

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-95-104>
УДК 535.8, 620.179.18



Оригинальная статья

**Д. Д. Хохлов*, А. А. Быков, М. П. Поляков, Д. В. Шишкин, А. Ю. Белых,
А. А. Корнеева, А. А. Золотухина**

*Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук,
ул. Бутлерова, 15, 117342, Москва, Российская Федерация*

**КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ВАННЫ РАСПЛАВА
ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ АДДИТИВНОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ
МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ТЕРМОГРАФИИ**

Аннотация. Представлен метод спектральной термографии для контроля пространственного распределения температуры в ванне расплава при аддитивном формообразовании металлических изделий и экспериментальная установка для реализации данного метода. В основе метода лежит мультиспектральная съемка в четырех узкоспектральных каналах при помощи одиночного матричного приемника излучения. В ходе работы проведена экспериментальная апробация метода на установке электронно-лучевого аддитивного формообразования. Полученные в эксперименте данные подвержены характерным искажениям, связанным с частичным осаждением материала на защитном стекле мультиспектральной камеры. Предложенный алгоритм предварительной обработки скомпенсировал указанные искажения. Результаты экспериментов по электронно-лучевому аддитивному формообразованию указывают на возможность регистрации относительных изменений температуры в процессе аддитивного формообразования. При выбранной частоте регистрации кадров на пространственных распределениях температуры видны периодические изменения, сопряженные с особенностями выбранных режимов наплавки. Общий характер пространственного распределения температуры в ванне расплава в значительной мере совпадает с теоретическими данными, описанными в ранее опубликованных работах. Полученные результаты позволяют судить о возможности дальнейшего применения предложенного подхода для контроля температурных режимов при аддитивном формообразовании.

Ключевые слова: спектральная термография, мультиспектральная камера, неразрушающий контроль, электронно-лучевое аддитивное формообразование, бесконтактный контроль температуры

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-79-10239; <https://rscf.ru/project/24-79-10239>).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Хохлов Демид Денисович* – кандидат технических наук, заведующий лабораторией Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук, <https://orcid.org/0000-0003-0919-7762>, e-mail: khokhlov.dd@ntcup.ru; *Быков Алексей Александрович* – кандидат технических наук, научный сотрудник Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук, <https://orcid.org/0000-0002-7574-3437>, e-mail: bykov@ntcup.ru; *Поляков Михаил Петрович* – младший научный сотрудник Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук, <https://orcid.org/0009-0004-3484-6466>, e-mail: polyakov.mp@ntcup.ru; *Шишкин Дмитрий Владимирович* – техник Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук, <https://orcid.org/0009-0008-4723-0803>, e-mail: shishkindmv@mpei.ru; *Белых Андрей Юрьевич* – младший научный сотрудник Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук, <https://orcid.org/0009-0002-6507-3000>, e-mail: belykh.ay@ntcup.ru; *Корнеева Анастасия Алексеевна* – ведущий инженер-конструктор Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук, <https://orcid.org/0009-0009-9211-7081>, e-mail: korneeva.aa@ntcup.ru; *Золотухина Анастасия Александровна* – младший научный сотрудник Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук, <https://orcid.org/0000-0003-1043-7014>, e-mail: zolotukhina.aa@ntcup.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Вклад авторов: *Хохлов Демид Денисович* – формулирование идеи исследования, анализ и обобщение данных литературы, планирование эксперимента, написание текста рукописи, работа с графическим материалом, анализ результатов, формулирование выводов; *Быков Алексей Александрович* – разработка конструкции мультиспектральной камеры, анализ и систематизация экспериментальных данных, редактирование текста рукописи; *Поляков Михаил Петрович* – разработка оптической схемы мультиспектральной камеры, сбор и систематизация данных, редактирование текста рукописи; *Шишкин Дмитрий Владимирович* – планирование эксперимента по наплавке, сбор и систематизация данных; *Белых Андрей Юрьевич* – разработка и отладка алгоритмов работы мультиспектральной камеры, обработка данных; *Корнеева Анастасия Алексеевна* – разработка конструкции вспомогательной оснастки для съемки, работа с текстом; *Золотухина Анастасия Александровна* – разработка алгоритма калибровки и вычисления температуры.

Для цитирования: Контроль температуры ванны расплава при электронно-лучевом аддитивном формообразовании методом спектральной термографии / Д. Д. Хохлов, А. А. Быков, М. П. Поляков [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 2. – С. 95–104. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-95-104>

Поступила в редакцию: 17.02.2026

Доработанный вариант: 20.05.2026

Утверждена к публикации: 04.06.2026

Подписана в печать: 15.06.2026

Original article

Demid D. Khokhlov*, Alexey A. Bykov, Mikhail P. Poliakov, Dmitriy V. Shishkin, Andrey Yu. Belykh, Anastasiia A. Korneeva, Anastasia A. Zolotukhina

*Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences,
15, Butlerov St., 117342, Moscow, Russian Federation*

TEMPERATURE MONITORING OF THE MOLTEN BATH IN ELECTRON BEAM ADDITIVE MANUFACTURING USING SPECTRAL THERMOGRAPHY

Abstract. This article presents a spectral thermography method for monitoring the spatial temperature distribution in the molten bath during additive manufacturing of metal parts, along with the experimental setup designed to implement this method. The approach is based on multispectral imaging across four narrow-band spectral channels using a single image sensor. The method was experimentally tested on an electron beam additive manufacturing system. The raw experimental data exhibited characteristic distortions caused by partial material deposition on the protective camera window. A dedicated preprocessing algorithm was developed to compensate for these distortions. Experimental results from electron beam additive manufacturing system demonstrate the feasibility of detecting relative temperature changes during the additive synthesis process. At the selected frame capture rate, periodic temperature fluctuations are observable in the spatial temperature maps, correlating with the specific cladding mode parameters. The overall pattern of the spatial temperature distribution in the molten bath shows a high degree of consistency with theoretical predictions reported in earlier publications. These findings confirm the potential for further application of the proposed approach in temperature regime monitoring during additive manufacturing processes.

Keywords: spectral thermography, multispectral camera, non-destructive testing, electron-beam additive manufacturing, non-contact temperature monitoring

Acknowledgements: the study was funded by the Russian Science Foundation (grant no. 24-79-10239 (<https://rscf.ru/en/project/24-79-10239>)).

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about authors: *Demid D. Khokhlov* – Cand. Sci (Engineering), Laboratory Chief at Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0003-0919-7762>, e-mail: khokhlov.dd@ntcup.ru; *Alexey A. Bykov* – Cand. Sci. (Engineering), Researcher at Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0002-7574-3437>, e-mail: bykov@ntcup.ru; *Mikhail P. Poliakov* – Junior Researcher at Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0009-0004-3484-6466>, e-mail: polyakov.mp@ntcup.ru; *Dmitriy V. Shishkin* – Technician at Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0009-0008-4723-0803>, e-mail: shishkindmv@mpei.ru; *Andrey Yu. Belykh* – Junior Researcher at Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0009-0002-6507-3000>, e-mail: belykh.ay@ntcup.ru; *Anastasiia A. Korneeva* – Lead Design Engineer at Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0009-0009-9211-7081>, e-mail: korneeva.aa@ntcup.ru; *Anastasia A. Zolotukhina* – Junior Researcher at Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0003-1043-7014>, e-mail: zolotukhina.aa@ntcup.ru

Contribution of the authors: *Demid D. Khokhlov* – conceptualization of the research idea, literature analysis and synthesis, experimental design for cladding, manuscript drafting, graphical material preparation, formulation of conclusions; *Alexey A. Bykov* – design of the multispectral camera, analysis and systematization of experimental data, manuscript editing; *Mikhail P. Poliakov* – optical scheme design for the multispectral camera, data collection and systematization, manuscript editing; *Dmitriy V. Shishkin* – planning of the cladding experiment, data collection and systematization; *Andrey Yu. Belykh* –

development and debugging of multispectral camera operation algorithms, data processing; *Anastasiia A. Korneeva* – development of the design of auxiliary equipment for data acquisition, manuscript editing; *Anastasia A. Zolotukhina* – development of the temperature calibration and calculation algorithm.

For citation: Khokhlov D. D., Bykov A. A., Poliakov M. P., Shishkin D. V., Belykh A. Yu., Korneeva A. A., Zolotukhina A. A. Temperature monitoring of the molten bath in electron beam additive manufacturing using spectral thermography. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 2, pp. 95–104 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-95-104>

Received: 17.02.2026

Modified: 20.05.2026

Approved for publication: 04.06.2026

Signed to the press: 15.06.2026

Введение. Наиболее современными и активно развивающимися обрабатывающими технологиями являются аддитивные технологические процессы¹. Внедрение новых технологий в данной сфере позволяет работать с различными материалами и обеспечивает изготовление деталей высокого уровня сложности [1; 2]. Рост технических возможностей также обусловлен развитием методов и средств неразрушающего контроля. Контроль важных технологических параметров в режиме реального времени обеспечивает как повышение характеристик изготавливаемых деталей, так и снижение расхода материала в случае существенного отклонения параметров [3].

Значимым фактором при аддитивном производстве изделий из металла является температура в ванне расплава [4]. Значение температуры материала определяет размер ванны расплава и скорость ее охлаждения [5]. В свою очередь данные параметры аддитивного процесса влияют на качество детали, а именно – на появление макродефектов [3] и микродефектов [4; 5], отклонение формы и размеров изделия [6; 7], недостаточное частичное сплавление [5]. Регулировать температуру можно путем изменения подводимой мощности. С данной задачей призваны справляться автоматические системы управления технологических установок [8; 9]. Однако для их корректной работы необходимы сведения о температуре в ванне расплава в режиме реального времени.

В качестве источника обратной связи могут выступить оптические пирометры. Инфракрасные (ИК) и спектральные пирометры [10–12] обеспечивают измерение температуры, усредненной по пятну визирования, но для пространственного картирования температуры следует перейти к изображающим методам. Яркостная ИК-термография [13; 14] является наиболее распространенным методом, хотя точность его ограничена ввиду ряда особенностей. Во-первых, пространственное разрешение при работе в средней и дальней ИК-областях ниже по сравнению с иными системами, рассчитанными на видимый диапазон. Во-вторых, невозможность учесть распределение излучательной способности по поверхности объекта снижает точность измерения температуры. Уменьшить влияние указанных ограничений позволяют методы спектральной термографии видимого и ближнего ИК-диапазонов [15–17], в которых использование более коротковолнового излучения повышает пространственную разрешающую способность, а излучательная способность независимо определяется для каждой точки изображения.

Авторы настоящей работы предложили свой метод спектральной термографии и устройство для его реализации [18]. Метод основан на мультиспектральной съемке объекта в четырех узко-спектральных каналах и дальнейшем определении температуры по четырем значениям интенсивности в каждой точке. Апробация метода на тестовых объектах показала его работоспособность, и потому было принято решение испытать его на реальной установке аддитивного формообразования.

Цель работы – апробация метода контроля температуры в ванне расплава в ходе тестовых экспериментов на установке электронно-лучевого аддитивного формообразования.

Метод спектральной термографии. В основе метода, как уже отмечалось, лежит мультиспектральная съемка в четырех спектральных каналах, а именно: 620 ± 15 , 660 ± 20 , 780 ± 21 и 840 ± 23 нм. Каждый из этих каналов задается независимой оптической системой, представляющей собой спектральный интерференционный светофильтр и объектив (рис. 1, а). При этом полученные спектральные изображения регистрируются единственным матричным приемником

¹ ГОСТ Р 57558–2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. М.: Стандартинформ, 2020. 12 с.

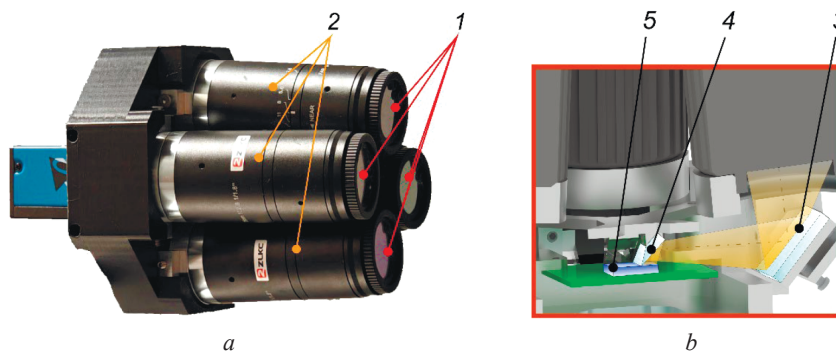


Рис. 1. Общий вид мультиспектральной камеры (а) и фрагмент трехмерной модели (b): 1 – спектральные фильтры; 2 – объективы; 3 – подвижное зеркало; 4 – неподвижное зеркало; 5 – матричный приемник излучения

Fig. 1. General view of multispectral camera (a) and a fragment of 3D model (b): 1 – spectral filters; 2 – objectives; 3 – adjustable mirror; 4 – fixed mirror; 5 – matrix radiation receiver

излучения (МПИ). Для каждого из спектральных каналов на чувствительной площадке МПИ выделена конкретная зона. Для единовременной регистрации изображений всех четырех спектральных каналов в оптической системе каждого из них установлена пара зеркал, что наглядно показано на увеличенном фрагменте трехмерной модели на рис. 1, b. Подробное описание оптической системы, использованных комплектующих и особенностей юстировки спектральных каналов приводится в [18].

Отснятые таким образом изображения были использованы в качестве необработанных исходных данных. Перед определением температуры следовало скорректировать искажения, вносимые мультиспектральной камерой. Поскольку в ее конструкцию входит монохромный МПИ на основе КМОП-приемника, чувствительность его пикселей для разных спектральных каналов различна. Вдобавок к этому при изменении экспозиции отклик в каждом канале также меняется по-разному. Для корректировки указанных искажений нами предварительно отснят набор тест-объектов с известными свойствами. В качестве широкополосного объекта была использована калибровочная фотометрическая сфера (Spectra-FT-2300-W, Labsphere, США) и получена первая серия изображений, зарегистрированных в диапазоне времен экспонирования от 0,0001 до 0,25 с. Затем, чтобы оценить разность чувствительности каналов, отснят узкополосный калибровочный объект, собранный на основе плазменного источника света (XWS 65, ISTEQ, Нидерланды), сопряженного с дифракционным монохроматором (M266i-IV, Solar Laser Systems, Беларусь). В результате калибровки зарегистрирована вторая серия изображений в диапазоне 550–900 нм с шагом в 5 нм. На основе указанных двух серий изображений произведена коррекция нелинейности и спектральной неоднородности чувствительности МПИ.

Для дальнейшей обработки серий изображений также произведена коррекция виньетирования и окончательное сведение изображений в каналах (геометрические преобразования). Коррекция виньетирования выполнялась по наиболее контрастному изображению фотометрической сферы. Геометрические преобразования осуществлялись классическим методом с применением стандартного в машинном зрении тест-объекта в виде шахматных клеток со стороной квадрата 1 мм. Полный цикл преобразований в алгоритме предварительной коррекции представлен на рис. 2.

После предварительной коррекции обработанные изображения возможно использовать для определения температуры. Важный момент заключается в том, что температуру не измеряли косвенным образом, а определяли ближайшую к четырем значениям интенсивности кривую Планка в каждой точке путем оптимизации:

$$\sum_{i=1}^4 (I(\lambda_i) - \varepsilon(\lambda_i) \cdot I_{\text{ПЧТ}}(\lambda_i, T))^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $I(\lambda_i)$ – значения четырех интенсивностей с каждого канала мультиспектральной камеры; $I_{\text{ПЧТ}}(\lambda_i, T)$ – теоретическая кривая Планка; $\varepsilon(\lambda_i)$ – излучательная способность; i – номер спектрального канала.

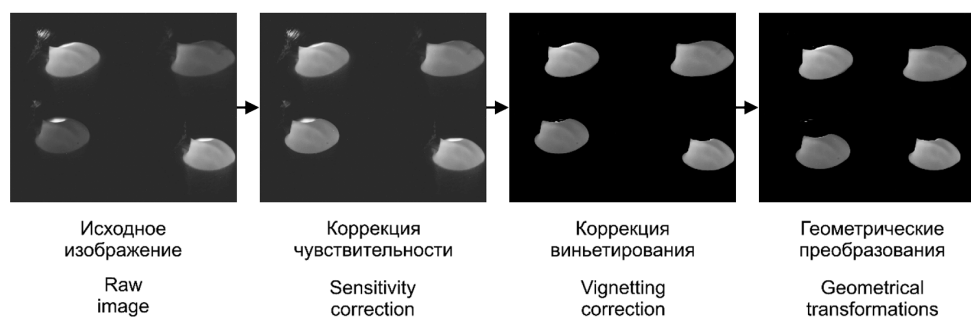


Рис. 2. Алгоритм предварительной коррекции изображений

Fig. 2. Image pre-correction algorithm

Изначальная точка для оптимизации вычислялась на основании данных двухволновой пирометрии для каналов 780 и 840 нм, при этом излучательная способность была одинаковой. При помощи алгоритма [19] в среде MATLAB R2024a для каждого пиксела изображения производился поиск температуры. Зависимость излучательной способности от длины волны в рассматриваемом диапазоне учитывалась через значения $\varepsilon(\lambda_i)$ для отдельных спектральных каналов [20; 21]. Вместе с тем из-за ограниченного числа каналов для решения задачи совместного восстановления температуры и излучательной способности данных недостаточно, поэтому в алгоритме следует использовать регуляризующее ограничение на изменение $\varepsilon(\lambda_i)$ между соседними кадрами. Соответственно, при оптимизации значения излучательной способности по длинам волн были жестко ограничены условием $\pm 0,1 \cdot \varepsilon(\lambda_i)$ от предыдущих кадров в серии.

В процессе предварительного тестирования метода были зарегистрированы серии изображений модели абсолютно черного тела (АЧТ) (образцовый излучатель АЧТ «Гелиос», ООО «Научно-производственная лаборатория «МЕТРОПИР», Россия) и температурной лампы накаливания ТРУ-1100-2350. В диапазоне температур АЧТ 1173–1673 К (900–1400 °С) с шагом в 50 К среднее значение абсолютной погрешности составило 8 К, а максимальное – 31 К. Для лампы накаливания в диапазоне токов 9–16 А при сравнении с результатами работы [22] среднее значение абсолютной погрешности составило 43 К, а максимальное значение – 89 К. Большее значение погрешности в случае температурной лампы может быть связано как с особенностями самой лампы, так и с отсутствием в рамках настоящей работы независимого контроля состояния вольфрамовой ленты и распределения температуры по ней поверочными средствами. Поэтому данный результат рассматривался как дополнительная качественная проверка алгоритма, тогда как основная оценка погрешности метода выполнялась по модели АЧТ.

Результаты и их обсуждение. Перед началом эксперимента конструкция мультиспектральной камеры была доработана путем установки защитного стекла и плотного кожуха, что было обусловлено защитой оптических элементов от осаждения на них испаряемых компонентов сплава и примесей, которые вносят дополнительную погрешность и являются неотъемлемой частью электронно-лучевого аддитивного формообразования (ЭЛАФ) [23]. В рассматриваемом процессе аддитивного формообразования большая часть связанных с осаждением загрязнений сконцентрирована на защитном стекле, что означает изменение его коэффициента пропускания. Таким образом, измерив данный коэффициент при помощи спектрофотометра (СФ-2000, ОКБ «Спектр», Россия) до и после наплавки, можно восстановить линейную зависимость степени загрязнения и приближенно установить коэффициент пропускания в зависимости от времени. Это, в свою очередь, позволяет снизить влияние изменения коэффициента пропускания на значение определяемой температуры. Коэффициент был измерен в 9 точках по поверхности защитного стекла. После электронно-лучевого формообразования интегральный коэффициент пропускания составил около 0,74 от интегрального коэффициента до эксперимента для всех интересующих точек.

Для проведения исследования мультиспектральная камера располагалась в вакуумной камере установки ЭЛАФ (рис. 3). Поле зрения мультиспектральной камеры было совмещено с кончиком мундштука, через который подавалась проволока в ванну расплава.

Непосредственно в ходе эксперимента по ЭЛАФ было наплавлено несколько одиночных валиков длиной 80 мм. Скорость наплавки составляла 125 мм/мин. В качестве наплавляемого

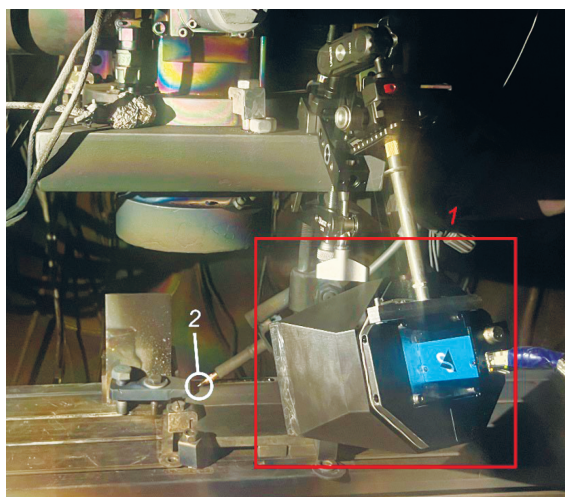


Рис. 3. Мультиспектральная камера в установке электронно-лучевого аддитивного формообразования: 1 – мультиспектральная камера; 2 – зона формирования ванны расплава

Fig. 3. Multispectral camera in an electron beam additive manufacturing setup: 1 – multispectral camera; 2 – the molten pool area

расплава. Данное оптимальное положение недоступно в силу того, что в нем находится электронно-лучевая пушка. Ось наблюдения мультиспектральной камеры ориентирована под углом 40° к плоскости подложки и к оси валика. При этом сам валик по форме напоминает полуцилиндр, а индикатриса излучения металлического расплава значительно отличается от закона Ламберта. В той

материала использовался титановый сплав ВТ6¹ в виде проволоки диаметром 1,2 мм. Подложка изготовлена из прямоугольного бруска ВТ6 толщиной 20 мм. Для всех валиков мощность электронного пучка составила 780 Вт и ускоряющее напряжение – 60 кВ. Исследовалась наплавка валиков без развертки электронного луча, а также с развертками форм «окружность + дуга» и «зиг-заг».

По зарегистрированным сериям изображений были получены пространственные карты температур. Примеры карт показаны на рис. 4. Точки отмечены на рисунках цветными маркерами.

При сравнении полученных распределений с моделью [24] видны некоторые различия. В рассмотренных случаях температура в действительности падает в направлении от электронного луча в сторону хвоста ванны расплава. Однако во всех предложенных картах наблюдается асимметрия, которая связана с ориентацией мультиспектральной камеры. Оптимальное положение мультиспектральной камеры подразумевает ортогональное размещение относительно поверхности валика

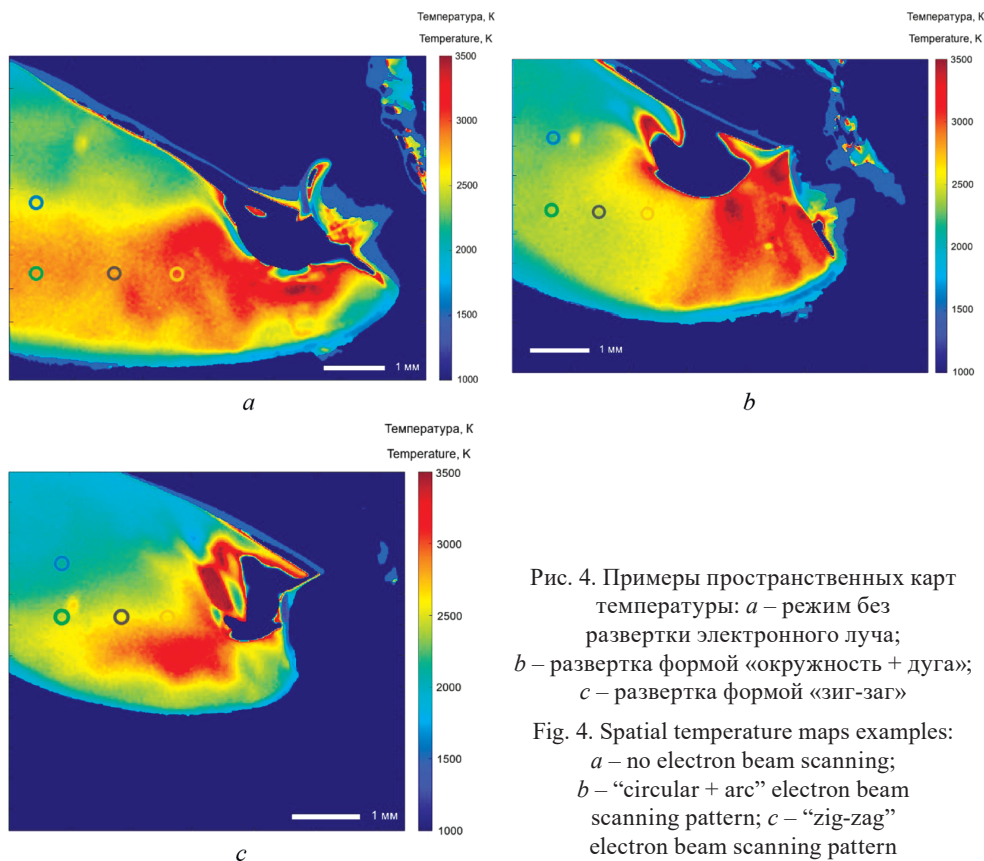


Рис. 4. Примеры пространственных карт температуры: а – режим без развертки электронного луча; б – развертка формой «окружность + дуга»; в – развертка формой «зиг-заг»

Fig. 4. Spatial temperature maps examples: a – no electron beam scanning; b – “circular + arc” electron beam scanning pattern; c – “zig-zag” electron beam scanning pattern

¹ ГОСТ 19807–91. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006390>

области, где угол между осью наблюдения и нормалью к поверхности валика менее 40° , излучательная способность постепенно возрастает [21], достигая своего максимума к 75° . В свою очередь, при дальнейшем увеличении угла наблюдения излучательная способность начинает значительно падать [25]. В результате величина излучательной способности при движении вдоль поверхности расплава существенно изменяется и нарушает априорное ограничение $\pm 0,1 \cdot \varepsilon(\lambda_r)$, введенное нами ранее. Получается, что истинное значение излучательной способности отличается от определяемого предложенным методом, и потому по краям валика температура также падает резко. Таким образом, в отношении пространственного распределения полученные карты справедливы в области углов наблюдения менее 40° . Вдобавок к этому мы были вынуждены исключить из расчета пиксели, лежащие непосредственно в пятне электронного луча, поскольку во всех спектральных каналах для данной области МПИ ушел в насыщение и восстановить значение температуры невозможно.

Дополнительным источником погрешности выступает отраженное излучение. Поверхность жидкого металлического расплава является сравнительно гладкой и может обладать выраженной зеркальной составляющей отражения. Поэтому регистрируемый камерой сигнал может включать не только собственное тепловое излучение поверхности, но и отраженное излучение от нагретых областей технологической зоны. В настоящей работе этот вклад явно не выделялся, что ограничивает точность абсолютного определения температуры. Однако при неизменной геометрии наблюдения в пределах одной серии измерений относительная динамика температурного поля сохраняет диагностическую информативность.

На рис. 5 приведены зависимости температуры от времени эксперимента в некоторых точках, отмеченных на рис. 4 цветными маркерами.

По зависимостям температуры можно отметить, что во всех трех случаях алгоритм коррекции интенсивности в зависимости от загрязнения показал свою работоспособность даже с учетом того, что между этими наборами данных были зарегистрированы дополнительные наборы данных, не показанные в статье. Температура ванны расплава в каждом из рассмотренных наборов данных лежит в интервале более 2000 К, что, в свою очередь, превосходит температуру плавления ВТ6 – 1923 К (1650°C). Таким образом, мультиспектральная камера была настроена корректно и в пределах поля зрения наблюдается только жидкая фаза в ванне расплава на фоне холодной подложки.

Также стоит отметить, что на графиках на рис. 5, *b*, *c* наблюдается периодичность зависимости температурного режима процесса от его продолжительности, что соответствует изменению

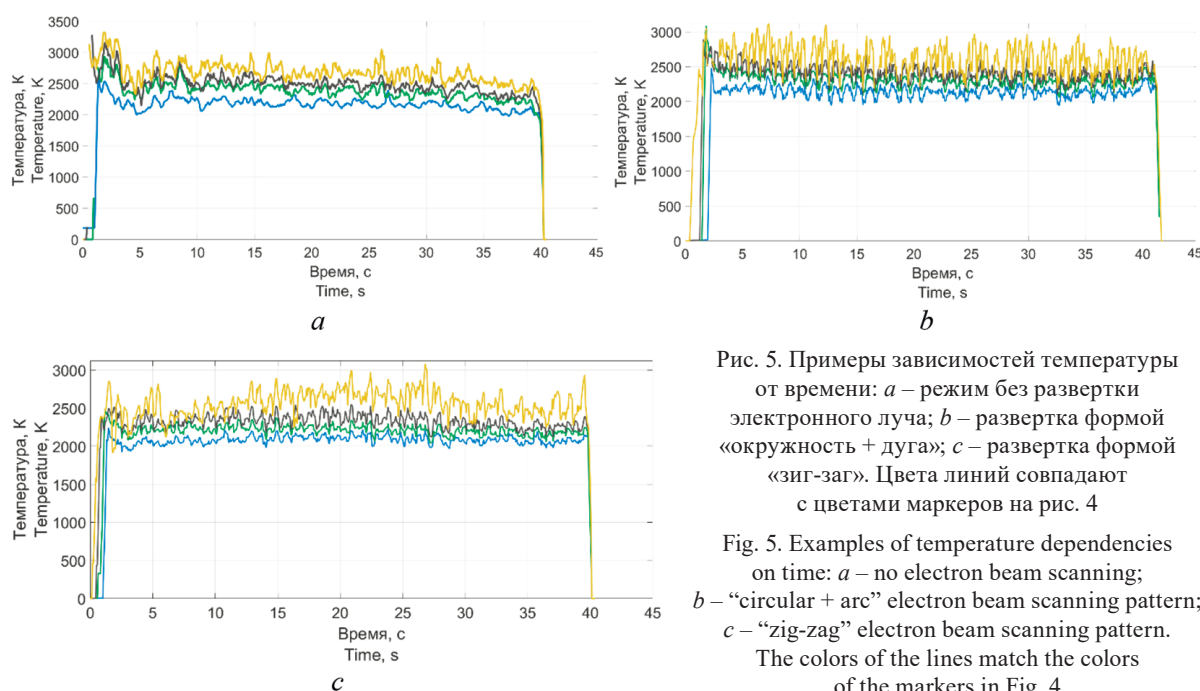


Рис. 5. Примеры зависимостей температуры от времени: *a* – режим без развертки электронного луча; *b* – развертка формой «окружность + дуга»; *c* – развертка формой «зиг-заг». Цвета линий совпадают с цветами маркеров на рис. 4

Fig. 5. Examples of temperature dependencies on time: *a* – no electron beam scanning; *b* – “circular + arc” electron beam scanning pattern; *c* – “zig-zag” electron beam scanning pattern. The colors of the lines match the colors of the markers in Fig. 4

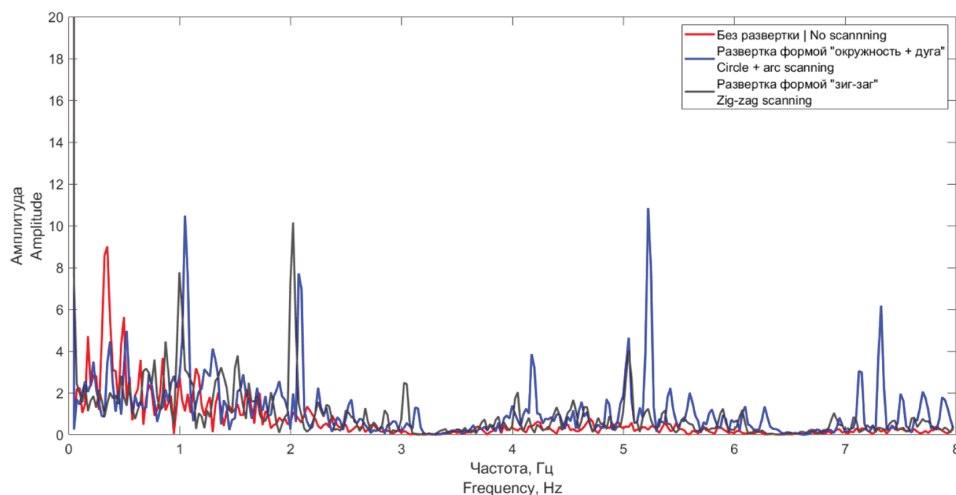


Рис. 6. Примеры амплитудных спектров зависимостей температуры

Fig. 6. Examples of amplitude spectra of temperature dependences

температуры во времени в силу развертки электронного луча. В режиме развертки луч перемещается в пределах поля зрения и проходит в окрестностях точек, выделенных маркерами, изменяя локальное температурное значение. Среди использованных режимов наиболее выражено этот эффект наблюдался для развертки формой «окружность + дуга» (см. рис. 5, *b*). Для развертки формой «зиг-заг» (см. рис. 5, *c*) в интервале между 5 и 10 с можно отметить снижение интенсивности нагрева в связи с локальным дефектом проволоки.

Примеры амплитудных спектров сигналов температуры без развертки и с развертками формой «окружность + дуга» и «зиг-заг» приведены на рис. 6. Для наглядности спектры показаны в одних и тех же координатах. В режиме без развертки, за исключением низких частот (менее 1 Гц), никаких характерных колебаний выявлено не было. В режиме развертки формой «окружность + дуга» наиболее интересны пики 5,225 и 7,325 Гц – это частоты «дуги» и «окружности», которые описывает электронный луч в ходе сканирования.

Закключение. Представлены результаты апробации метода спектральной термографии и устройства для его применения в ходе нескольких экспериментов по ЭЛАФ. В процессе апробации алгоритм коррекции полученного сигнала в зависимости от загрязнения защитного стекла мультиспектральной камеры продемонстрировал свою работоспособность. Полученные значения температуры соответствуют паспортным данным сплава ВТ6. По полученным данным можно частично оценить характерные частоты режима развертки.

С использованием предложенного метода достигается высокая повторяемость результатов регистрации распределения относительных значений температур в ванне расплава. Применение мультиспектральной регистрации в четырех каналах позволяет учитывать спектральные особенности излучения и выполнять восстановление излучательной способности в каждом пикселе изображения, что повышает точность температурного картирования по сравнению с яркостными термографическими методами.

В то же время пространственные температурные карты получились в некоторой мере искаженными. Результаты термографирования существенно зависят от условий регистрации, в частности от угла наблюдения поверхности ванны расплава. Используемая в работе модель восстановления излучательной способности при больших углах наблюдения демонстрирует ограниченную применимость и требует дальнейшего развития для снижения погрешности абсолютного измерения температуры и уменьшения зависимости результатов от геометрии наблюдения.

Кроме того, в ходе экспериментов мультиспектральная камера осуществляла регистрацию кадров на частоте 16 Гц, что соответствовало максимуму пропускной способности интерфейса обмена данными «мультиспектральная камера – ПК» при наибольшем разрешении и разрядности аналого-цифрового преобразователя, то есть обеспечивала наилучшее качество изображения. При программном снижении качества регистрируемых изображений при помощи таких инстру-

ментов, как выбор некоторой конечной области интереса меньшего размера либо объединение соседних пикселей сенсора мультиспектральной камеры с кратным снижением разрешения, возможно получить большую частоту кадров и обеспечить отслеживание пятна электронного луча с гораздо лучшим временным разрешением.

Список использованных источников

1. Additive Manufacturing: A Comprehensive Review / L. Zhou, J. Miller, J. Vezza [et al.] // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24, № 9. – Art. ID 2668. <https://doi.org/10.3390/s24092668>
2. Gibson, I. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – New York: Springer, 2014. – XXII, 459 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>
3. A review on qualification and certification for metal additive manufacturing / Z. Chen, C. Han, M. Gao [et al.] // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2022. – Vol. 17, № 2. – P. 382–405. <https://doi.org/10.1080/17452759.2021.2018938>
4. Влияние условий термоциклирования в процессе аддитивного производства заготовок из нержавеющей стали и силумина на их микроструктуру / И. Л. Поболь, А. А. Бакинский, М. К. Степанкова [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2018. – Т. 4. – С. 133–138. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-4-133-138>
5. Логинова, И. С. Исследование формирования структуры в процессе лазерной обработки алюминиевых сплавов, предназначенных для аддитивных технологий: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Логинова Ирина Сергеевна; Нац. исслед. технол. ун-т «МИСиС». – М., 2019. – 157 л.
6. Какорин, Д. Д. Автоматизация технологического процесса аддитивного производства металлических изделий послонной электродуговой наплавкой: дис. ... канд. техн. наук: 2.3.3 / Какорин Даниил Дмитриевич; Твер. гос. техн. ун-т. – Тверь, 2025. – 158 л.
7. Geometrical Influence on Material Properties for Ti6Al4V Parts in Powder Bed Fusion / F. Nahr, M. Rasch, C. Burkhardt [et al.] // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2023. – Vol. 7, № 3. – Art. ID 82. <https://doi.org/10.3390/jmmp7030082>
8. Paolini A. Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods / A. Paolini, S. Kollmannsberger, E. Rank // *Additive Manufacturing*. – 2019. – Vol. 30. – Art. ID 100894. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894>
9. Alhijaili A. Teams of robots in additive manufacturing: a review / A. Alhijaili, Z. M. Kilic, A. N. P. Bartolo // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2023. – Vol. 18, № 1. – Art. ID e2162929. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2162929>
10. Enabling pyrometry in absorber-free laser transmission welding through pulsed irradiation / V. Mamuschkin, A. Haeusler, C. Engelmann [et al.] // *Journal of Laser Applications*. – 2017. – Vol. 29, № 2. – Art. ID 022409. <https://doi.org/10.2351/1.4983515>
11. Fast Multi-Wavelength Pyrometer for Dynamic Temperature Measurements / R. Belikov, D. Merges, D. Varentsov [et al.] // *International Journal of Thermophysics*. – 2024. – Vol. 45, № 2. – Art. ID 29. <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03323-x>
12. Снопко, В. Н. Основы методов пирометрии по спектру теплового излучения / В. Н. Снопко; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т физики им. Б. И. Степанова. – Мн.: Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, 1999. – 224 с.
13. Radiometric Techniques for Emissivity and Temperature Measurements for Industrial Applications / E. M. Vuelban, F. Girard, M. Battuello [et al.] // *International Journal of Thermophysics*. – 2015. – Vol. 36, № 7. – P. 1545–1568. <https://doi.org/10.1007/s10765-015-1901-8>
14. Application of infrared thermography for laser metal-wire additive manufacturing in vacuum / X. P. Ding, H. M. Li, J. Q. Zhu [et al.] // *Infrared Physics & Technology*. – 2017. – Vol. 81. – P. 166–169. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.12.017>
15. Vallabh C. K. P. Melt pool temperature measurement and monitoring during laser powder bed fusion based additive manufacturing via single-camera two-wavelength imaging pyrometry (STWIP) / C. K. P. Vallabh, X. Zhao // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2022. – Vol. 79. – P. 486–500. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.04.058>
16. High-resolution melt pool thermal imaging for metals additive manufacturing using the two-color method with a color camera / A. J. Myers, G. Quirarte, F. Ogoke [et al.] // *Additive Manufacturing*. – 2023. – Vol. 73. – Art. ID 103663. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103663>
17. Temperature measurement in laser–metal processing using optical sensing: Radiometric calibration and validation of a multispectral camera / R. Dai, A. Cohen, T. Stoll [et al.] // *Measurement*. – 2025. – Vol. 242. – Art. ID 115896. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115896>
18. Four-Wavelength Thermal Imaging for High-Energy-Density Industrial Processes / A. Bykov, A. Zolotukhina, M. Poliakov [et al.] // *Journal of Imaging*. – 2025. – Vol. 11, № 6. – Art. ID 176. <https://doi.org/10.3390/jimaging11060176>
19. Convergence Properties of the Nelder–Mead Simplex Method in Low Dimensions / J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright [et al.] // *SIAM Journal on Optimization*. – 1998. – Vol. 9, № 1. – P. 112–147. <https://doi.org/10.1137/S1052623496303470>
20. Goldsmith, A. *Handbook of Thermophysical Properties of Solid Materials: in 5 vols.* / A. Goldsmith, T. E. Waterman, H. J. Hirschhorn. – New York: Macmillan, 1961–1963. – 5 vols.
21. *Fundamentals of heat and mass transfer.* / F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman [et al.]. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010. – 997 p.
22. Gulyaev, I. P. Spectral-brightness pyrometry: Radiometric measurements of non-uniform temperature distributions / I. P. Gulyaev, A. V. Dolmatov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 116. – P. 1016–1025. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.084>
23. Власов, А. И. Физико-химические основы приборостроения: учеб. пособие / А. И. Власов, В. П. Жалнин, К. В. Селиванов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. – 611 с.

24. Heat and mass transfer in electron beam additive manufacturing / X. Lai, G. Yang, Y. Wang, Z. Wei // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2023. – Vol. 259. – Art. ID 108613. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108613>
25. Свет, Д. Я. Температурное излучение металлов и некоторых веществ / Д. Я. Свет. – М.: Металлургия, 1964. – 134 с.

References

1. Zhou L., Miller J., Vezza J., Mayster M., Raffay M., Justice Q., Al Tamimi Z., Hansotte G., Sunkara L. D., Bernat J. Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 9, art. ID 2668. <https://doi.org/10.3390/s24092668>
2. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. New York, Springer, 2014. XXII, 459 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>
3. Chen Z., Han C., Gao M., Kandukuri S. Y., Zhou K. A review on qualification and certification for metal additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 2022, vol. 17, no. 2, pp. 382–405. <https://doi.org/10.1080/17452759.2021.2018938>
4. Pobol I. L., Bakinovskiy A. A., Stepankova M. K., Burin A. N., Gupko A. D. The influence of thermal cycling conditions during additive manufacturing of stainless steel and silumin blanks on their microstructure. *Litje i metallurgija = Foundry Production and Metallurgy*, 2018, vol. 4, pp. 133–138 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-4-133-138>
5. Loginova I. S. *Study of Structure Formation During Laser Processing of Aluminum Alloys Intended for Additive Technologies* [dissertation]. Moscow, 2019. 157 p. (in Russian).
6. Kakorin D. D. *Automation of the Technological Process of Additive Manufacturing of Metal Products by Layer-by-Layer Electric Arc Surfacing* [dissertation]. Tver, 2025. 158 p. (in Russian).
7. Nahr F., Rasch M., Burkhardt C., Renner J., Baumgärtner B., Hausotte T., Körner C. [et al.]. Geometrical Influence on Material Properties for Ti6Al4V Parts in Powder Bed Fusion. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2023, vol. 7, no. 3, art. ID 82. <https://doi.org/10.3390/jmmp7030082>
8. Paolini A., Kollmannsberger S., Rank E. Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 30, art. ID 100894. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894>
9. Alhijaili A., Kilic Z. M., Bartolo A. N. P. Teams of robots in additive manufacturing: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 2023, vol. 18, no. 1, art. ID e2162929. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2162929>
10. Mamuschkin V., Haesler A., Engelmann C., Olowinsky A., Aehling H. Enabling pyrometry in absorber-free laser transmission welding through pulsed irradiation. *Journal of Laser Applications*, 2017, vol. 29, no. 2, art. ID 022409. <https://doi.org/10.2351/1.4983515>
11. Belikov R., Merges D., Varentsov D., Major Z., Neumayer P., Hesselbach P., Schanz M., Winkler B. Fast Multi-Wavelength Pyrometer for Dynamic Temperature Measurements. *International Journal of Thermophysics*, 2024, vol. 45, no. 2, art. ID 29. <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03323-x>
12. Snopko V. N. *Fundamentals of Pyrometry Methods Based on Thermal Radiation Spectrum*. Minsk, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 1999. 224 p. (in Russian).
13. Vuelban E. M., Girard F., Battuello M., Nemeček P., Maniur M., Pavlásek P., Paans T. Radiometric Techniques for Emissivity and Temperature Measurements for Industrial Applications. *International Journal of Thermophysics*, 2015, vol. 36, no. 7, pp. 1545–1568. <https://doi.org/10.1007/s10765-015-1901-8>
14. Ding X. P., Li H. M., Zhu J. Q., Wang G. Y., Cao H. Z., Zhang Q., Ma H. L. Application of infrared thermography for laser metal-wire additive manufacturing in vacuum. *Infrared Physics & Technology*, 2017, vol. 81, pp. 166–169 <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.12.017>
15. Vallabh C. K. P., Zhao X. Melt pool temperature measurement and monitoring during laser powder bed fusion based additive manufacturing via single-camera two-wavelength imaging pyrometry (STWIP). *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 79, pp. 486–500. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.04.058>
16. Myers A. J., Quirarte G., Ogoke F., Lane B. M., Uddin S. Z., Farimani A. B., Beuth J. L., Malen J. A. High-resolution melt pool thermal imaging for metals additive manufacturing using the two-color method with a color camera. *Additive Manufacturing*, 2023, vol. 73, art. ID 103663. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103663>
17. Dai R., Cohen A., Stoll T., Wudy K., Kizel F. Temperature measurement in laser–metal processing using optical sensing: Radiometric calibration and validation of a multispectral camera. *Measurement*, 2025, vol. 242, art. ID 115896. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115896>
18. Bykov A., Zolotukhina A., Poliakov M., Belykh A., Asyutin R., Korneeva A., Batshev V., Khokhlov D. Four-Wavelength Thermal Imaging for High-Energy-Density Industrial Processes. *Journal of Imaging*, 2025, vol. 11, no. 6, art. ID 176. <https://doi.org/10.3390/jimaging11060176>
19. Lagarias J. C., Reeds J. A., Wright M. H., Wright P. E. Convergence Properties of the Nelder–Mead Simplex Method in Low Dimensions. *SIAM Journal on Optimization*, 1998, vol. 9, no. 1, pp. 112–147. <https://doi.org/10.1137/S1052623496303470>
20. Goldsmith A., Waterman T. E., Hirschhorn H. J. *Handbook of Thermophysical Properties of Solid Materials: in 5 volumes*. New York: Macmillan, 1961–1963.
21. Incropera F. P., Dewitt D. P., Bergman T. L., Lavine A. S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Hoboken, John Wiley & Sons, 2010. 997 p.
22. Gulyaev I. P., Dolmatov A. V. Spectral-brightness pyrometry: Radiometric measurements of non-uniform temperature distributions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 116, pp. 1016–1025. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.084>
23. Vlasov A. I., Zhalnin V. P., Selivanov K. V. *Physicochemical Foundations of Instrument Making: Textbook*. Moscow, BMSTU, 2024. 611 p. (in Russian).
24. Lai X., Yang G., Wang Y., Wei Z. Heat and mass transfer in electron beam additive manufacturing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, vol. 259, art. ID 108613. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108613>
25. Svet D. Ya. *Thermal Radiation of Metals and Certain Substances*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1964. 134 p. (in Russian).