

## Управление физическими процессами в технологии лазерного нанесения металла

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 25.03.2020; подписана в печать 26.03.2020)

В статье рассмотрены режимы управления физическими процессами в технологии лазерного нанесения металла (ЛНМ). Представлена программно-аппаратная реализация системы управления процессом ЛНМ с контролем мощности лазера. Система работает в реальном масштабе времени с длительностью цикла регулирования 15 мс и позволяет подстраивать заданную в программе контроллера лазерную мощность. Систему возможно использовать не только в лабораторных или вновь создаваемых установках, но и для интеграции в существующие ЛНМ системы. Показано, что использование широтно-импульсной модуляции мощности лазера позволяет управлять формой наносимой дорожки. Также показано, что при определенных параметрах модуляции мощности возможно увеличение скорости охлаждения расплава при сохранении ширины дорожки.

PACS: 42.62.Cf

УДК: 535.8.

Ключевые слова: модуляция мощности лазера, лазерное нанесение металла, пирометрия, термические циклы

### ВВЕДЕНИЕ

Создание изделий в аддитивной технологии лазерного нанесения металла (ЛНМ) происходит путём последовательного нанесения отдельных дорожек. Каждая дорожка формируется в результате взаимодействия лазерного излучения с потоком порошка и ранее нанесённым материалом (или подложкой) [1]. При этом, пространственные распределения потока порошка и лазерного излучения неоднородны [2], они имеют сходящийся, а затем расходящийся профиль. Смещение положения перетяжек лазерного луча и потока порошка друг относительно друга изменяет область и степень нагрева частиц излучением, а расстояние от сопла до ванны расплава влияет на динамику поглощения лазерной энергии и размер области осаждения частиц. Процесс формирования дорожки представляет собой сложный неравновесный физико-химический процесс [1, 2, 3, 4], который включает конвективный режим теплообмена. Конвективные потоки расплава возникают в том числе под воздействием термоконцентрационных и термокапиллярных эффектов вследствие неоднородностей распределения примеси, неоднородного нагрева поверхности расплава лазерным излучением, а в некоторых случаях и химических реакций. Результаты исследований взаимосвязи между конечными микроструктурными и физико-механическими характеристиками материала и условиями его затвердевания в процессе ЛНМ показывают, что технологические параметры процесса, как и параметры воздействия лазерного излучения на материал определяют качество и эффективность формирования наносимой дорожки в процессе ЛНМ [3, 4].

Существующие современные исследования в области диагностики процесса ЛНМ нацелены, прежде всего, на контроль и мониторинг технологического процесса с выделением особенностей объекта контроля и их соотнесение с параметрами процесса и свойствами материала [2, 3], но для обеспечения требуемого уровня качества и стабильности процесса ЛНМ необходимо управлять технологическими параметрами ЛНМ, чтобы поддерживать процесс формирования дорожки в заданном режиме [4]. Развитие систем управления процессом ЛНМ рассмотрено в обзоре [5]. В частности, в [6] описана система ПИД управления скоростью сканирования по синтетическому сигналу на основе мониторинга излучения ванны расплава в трех областях видимого и ближнего инфракрасного диапазона спектров. Однако, реализованная в работе концепция управления не позволяет использовать разработанный контроллер в существующих системах ЛНМ. В данной работе приведено описание программно-аппаратной реализации системы управления процессом, которая размещается «в разрыв» между имеющимся ЧПУ контроллером и лазером, что позволяет использовать её для интеграции в существующие системы.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ЛАЗЕРНОГО НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛА

В данной работе рассмотрены особенности режима системы управления процессом ЛНМ с широтно-импульсной модуляцией мощности лазера и в непрерывном режиме. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1, а и включает волоконный лазер 1 с максимальной мощностью 400 Вт (IPG), лазерную головку 2 (Precitec), сопло которой формирует поток порошка 3, трёхкоординатный стол с числовым программным управлением на котором закрепляется под-

\*E-mail: [dubrov.av@mail.ru](mailto:dubrov.av@mail.ru)

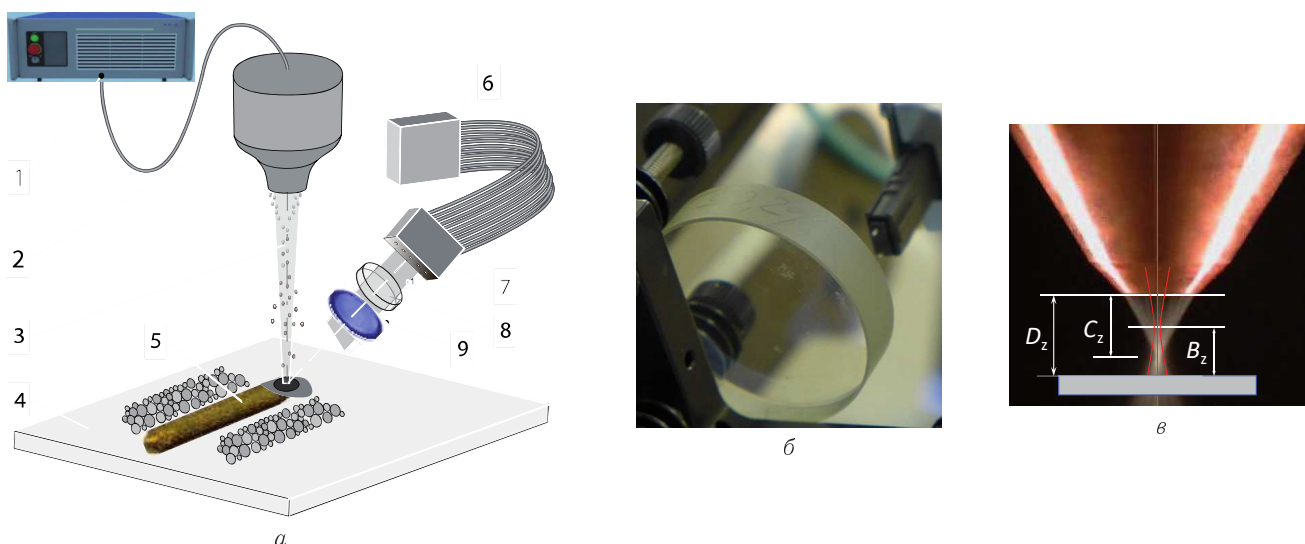


Рис. 1: *a* — Схема экспериментальной установки: 1 — лазер, 2 — лазерная головка, 3 — поток порошка; 4 — подложка, 5 — формируемая дорожка, 6 — блок фотодиодов с предусилителем; 7 — сенсор; 8 — оптический фильтр; 9 — линза МПСД. *б* — Вид на приемную сторону сенсора и оптический фильтр. *в* — Схема взаимного расположения подложки, сопла, потока частиц и лазерного пучка (красные линии)

ложка 4. Коаксиальное сопло лазерной головки, схематично изображенное на рис. 1, *в*, формирует сходящийся кольцевой поток. Порошок в лазерную головку подается порошковым питателем (GTV).

На рис. 1, *в* приведены обозначения, используемые в дальнейшем:  $D_z$  — расстояние от нижней поверхности сопла до подложки.  $B_z$  — расстояние от подложки до перетяжки лазерного пучка. Расстояние от сопла до перетяжки потока порошка  $C_z$  составляет 11 мм. Качество и производительность процесса ЛНМ может существенно изменяться в зависимости от параметров  $B_z, C_z, D_z$ .

Для контроля температуры на поверхности расплава была использована установленная под наклоном многоканальная пирометрическая система диагностики (МПСД) с оптоволоконным каналом передачи теплового излучения ванны расплава к набору фотодетекторов. В блоке *б* формируются сигналы, амплитуды которых пропорциональны освещению приемной части сенсора 7, в которой торцы оптоволоконных кабелей шести каналов конструктивно размещены в ряд на расстоянии 0.3 мм друг от друга. Торцы освещены светом, исходящим от нагретой области, сфокусированным перед сенсором 7 линзой 9. Вид на приемную сторону сенсора и оптический фильтр 8 показан на рис. 1, *б*. Излучение локальных областей расплава освещают отдельные каналы фотоприемников сенсора, которые состоят из двух типов фотодиодов, установленных на одной оптической оси и имеющих чувствительность в разных спектральных диапазонах. Чувствительность фотодиодов с учетом использованных дополнительных оптических фильтров находится в диапазоне (1.7...2.2) мкм. Используется модуль АЦП LTR11 в составе крейта LTR-EU-8 (L-CARD) для оцифровки токов фотодиодов.

Глубина квантования составляла 14 бит, шаг дискретизации — 200 мкс. Использование диодов с чувствительностью к тепловому излучению в области инфракрасного диапазона SWIR позволяет в режиме яркостного пирометра получать распределение температуры в 6 подобластях области расплава.

## 2. ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЛАЗЕРНОГО НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛА

Программная часть системы управления реализована с использованием среды разработки LabVIEW. LabVIEW предоставляет средства мониторинга за физическими процессами и ранее использовалась для контроля характеристик в таких аддитивных технологиях, как SLS, wireLMD, EBM, LMD [6, 7, 8, 9]. Разработанная программа управления структурно состоит из нескольких блоков, часть из которых выполняется параллельно (рис. 2). Блоки взаимодействуют между собой, и для обмена данными используется FIFO-очередь.

Первый блок проводит инициализацию АЦП и RS-232-портов в соответствии с параметрами, задаваемыми пользователем на лицевой панели (рис. 3). Во втором блоке («Main Loop») проводится анализ и трансляция управляющих команд, приходящих от ЧПУ по последовательному каналу связи и предназначенных для управления лазером. Среди них могут быть команды включения и выключения лазерного излучения, изменения мощности и другие. Команды анализируются и помещаются в FIFO-очередь. Такая организация управления позволяет добиться максимального быст-

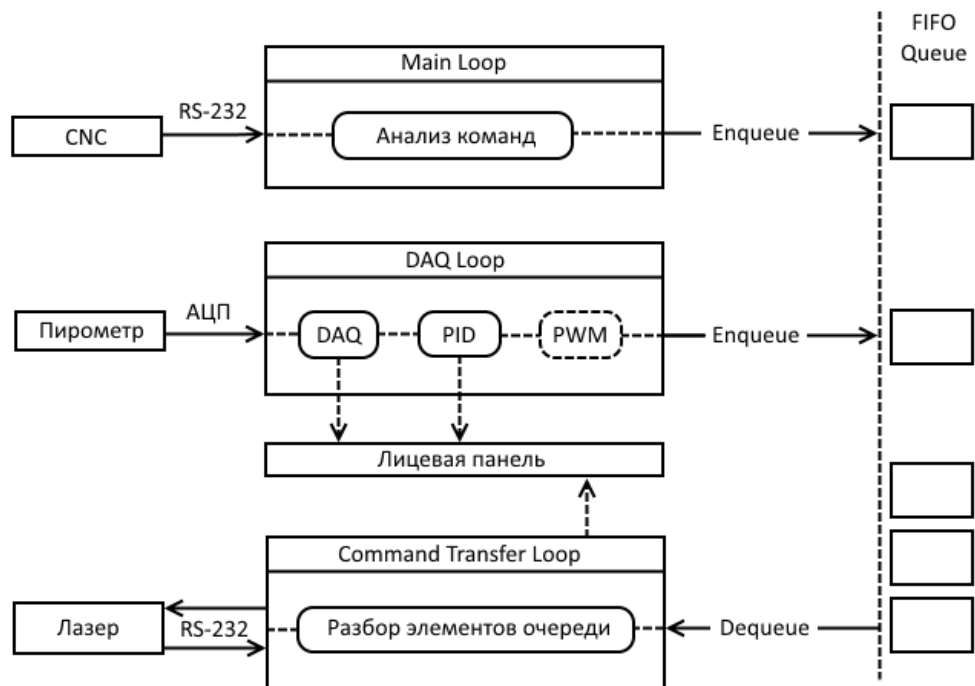


Рис. 2: Структурная схема программы управления

родействия при соблюдении порядка приема-передачи команд.

Третий блок («DAQ Loop») работает с АЦП крейта L-Card, к которому подключен пирометр. В нём происходит сбор данных с АЦП, их обработка и вывод осциллограммы на лицевую панель. Одна итерация этого блока длится дольше других блоков. Это время является фиксированной величиной и ограничивается временем сбора данных АЦП. ПИД-регулятор системы управления поддерживает уровень сигнала пирометра с заданной точностью путем регулирования мощности лазерного излучения. При необходимости ПИД регуляция может быть включена отдельно или совместно с режимом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) мощности лазера.

Логика управления исполнялась на внешнем вычислительном оборудовании. Использовался вычислительный модуль на базе процессора Intel Core i3-6100 3.7GHz, оборудованный тремя интерфейсами RS-232: один для загрузки управляющих программ на контроллер ЧПУ, и два — для включения «в разрыв» последовательного интерфейса связи ЧПУ с лазером. Связь с крейтом L-CARD, в котором располагались модули АЦП сигналов многоканального пирометра осуществлялась через интерфейс USB. Таким образом, разработанная система управления размещается «в разрыв» между имеющимся ЧПУ контроллером процесса и лазером, что позволяет использовать систему не только в лабораторных или вновь создаваемых установках, но

и для интеграции в существующие ЧПУ системы. Она перехватывает команды управления лазером, синхронизируется с командами включения/выключения излучения и учитывает текущую заданную мощность лазера при формировании скорректированных значений.

### 3. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛА

На рис. 4 показаны три области воздействия лазерного излучения на подложку из стали AISI304 толщиной 4 мм при сканировании со скоростью ( $V$ ) 200 мм/мин. При формировании области (1) не использовалась подача порошка. Для формирования областей (2) и (сw) подавался порошок аустенитной стали ПР-Х18Н9 с гранулометрическим составом: (40...100) мкм. Расход порошка  $G_0$  составлял 0.14 г/с. Оценка средней скорости осаждения частиц была проведена в [7] и составила около 2.4 м/с.

В процессе формирования каждой дорожки средняя мощность излучения  $P_a$  изменялась ступенчато каждые 12 мм и составляла 20%, 40%, 60%, 75%, 90% от номинальной мощности лазера. В случаях (1) и (2) использовалось широтно-импульсное (ШИМ) управление мощностью лазера. Использовался период повторения импульсов  $t_0 = 72$  мс. Средняя мощность  $P_a$  рассчитывается как:  $P_a = P_0 \cdot \frac{t_1}{t_0}$ , где  $t_1$  — длительность импульса. В случае режима (сw) мощность лазера ре-

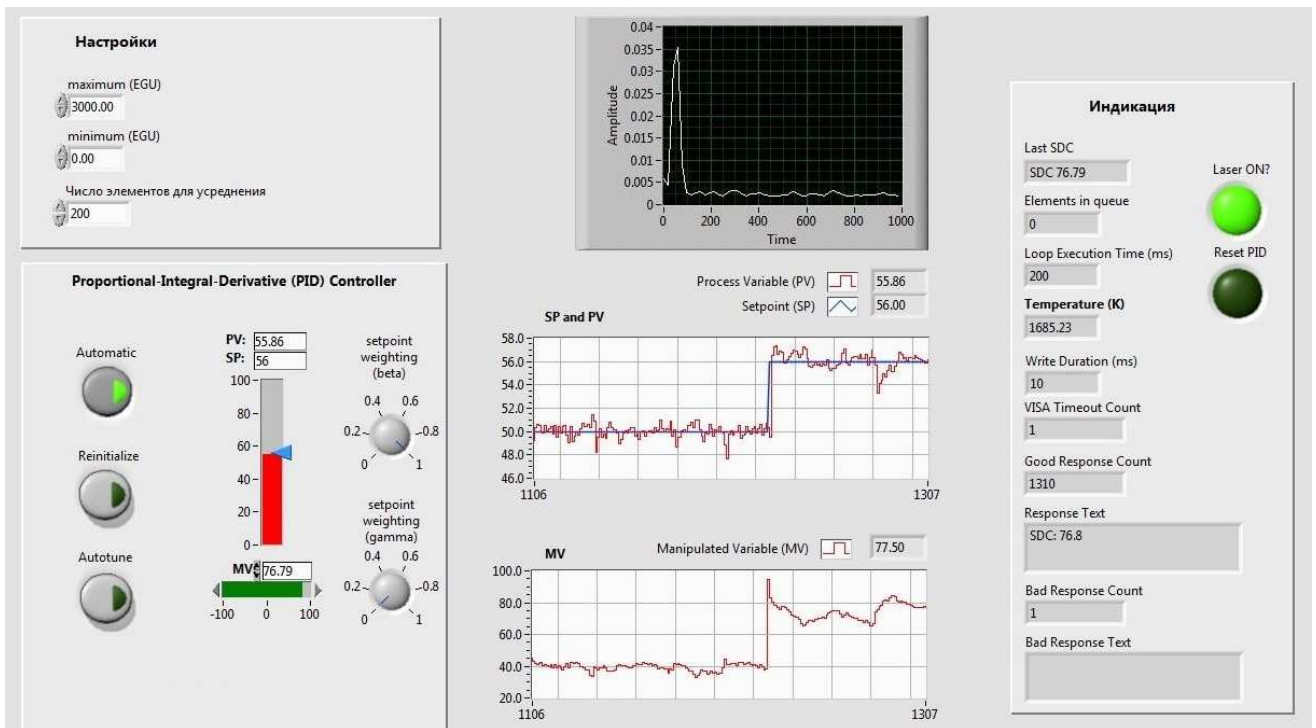


Рис. 3: Лицевая панель системы управления

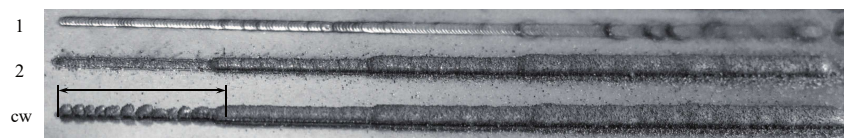


Рис. 4: Образцы формирования дорожек

гулировалась изменением уровня накачки лазера.

На рис. 4 для области (1) можно наблюдать возрастание ширины области проплавления с увеличением средней мощности лазера. В случае (2) ширина формируемого валика определяется шириной области проплавления подложки [8]. В случае (cw) уровень нагрева подложки существенно меньше, чем в случае использования режима ШИМ. Ширина участка проплавления при тех же уровнях средней мощности в случае (cw) меньше, чем в случае (2). При экспозиции в режиме (cw) с мощностью 20% скорость нагрева настолько снижена, что в условиях высокой теплопроводности консолидация порошка происходит на более узком участке подложки и ведёт к более высоким значениям коэффициента формы ( $K$ ) по сравнению со случаем (2).  $K$  определяется как отношение высоты валика к его ширине. Таким образом, при той же средней мощности лазера были получены валики с разными геометрическими характеристиками в зависимости от способа регулирования мощности лазера.

Динамика максимального значения яркостной температуры ( $T^*$ ), измеренной пирометром, представлена на рис. 5 для первых 4 секунд сканирования областей

(2) и (cw). Нерегулярный характер изменения температуры носит имманентный характер, он отображает сложность процессов конвекции расплава при формировании дорожки, что необходимо учитывать при построении системы управления на основе данных температуры и других параметров области расплава.

На рис. 5 горизонтальными линиями показаны уровни  $T_a^*$  — усредненные значения температуры  $T^*$  во время воздействия лазерного излучения для режимов (2) и (cw). На рис. 6 приведены зависимости от усредненной мощности лазера. В случае использования ШИМ зависимость  $T_a^*$  от мощности менее выражена по сравнению с режимом (cw).

В режиме ШИМ охлаждение области расплава происходит на коротком временном промежутке когда лазер выключен. На рис. 7 приведена временная зависимость  $\log(T^*)$  для режима (2). На нём можно выделить три участка охлаждения с существенно разной скоростью охлаждения. В табл. 1 приведены полученные значения скорости охлаждения в режиме ШИМ со средней мощностью 20% в процессе охлаждения расплава в зависимости от диапазона изменения температуры. Скорость охлаждения образца в режиме (cw)

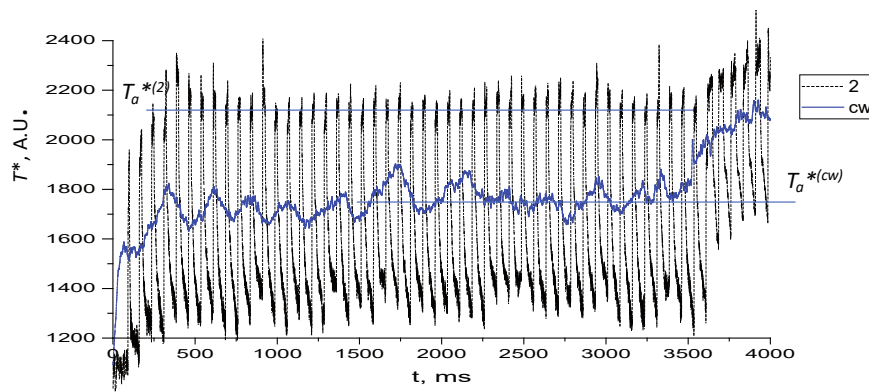


Рис. 5: Временная зависимость  $T^*$  для начального участка формирования дорожек, рис. 4

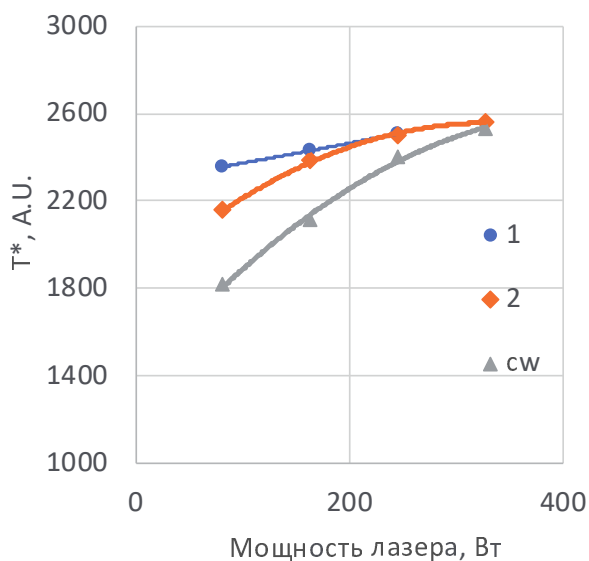


Рис. 6: Зависимость  $T_a^*$  от усредненной мощности лазера

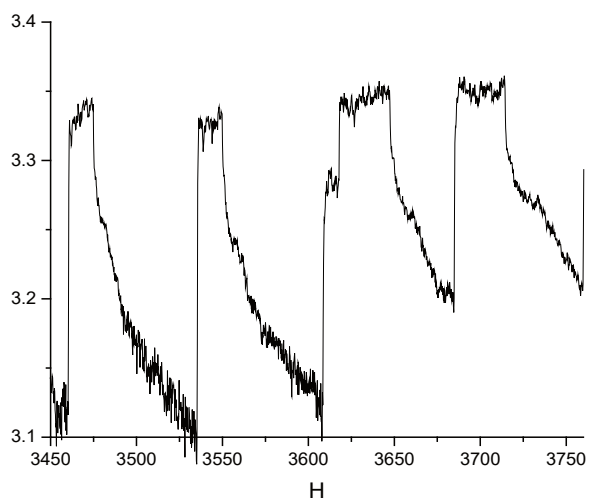


Рис. 7: Временная зависимость  $\log(T^*)$  для режима (2)

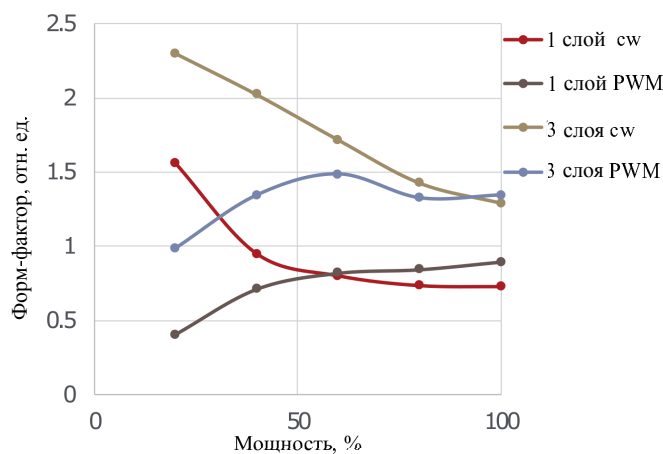


Рис. 8: Зависимость форм-фактора валика от параметров технологического режима

при той же ширине дорожки и одинаковом уровне мощности лазера не превышает значения  $10^4$  К/с.

Таблица 1: Скорость охлаждения

	Диапазон температур, К	Скорость охлаждения, К/с
1	2100 – 1850	$12 \cdot 10^4$
2	1850 – 1700	$8 \cdot 10^4$
3	1700 – 1400	$1.4 \cdot 10^4$

Показано (рис. 8), что с ростом усредненного значения мощности лазера от 80 до 250 Вт изменяется форм-фактор наносимой дорожки (отношение высоты к ширине). В случае использования непрерывного режима излучения лазера форм-фактор падает в 1.5 – 2 раза, и возрастает в 1.5 – 2 раза в случае использования режима ШИМ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены режимы управления физическими процессами в технологии лазерного нанесения металла. Представлена программно-аппаратная реализация системы управления процессом лазерного нанесения металла (ЛНМ) с контролем мощности лазера. Система работает в реальном масштабе времени с длительностью цикла регулирования 15 мс и позволяет подстраивать лазерную мощность по сравнению с заданной в программе ЧПУ для поддержания уровня сигнала в требуемом диапазоне. Системе возможно использовать не только в лабораторных или вновь создаваемых установках, но и для интеграции в существующие ЛНМ системы. Использование широтно-импульсной модуляции мощности лазера обеспечило возможность управления формой наносимой дорожки. Показано, что при определенных пара-

метрах модуляции мощности лазера возможно увеличение скорости охлаждения расплава при сохранении ширины дорожки.

## 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] Turichin G., Klimova O., Zemlyakov E. et al. // *Physics Procedia*. 2015. **78**, P. 397.  
[3] Shamsaei N., Yadollahi A., Bian L., Thompson S.M. // *Additive Manufacturing*. 2015. **8**, P. 12.  
[4] Denlinger E.R., Heigel J.C., Michaleris P., Palmer T.A. // *J. of Materials Processing Technology*. 2015. **215**, P. 123.  
[5] Bi G., Gasserb A., Wissenbachb K. et al. // *Optics and Lasers in Engineering*. 2006. **44**, P. 1348.  
[6] Sreenivasan R., Goel A., Bourell D.L. // *Physics Procedia*. 2010. **5**, P. 81.  
[7] Boisselier D., Sankare S., Engel T. // *Physics Procedia*. 2014. **56**, P. 239.  
[8] Hagqvist P., Heralic A., Christiansson A.-K. et al. // *Optics and Lasers in Engineering*. 2014. **54**, P. 62.  
[9] Klimova-Korsmik O., Turichin G., Zemlyakov E. et al. // *Physics Procedia*. 2016. **83**, P. 716.  
[10] Rodriguez E., Mireles J., Terrazas C.A. et al. // *Additive Manufacturing*. 2015. **5**, P. 31.

---

## Physical process control in laser metal deposition technology

Yu. N. Zavalov, A. V. Dubrov<sup>a</sup>, P. S. Rodin, V. D. Dubrov

ILIT RAS — Branch of the FSRC «Crystallography and Photonics» RAS,  
Svyatoozerskaya 1, 140700, Shatura, Moscow Region, Russia  
E-mail: <sup>a</sup>dubrov.av@mail.ru

The article deals with the control modes of physical processes in the technology of laser metal deposition (LMD). The software and hardware implementation of the LMD process control system with laser power control is presented. The system operates in real time with a control cycle duration of 15 ms and allows one to adjust the laser power set in the controller program. The system can be used not only in laboratory or newly created installations, but also for integration into existing LMD systems. It is shown that the use of pulse-width modulation of the laser power allows one to control the shape of the deposited track. It is also shown that under certain parameters of power modulation, it is possible to increase the cooling rate of the melt while maintaining the track width.

PACS: 42.62.Cf.

*Keywords:* laser power modulation, laser metal deposition, pyrometry, thermal cycles.

*Received 25 March 2020.*

## 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.