

Порошковая металлургия, композиционные материалы и покрытия Powder metallurgy, composite materials and coatings

Научная статья
УДК 004
DOI: 10.14529/met240307

ФОКУСИРОВКА ЛАЗЕРНО-СКАНАТОРНОГО МОДУЛЯ СЛМ-ПРИНТЕРА С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

А.О. Звягинцев, zviagintcev.ao16@physics.msu.ru

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия

Аннотация. Селективное лазерное плавление (СЛМ) – перспективная технология аддитивного производства деталей сложной формы. В качестве исходного материала используется металлический порошок, а для плавления и послойного наращивания деталей служит лазер. Во время создания деталей могут возникать дефекты, которые возможно обнаружить только после завершения процесса изготовления с помощью стороннего оборудования, но которые оказывают сильное влияние на качество деталей. Поэтому разрабатываются методы неразрушающего *in situ* контроля за качеством сплавляемого изделия, например, оптические. Но применение таких инструментов возможно только при штатной работе всех машинных компонентов СЛМ-принтера, на которые полагаются системы оптического контроля (СК) и обратной связи. В данной статье представлена новая методика отладки лазерно-сканаторной системы, проводимая с помощью системы оптической томографии – одной из возможных систем оптического контроля. Таким образом, оснащенный СК СЛМ-принтер может стать автоматически отлаживаемым инструментом, способным оперировать с минимальным участием технолога.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное плавление, оптические системы контроля

Для цитирования: Звягинцев А.О. Фокусировка лазерно-сканаторного модуля СЛМ-принтера с помощью системы оптического контроля // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2024. Т. 24, № 3. С. 64–70. DOI: 10.14529/met240307

Original article
DOI: 10.14529/met240307

FOCUSING THE LASER-SCANATOR MODULE OF THE SLM PRINTER USING AN OPTICAL CONTROL SYSTEM

A.O. Zviagintcev, zviagintcev.ao16@physics.msu.ru

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

Abstract. Selective laser melting (SLM) is a promising technology for additive manufacturing of complex-shaped parts. Metal powder is used as a starting material, and a laser is used to melt and build up parts layer by layer. During the growth of parts, defects may occur that can only be detected after the manufacturing process is completed using third-party equipment, but which have a strong impact on the quality of the parts. Therefore, methods of non-destructive *in situ* quality control of the product are being developed, e.g. optical methods. But the use of such tools is only possible when all machine components of the printer's SLM, on which the optical control (OCS) and feedback systems rely on, operate normally. This paper presents a new technique for calibration laser-scanator systems using an optical tomography system, one of the optical control systems. Thus, a SLM printer equipped with OCS can become an automatically calibrating tool capable of operating with minimal involvement of a technologist.

Keywords: additive technologies, selective laser melting, optical control systems

For citation: Zviagintcev A.O. Focusing the laser-scanator module of the SLM printer using an optical control system. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2024;24(3):64–70. (In Russ.) DOI: 10.14529/met240307

Введение

Технология селективного лазерного сплавления (СЛМ) исследуется с 1980-х годов и продолжает развиваться до сих пор. С помощью данного метода детали могут быть изготовлены путем локального послойного плавления металлического порошка лазерным лучом, перемещаемым по рабочей плоскости системой сканаторных зеркал [1] (рис. 1). По сравнению с традиционными технологиями производства этот метод дает значительно больше свободы в проектировании изделий. Таким образом, он особенно интересен для производства геометрически сложных компонентов.

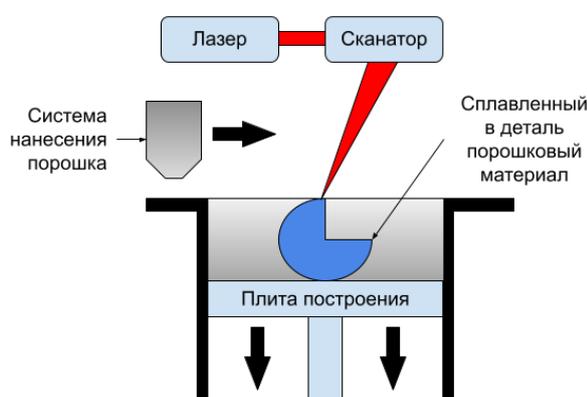


Рис. 1. Схематическое представление технологии селективного лазерного сплавления
Fig. 1. Schematic representation of selective laser melting technology

После оптимизации оптических и механических компонент печатных станков [2] развитие технологии пришло к новому витку – применению внешних систем контроля, способных наблюдать за процессом создания деталей *in situ*. Ввиду особенностей технологии СЛМ наибольшей популярностью пользуются оптические системы, способные верифицировать процесс сплавления с наблюдением за послойным наращиванием изделия на разных стадиях технологического процесса [3]. Ключевой особенностью таких систем контроля принято считать их оперирование совместно с технологией машинного обучения и принципом обратной связи, т.е. реализацию наибольшей автоматизации в нестандартных ситуациях. Например, когда из-за стохастических аппаратных аномалий или дефектов, вызванных особенностью геометрии детали и способом её печати, образуется опасность получения изделия низкого качества или необходимость полной остановки процесса изготовле-

ния, по результатам систем контроля происходит корректировка стандартного алгоритма печати [4].

Проблема применения каких-либо систем обратной связи напрямую зависит от штатного оперирования всех механических и оптических компонентов принтера. Перед запуском систем обнаружения и исправления дефектов печати необходимо устранить аппаратные аномалии самой установки. Отклонения от нормальной работы механики могут обнаружиться в устройстве поступательного перемещения рабочего стола, в системе нанесения порошка, в конфигурации обдува рабочей области инертным газом и в лазерно-сканаторной системе принтера [5].

В то же время применение систем контроля не ограничивается только наблюдением за процессом печати. Устройства для обеспечения обратной связи могут послужить для отладочных процедур перед полноценным запуском принтера в режиме печати с обратной связью. В этой статье будет описан способ применения системы мониторинга процесса сплавления (СМПС) в целях отладки одной из ключевых компонент СЛМ-принтера – лазерно-сканаторного модуля.

Отличительной особенностью нашего метода является его простая интеграция в уже существующие принтеры, отсутствие необходимости в использовании стороннего оборудования, а также возможность его автоматизации для проведения регулярных калибровочных мероприятий с минимальными затратами времени со стороны обслуживающего персонала установки.

1. Материалы и методы

1.1. Принцип работы СМПС

Основа данной системы – камера высокого разрешения с низкой шумовой КМОП-матрицей. Объектив камеры оснащен полосовым светофильтром – блокатором лазерного излучения (1064 нм) и нейтральным световым аттенуатором с OD3 в видимой области спектра (рис. 2). В совокупности данная система предназначена для непосредственного наблюдения за процессом перемещения лазерного луча по порошковому слою на длинной выдержке. В ходе нагрева, плавления и остывания металлического порошка образующаяся высокотемпературная область излучает свет, в частности в видимом спектре излучения, который и регистрируется камерой.

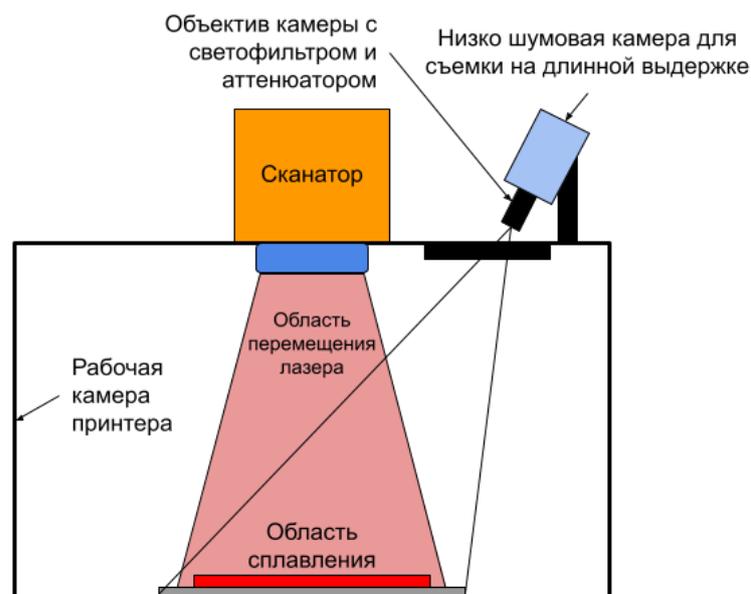


Рис. 2. Схема СЛМ-принтера, оснащенного СМПС
Fig. 2. Scheme of the SLM printer equipped with a melting process monitoring system

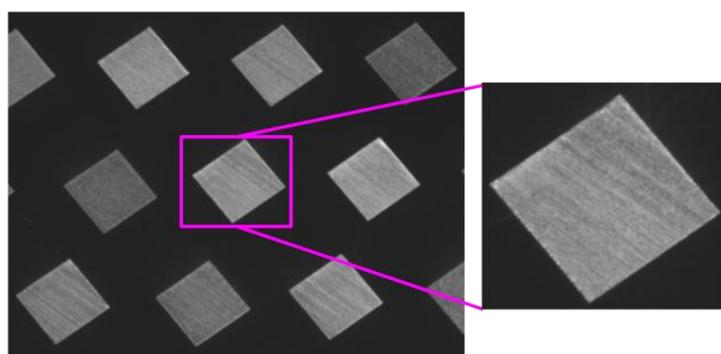


Рис. 3. Кадры сплавленного слоя, получаемые с помощью СМПС
Fig. 3. Fused layer frames obtained using the melting process monitoring system

Использование режима печати, в котором лазерный луч не проходит дважды одни и те же координаты по рабочей плоскости, позволяет в результате печати слоя визуализировать область контакта лазерного луча с порошковым материалом, таким образом получая информацию о ходе нагрева, плавления и остывания детали и порошка, а также о продуктах сплавления, покидающих эту область (рис. 3).

1.2. Фокусировка сканатора при помощи СМПС

При установке сканатора труднодостижимым является его крепление на высоте, заданной f-theta-объективом и внутренней конструкцией сканатора над областью сплавления. При этом объектив сканатора, как правило, ограждается от рабочего объема камеры

принтера стеклом, которое служит для обеспечения герметичности рабочего объема, но может изменять оптический путь лазерного луча. Стоит отметить, что ошибка фокусировки сканатора даже на 2 мм может привести к невозможности изготовления деталей с низким уровнем пористости (~ 0,001 %) или к полному разрушению детали из-за накапливаемых дефектов в ходе наращивания слоев.

Из-за указанного выше перед началом цикла печатей необходимо определить положение фокуса сканатора относительно плоскости сплавления. Это возможно сделать с помощью измерителей профиля лазерного пучка. Но в этом случае возникает проблема допустимой мощности лазерного излучения на единицу площади датчика прибора. Наименьшая рабочая мощность у используемых в СЛМ-принтерах лазерах составляет порядка

75–90 Вт. При фокусировке лазерного пучка в пятно диаметром 70–80 мкм штатная работа большинства лабораторных профилометров на таких мощностях лазера возможна только при использовании аттенуаторов в виде частично отражающих призмovidных зеркал.

Минусом такого прибора для определения положения фокуса СЛМ-сканатора является то, что штатная работа устройства включает в себя необходимость соблюдения угла падения луча на первое из ослабляющих зеркал в 45 градусов, потому что несоблюдение этого требования приведет к искажению формы пятна на детекторе и невозможности определения его истинного значения на плоскости построения. Это ограничение позволяет измерить степень сфокусированности лазерного пучка только в точке, расположенной ровно под f -theta-объективом, но не в разных частях платформы построения. Это делает прибор неприменимым в ситуации, когда плоскость фокуса f -theta-объектива непараллельна плоскости построения, что приведет к непостоянному размеру лазерного пятна в различных точках плоскости сплавления детали. При этом существуют более дорогие

специальные профилометры, рассчитанные на более высокие мощности лазеров (от 1 кВт до 100 кВт и более). Использование данных приборов является более дорогой и менее удобной альтернативой предлагаемому нами методу из-за необходимости ручного расположения датчиков в рабочей камере принтера.

В ходе поиска более удобных способов фокусировки нам удалось применить СМПС для определения положения фокуса лазерно-сканаторного модуля СЛМ-принтера. Метод заключается в съемке нанесения на матовую металлическую поверхность штрихов длиной ~ 7 мм на малой мощности лазера. Их яркость в кадре зависит от температуры в области падения лазерного луча. Температура, в свою очередь, зависит от мощности падающего излучения в единицу времени [6, 7]. Поскольку штрих наносится с одинаковой скоростью движения луча и мощностью лазера, яркость зависит от степени фокусировки луча на используемом объекте. Перемещая рабочую поверхность, фотографируя СМПС-камерой нанесение штрихов на различном удалении от сканатора и измеряя яркость наносимых линий, получаем возможность определить положение плоскости фокуса (рис. 4).

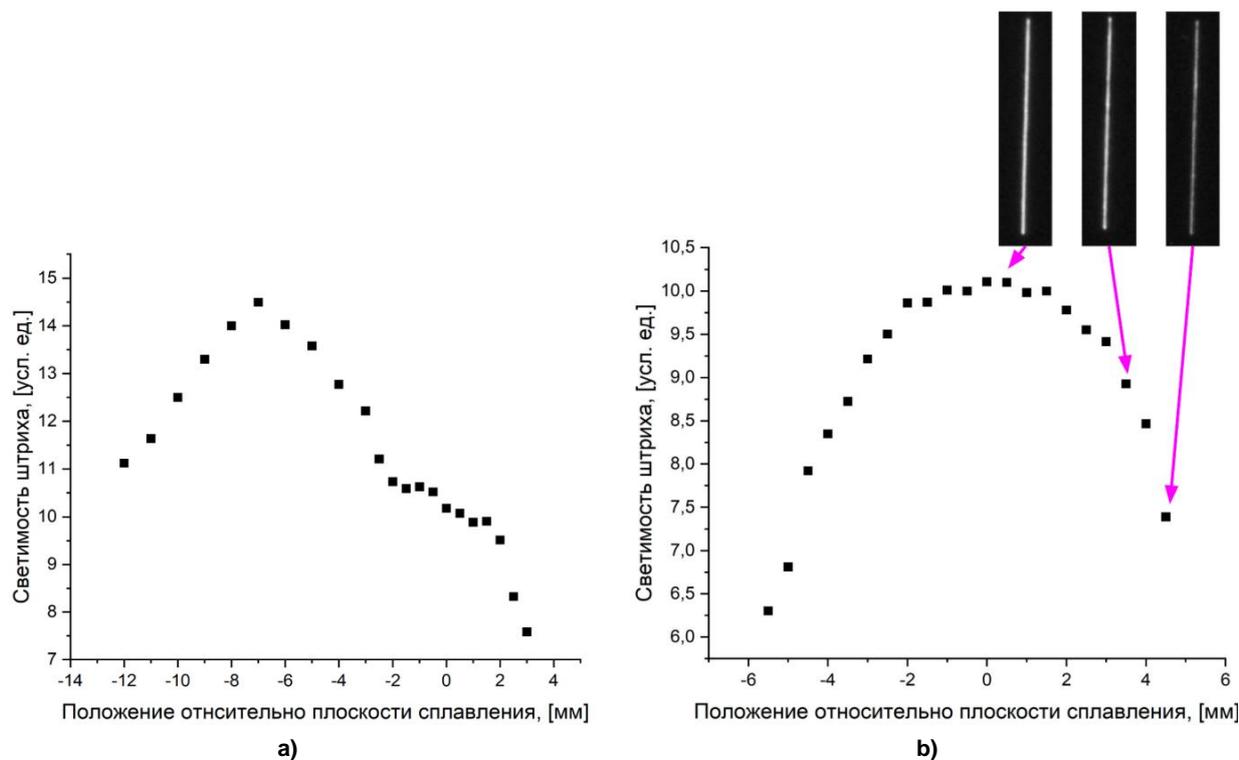


Рис. 4. График зависимости яркости прожигаемых лазером штрихов от положения плоскости нанесения относительно предполагаемой плоскости сплавления до калибровки сканатора (а) и после (б)

Fig. 4. Graph of the dependence of the brightness of laser-burned lines on the position of the application plane relative to the expected fusion plane before (a) and after (b) scanner calibration

Поскольку метод полагается на яркостную характеристику наносимых штрихов, от проводимого замеры инженера требуется подобрать такой режим прожига, который не приводит к появлению в кадре мешающих дальнейшему анализу искр и не дает максимально возможную

яркость пикселей изображения в положении наибольшей близости к точке фокуса. В нашем случае использовалась мощность лазера 71 Вт и скорость прожига 300 мм/с.

По полученным результатам принимается решение о вертикальном перемещении скана-

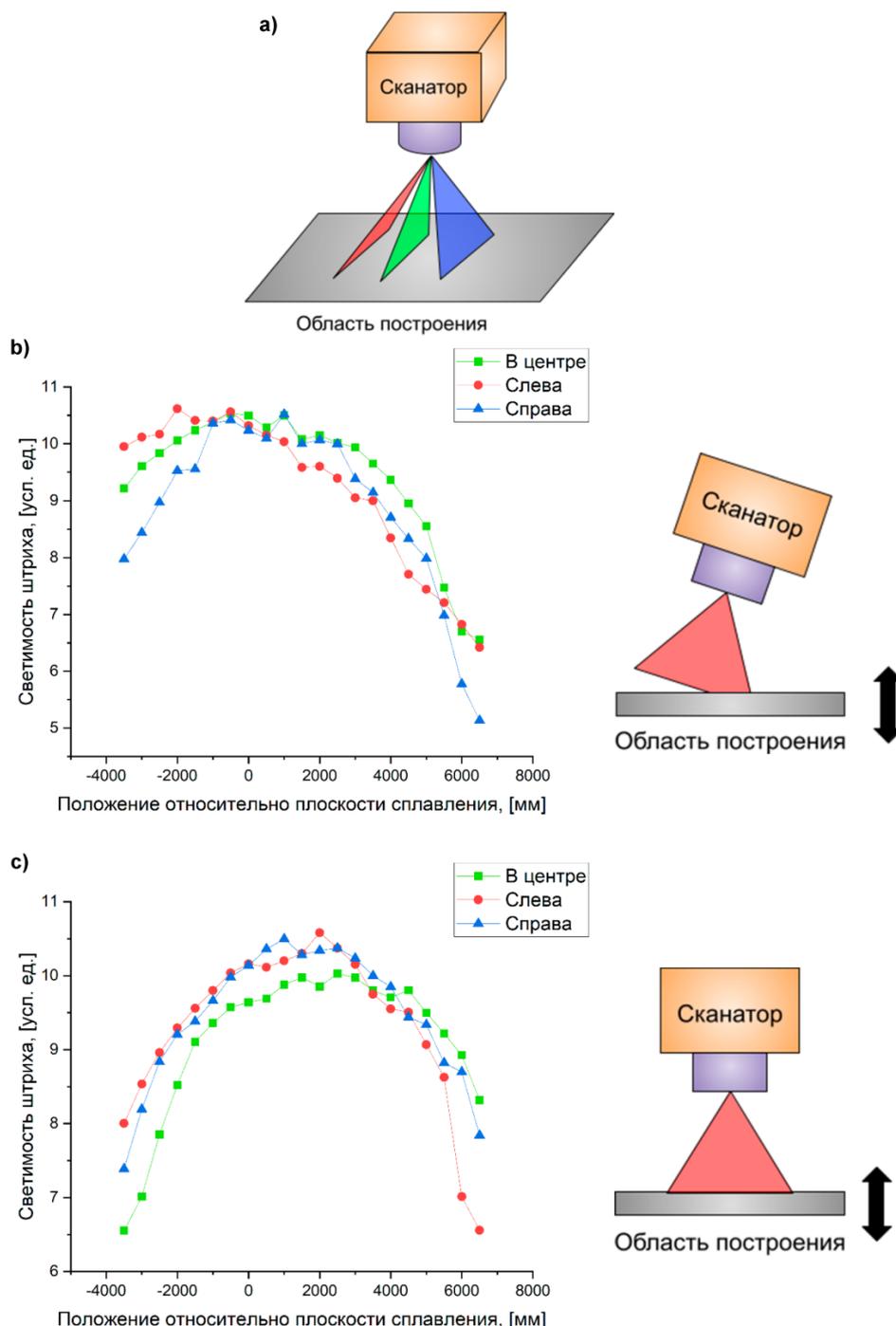


Рис. 5. Схема нанесения штрихов в различных участках рабочей области сканатора (а). График зависимости яркости прожигаемых лазером штрихов от положения плоскости нанесения относительно предполагаемой плоскости сплавления при непараллельном (b) и параллельном (c) положении плоскости фокусировки сканатора

Fig. 5. Scheme of applying strokes in different areas of the scanner's working area (a). Graph of the dependence of the brightness of the strokes burned by the laser on the position of the application plane relative to the supposed fusion plane for non-parallel (b) and parallel (c) positions of the scanner's focusing plane

тора. Более того, прожигая несколько штрихов в различных частях области построения (рис. 5), получаем возможность зарегистрировать непараллельность плоскости фокусировки сканатора и рабочей области. В нашем методе это возможно без каких-либо перемещений измеряющего устройства в отличие от ситуации при использовании профилометров пучка.

2. Результаты

В данном исследовании основные работы проводились на экспериментальном СЛМ-принтере модели «Наука 3D/21 СЛМ-150». В качестве СМПС-камеры использовалась Daheng MER2- 2000-19U3M с разрешением 5496×3672 . В качестве контрольного профилометра лазерного пучка использовался SP620 (Ophir Photonic). Было установлено, что погрешность предлагаемого нами метода составляет 0,4 мм. Юстировка положения лазерно-сканаторного модуля в дальнейшем по-

зволила повысить плотностные характеристики получаемых изделий, доведя их пористость до 0,001 % и ниже.

Заключение

В данной статье был описан метод фокусировки лазерно-сканаторного модуля СЛМ-принтера с помощью системы оптического контроля. СМПС помимо работы в режиме обратной связи в целях *in situ* корректировки процесса сплавления имеет расширенный спектр применений, в частности, в задачах точной настройки машинных компонентов установки. В данный момент ведутся работы по применению нашего метода в юстировке двух экспериментальных СЛМ-принтеров отечественного производства в НПО «ЦНИИТМАШ». Планируется дальнейшее развитие метода, а именно, доведение юстировочных процедур до полной автоматизации и создание методик по применению других систем контроля для подобных задач.

Список литературы

1. Badiru A., Valencia V., Badiru A., Liu D., Hartsfield C. Additive manufacturing handbook. Boca Raton: CRC Press, 2017. 938 p.
2. Padmakumar M. Additive Manufacturing of Tungsten Carbide Hardmetal Parts by Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) and Binder Jet 3D Printing (BJ3DP) Techniques // Lasers in Manufacturing and Materials Processing. 2020. Vol. 7. P. 338–371. DOI: 10.1007/s40516-020-00124-0
3. Bamberg J., Zenzinger G., Ladewig A. In-Process Control of Selective Laser Melting by Quantitative Optical Tomography // 19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016), 13–17 June 2016 in Munich, Germany. e-Journal of Nondestructive Testing. 2016. Vol. 21 (7). URL: <https://www.ndt.net/?id=19469>
4. Применение систем оптического контроля при изготовлении изделий методом селективного лазерного плавления / А.В. Петров, И.В. Синильщиков, А.О. Звягинцев и др. // Тяжелое машиностроение. 2023. № 5–6. С. 8–11.
5. A Review of In Situ Defect Detection and Monitoring Technologies in Selective Laser Melting / X. Peng, L. Kong, H. An, G. Dong // 3D Printing and Additive Manufacturing. 2023. Vol. 10 (3). P. 438–466. DOI: 10.1089/3dp.2021.0114
6. Bamberg J., Dusel K., Satzger W. Overview of Additive Manufacturing Activities at MTU Aero Engines // AIP Conference Proceedings. 2015. Vol. 1650 (1). P. 156–163. DOI: 10.1063/1.4914605
7. Zenzinger G., Bamberg J., Ladewig A., Hess T., Henkel B., Satzger W. Process Monitoring of Additive Manufacturing by Using Optical Tomography // AIP Conference Proceedings. 2015. Vol. 1650 (1). P. 164–170. DOI: 10.1063/1.4914606

References

1. Badiru A., Valencia V., Badiru A., Liu D., Hartsfield C. Additive manufacturing handbook. Boca Raton: CRC Press, 2017. P. 938.
2. Padmakumar M. Additive Manufacturing of Tungsten Carbide Hardmetal Parts by Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) and Binder Jet 3D Printing (BJ3DP) Techniques // Lasers in Manufacturing and Materials Processing. 2020;7:338–371. DOI: 10.1007/s40516-020-00124-0

3. Bamberg J., Zenzinger G., Ladewig A. In-Process Control of Selective Laser Melting by Quantitative Optical Tomography. *19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016), 13–17 June 2016 in Munich, Germany. e-Journal of Nondestructive Testing*. 2016;21(7). Available at: <https://www.ndt.net/?id=19469>

4. Petrov A.V., Sinilshchikov I.V., Zvyagintsev A.O., Shmelev Yu.D., Ivanov I.A., Zhedaev A.A., Dub A.V., Tikhonovskaya T.A. Application of the optical control systems in the manufacture of products by selective laser melting. *Tyazheloye Mashinostroyeniye*. 2023;5–6:8–11. (In Russ.)

5. Peng X., Kong L., An H., Dong G. A Review of In Situ Defect Detection and Monitoring Technologies in Selective Laser Melting. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 2023;10(3):438–466. DOI: 10.1089/3dp.2021.0114

6. Bamberg J., Dusel K., Satzger W. Overview of Additive Manufacturing Activities at MTU Aero Engines. *AIP Conference Proceedings*. 2015;1650(1):156–163. DOI: 10.1063/1.4914605

7. Zenzinger G., Bamberg J., Ladewig A., Hess T., Henkel B., Satzger W. Process Monitoring of Additive Manufacturing by Using Optical Tomography. *AIP Conference Proceedings*. 2015;1650(1):164–170. DOI: 10.1063/1.4914606

Информация об авторе

Звягинцев Артём Олегович, аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия; zviagintsev.ao16@physics.msu.ru.

Information about the author

Artyom O. Zviagintsev, Postgraduate student, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russia; zviagintsev.ao16@physics.msu.ru.

Статья поступила в редакцию 03.06.2024

The article was submitted 03.06.2024