки потока порошка, при этом относительное изменение производительности связано с относительным изменением температуры, как:

$$\frac{\delta G(h)}{G(h)} \approx \frac{5}{3} \frac{\delta T^*(h)}{T^*(h)}.$$

Связь изменений T^* и G со скоростью сканирования рассмотрена в работе [14], из результатов которой следует, что относительное изменения температуры с ростом скорости сканирования V слабее относительного изменения G :

$$\frac{\delta G(V)}{G(V)} \approx 3 \frac{\delta T^*(V)}{T^*(V)}.$$

Более слабая зависимость температуры от мощности лазера, по сравнению с зависимостью производительности была отмечена в работах [3, 6].

Опыт создания систем управления процессом ЛНМ с целью поддержания требуемого режима показывает, что необходимо построение многоконтурной системы управления технологическими параметрами с контролем нескольких характеристик процесса. При этом особенно внимательно следует подходить к выбору способа управления параметрами процесса во избежание ухудшения качества формируемого изделия. Изменение мощности лазера может привести к изменению скорости охлаждения на фронте кристаллизации, изменение скорости сканирования сопровождается изменением расхода порошка на единицу длины дорожки, а оперативное изменение массового расхода порошка затруднительно.

В [15] показано, что задача поддержания устойчивого режима формирования дорожки с неоднородно распределенными по объему расплава физическими свойствами путем управления параметрами технологического процесса должна быть сведена к задаче адаптивного управления или адаптивного регулирования. В [11] были представлены результаты использования методов адаптивного регулирования при послойном синтезе изделия в процессе ЛНМ. В случае, когда идентификация статической модели процесса невозможна, или параметры процесса изменяются во времени, используется система адаптивного управления. В системе адаптивного управления переменная процесса

должна носить детерминированный характер, то есть быть достоверно известной. В системе с адаптивным регулированием, в основе которой лежит идентификация статической и динамической модели процесса, переменная процесса может иметь случайную составляющую. В работе [15] также сформулированы особенности и способы повышения устойчивости системы адаптивного регулирования технологического процесса, в котором целевая функция переменной процесса зависит от большого числа параметров с существенно различными характерными временами их изменения.

2. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЛАЗЕРНОГО НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛА ПО ОПТИЧЕСКОМУ СИГНАЛУ

Экспериментальная установка изображена на рис. 1 и включает порошок питатель 1 (GTV), лазерную головку 2 (Precitec), волоконный лазер с максимальной мощностью 400 Вт (IPG), трёхкоординатный стол 4 с ЧПУ управлением, на котором закрепляется подложка 3. Коаксиальное сопло лазерной головки формирует сходящийся кольцевой поток порошка. Использовался порошок аустенитной стали ПР-Х18Н9 с гранулометрическим составом (40...100) мкм. Расход порошка составлял 140 мг/с.

Для контроля процессов тепломассопереноса в ванне расплава, сопровождающих формирование дорожки, была разработана оригинальная многоканальная система оптической диагностики (СОД). Оптическая часть СОД размещена на оптической скамье, закрепленной на лазерной головке под углом 53° к горизонтальной плоскости, и включает линзу 5, которая переносит оптическое изображение ванны расплава на приемную часть сенсора 6. В ней торцы оптоволоконных кабелей шести каналов конструктивно размещены в ряд на расстоянии 0.3 мм друг от друга. Для юстировки сенсора используется пятикоординатный транслятор 7 (Standa). Излучение локальных областей расплава подается на фотодетекторы, каждый из которых состоит из двух фотодиодов разных типов, установленных на одной оптической оси и имеющих чувствительность в разных спектральных диапазонах. Диапазоны чувствительности с учетом использованных дополнительных оптических фильтров составляют (1.7...2.2) мкм у фотодиода первого типа и (0.95...1.4) мкм у фотодиода второго типа. Используются два универсальных модуля АЦП LTR11 в составе крейта LTR-EU-8 (L-CARD) для оцифровки токов фотодиодов. Глубина квантования составляла 14 бит, шаг дискретизации — 200 мкс. СОД позволяет получать распределение яркостной температуры в 6-ти подобластях зоны расплава, и контролирует долю лазерного излучения, отраженную от поверхности расплава в направлении оптического сенсора.

В качестве регулируемого параметра процесса была выбрана мощность лазерного излучения. Мощность изменяется относительно уровня, заданного в коде

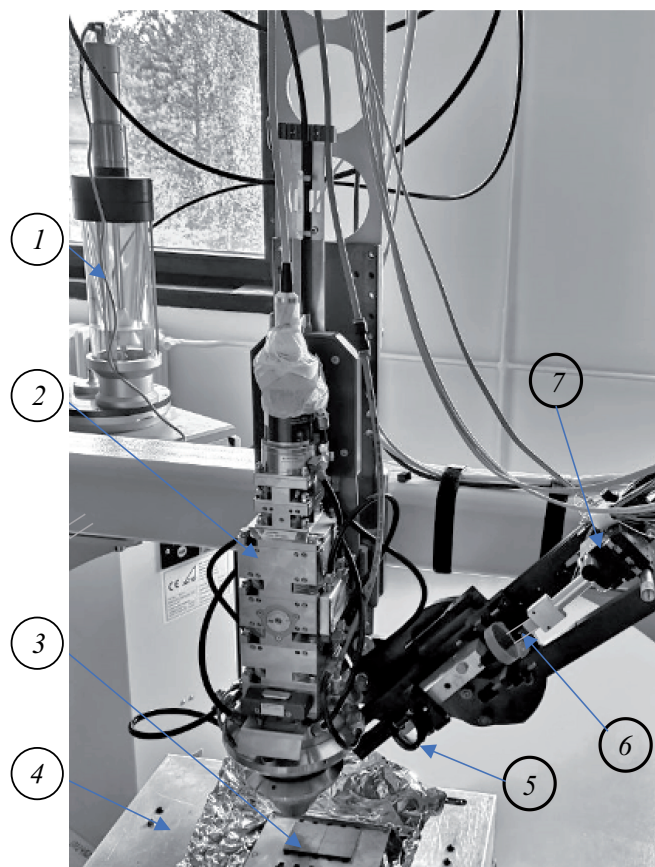


Рис. 1: Экспериментальная установка: 1 — порошок-питатель, 2 — лазерная головка, 3 — подложка, 4 — трёхкоординатный стол, 5 — линза СОД, 6 — сенсор СОД, 7 — 3D транслятор сенсора

управляющей ЧПУ-программы. Предполагается, что с изменением мощности лазера изменяется объем ванны расплава и, следовательно, массовая производительность формирования дорожки.

В процессе апробации методов адаптивного регулирования технологического процесса был проведен анализ данных многоканальной СОД, и в качестве входного сигнала регулятора использован синтетический сигнал, включающий усреднение пирометрического сигнала яркостной температуры с 4-ех пространственных областей и долю отраженного лазерного излучения. Это позволило, в частности, компенсировать зависимость сигнала СОД, установленной под наклоном, от направления движения, и расширить диапазон допустимых расстояний между соплом и рабочей поверхностью.

Степенная зависимость токов фотодиодов пирометра от температуры позволяет частично скомпенсировать более слабую зависимость температуры от технологических параметров по сравнению с изменением G . Однако в этом случае возрастают пульсации сигнала. С целью снижения размаха пульсаций проводилось пространственное и временное усреднение сигнала, усреднялись данные измерения температуры в 4-ех

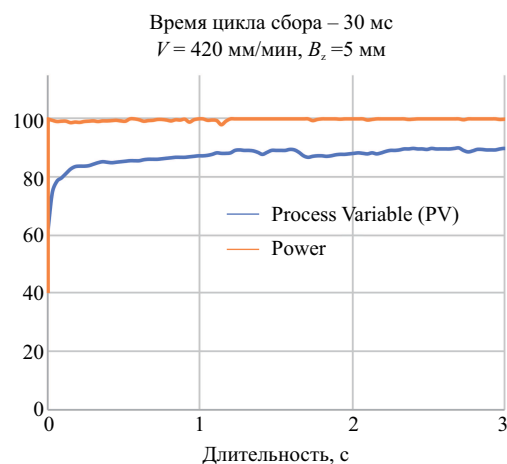


Рис. 2: Зависимость сигнала СОД при ступенчатом изменении мощности лазера с 0 до 100% (B_z — расстояние от фокуса лазера до нижней плоскости)

областях изображения области расплава, формируемого линзой СОД. Кроме того, проводилось усреднение последних 33-ех измерений температуры. Для идентификации динамической модели процесса ЛНМ необходимо знать время отклика на ступенчатое изменение мощности лазера. На рис. 2 представлена переходная характеристика сигнала СОД — его временная зависимость при ступенчатом изменении мощности лазера с 0 до 100% при скорости сканирования $V = 420$ мм/мин. Время отклика при данных технологических параметрах и выбранной марки порошка составило примерно 0.2 с.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ НАНЕСЕНИЕМ МЕТАЛЛА ПО ОПТИЧЕСКОМУ СИГНАЛУ

Информацию о процессе система управления получает с СОД и представляет собою данные интенсивности в разных спектральных диапазонах из пространственно-распределённых областей поверхности образца. Параметры ПИД-регулятора оптимизировались методом Циглера–Никольса, что позволило снизить длительность цикла работы регулятора с 75 мс до 15 мс.

Проведена апробация методов адаптивного регулирования технологического процесса. Результаты формирования дорожки с резким изменением направления нанесения (в виде буквы W) представлены на рис. 3: слева — без использования обратной связи, справа — с использованием обратной связи по оптическому сигналу при скорости сканирования $V = 420$ мм/мин. При отсутствии регулирования мощности лазера на резких поворотах возрастала высота формируемой дорожки, с увеличением числа слоев выраженность эффекта нарастала. Это связано как с уменьшением текущей скорости сканирования на углах при ограниченном пре-

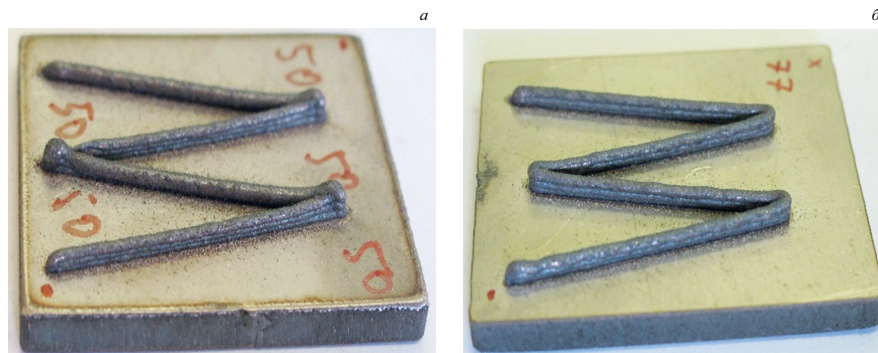


Рис. 3: Образцы формирования дорожки в виде буквы W. Слева без обратной связи, справа — с обратной связью по оптическому сигналу

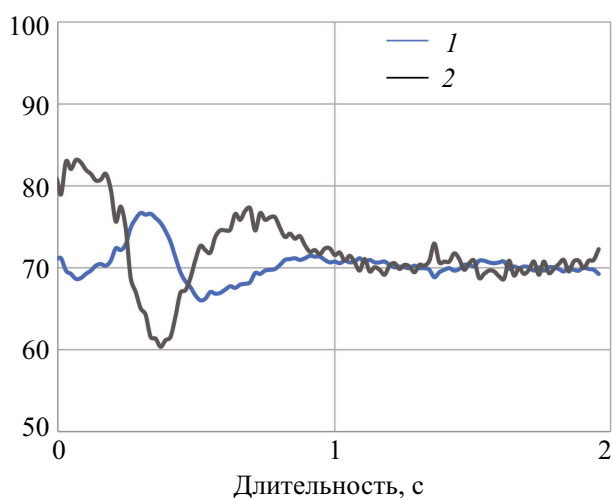


Рис. 4: Зависимости изменения переменной процесса 1 и сигнала управления мощностью лазера 2

дельном ускорении механической системы, так и с локальным увеличением эффективности захвата порошка из-за роста температуры [8, 16].

На рис. 4 представлены временные зависимости переменной процесса и управляющего сигнала (мощность лазера). Использование системы управления с обратной связью по оптическому каналу позволило снизить превышение высоты дорожки над заданным

значением в среднем с 70% до 20% на траекториях с резкими поворотами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработана система оперативного управления параметрами процесса ЛНМ с обратной связью по оптическому сигналу из зоны обработки. Система обеспечивает распознавание отклонений в реальном времени и выполняет корректирующие воздействия для поддержания процессов в требуемом режиме. Использование системы управления привело к снижению отклонения высоты дорожки от заданного значения на траекториях с резкими поворотами.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части постановки задачи и разработанной методики проведения экспериментов, а также научного проекта № 18-29-03249 Российского фонда фундаментальных исследований в части методов обработки экспериментальных данных и полученных экспериментальных результатов.

- [1] Mazumder J. In: *Laser Additive Manufacturing*, Ed.: M. Brandt, Woodhead Publishing, 2017. P. 21.
- [2] Zhong C., Pirch N., Gasser A. et al. // *Metals*. 2017. 7, P. 443.
- [3] Bi G., Gasser A., Wissenbach K. et al. // *Optics and Lasers in Engineering*. 2006. 44, P. 1348.
- [4] Fathi A., Amir Khajepour A., Toyserkani E. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2007. 35, P. 280.
- [5] Tapia G., Elwany A. // *J. of Manufacturing Sci. and Engineering*. 2014. 136, P. 060801.
- [6] Salehi D., Brandt M. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2006. 29, P. 273.
- [7] Farshidianfar M.H., Khajepour A., Gerlich A. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. 82, P. 1173.
- [8] Ding Y., Warton J., Kovacevic R. // *Additive Manufacturing*. 2016. 10, P. 24.
- [9] Devesse W., Baere D., Guillaume P. // *Physics Procedia*. 2014. 56, P. 211.
- [10] Song L., Bagavath-Singh V., Dutta B., Mazumder J. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2012. 58, N 1 – 4. P. 247. .

- [11] *Sammons P. M., Gegel M. L., Bristow D. A., Landers R. G.* // *IEEE Trans. on Control Systems Technology*. 2019. **27**, N2. P. 566.
- [12] *Zavalov Y. N., Dubrov A. V., Ivanov I. M., Dubrov V. D.* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. **1396**, P. 012045.
- [13] *Zavalov Y. N., Dubrov A. V., Ivanov I. M., Dubrov V. D.* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. **1396**, P. 012046.
- [14] *Zavalov Y. N., Dubrov A. V., Dubrov V. D.* // *In: Proceed. of SPIE*. **11056**. P. 1105633.
- [15] *Landau I. D., Lozano R., Saad M. M., Karimi A.* In: *Adaptive Control, Communications and Control Engineering*. London: Springer-Verlag. 2011. P. 1.
- [16] *Ponche R., Kerbrat O., Mognol P., Hascoet J.-Y.* // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2014. **30**, N4. P. 389.

Adaptive regulation of the laser metal deposition process by the optical signal

Yu. N. Zavalov, A. V. Dubrov^a, P. S. Rodin, V. D. Dubrov

*ILIT RAS — Branch of the FSRC «Crystallography and Photonics» RAS,
140700, Shatura, Moscow Region, Russia
E-mail: ^adubrov.av@mail.ru*

The features of controlling the parameters of the laser metal deposition process (LMD) by the optical signal are considered. It is shown that to control and manage the process, it is necessary to use the principles of adaptive regulation. A review of research in the field of process control systems for laser metal additive manufacturing has been carried out. The developed system for the on-line control of LMD with feedback on the optical signal from the processing zone is described. The system provides the recognition of deviations during the process in real time and performs corrective actions to maintain the processes in the required regime. The use of the developed control system led to a decrease in the deviation of the track height from the set value on the trajectories with sharp turns.

PACS: 42.62.Cf.

Keywords: adaptive regulation, laser metal deposition, optical diagnostics.

Received 19 March 2019.

Сведения об авторах

1. Завалов Юрий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: 09645@mail.com.
 2. Дубров Александр Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: dubrov.av@mail.ru.
 3. Родин Павел Сергеевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: prodin.tr10@gmail.com.
 4. Дубров Владимир Дмитриевич — канд. физ.-мат. наук, зав. лаб; e-mail: vddubrov@mail.ru.
-