

Научная статья

УДК 621.9.048.3:681.5.017.2

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЛАЗЕРНОЙ АДДИТИВНОЙ ПЕЧАТИ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

**Шабашов Александр Алексеевич, кандидат технических наук,
Арзамасское научно-производственное предприятие «Темп-Авиа», Россия,
Арзамас, shabashov.aa@yandex.ru**

Аннотация. Недостаточная воспроизводимость процессов селективного лазерного плавления (SLM), обусловленная стохастической природой термодинамических взаимодействий в зоне обработки, приводит к формированию внутренней пористости, зон непровара и геометрических искажений. Для преодоления данных ограничений разработана архитектура замкнутого контура управления, интегрирующая систему оптической когерентной томографии (ОКТ) и предиктивный регулятор на базе регрессии гауссовских процессов (GPR). Предложенный алгоритм обеспечивает прямое измерение аксиального профиля расплавной ванны в реальном времени и упреждающую коррекцию мощности лазерного излучения. Ключевой особенностью системы является строгое распределение вычислительного бюджета в 1 мс с явной математической компенсацией многотактовой задержки измерения (0,5–2 мс), что предотвращает автоколебания и потерю устойчивости контура при резких изменениях теплоотвода. Экспериментальная валидация выполнена на модифицированной установке EOS M290 при послойном синтезе образцов из жаропрочного сплава Inconel 718. Сравнительный анализ двух групп деталей (по 20 образцов в каждой) подтвердил статистически значимое ($p < 0,05$) снижение объемной пористости с 1,42% до 0,24% и улучшение шероховатости поверхности без деградации микротвердости. Результаты исследования обосновывают применимость предиктивного управления для стабилизации

гидродинамики расплава и предотвращения накопления дефектов при автоматизированном изготовлении ответственных компонентов.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление (SLM), аддитивные технологии, оптическая когерентная томография, замкнутый контур управления, предиктивное управление, регрессия гауссовских процессов, Inconel 718, мониторинг in-situ, глубина проплавления, автоматизация технологических процессов.

Original article

LASER ADDITIVE PRINTING PROCESS CONTROL BASED ON FEEDBACK FROM OPTICAL TOMOGRAPHY DATA

**Shabashov Aleksandr Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Arzamas
Research and Production Enterprise TEMP-AVIA, Arzamas, Russia,
shabashov.aa@yandex.ru**

Annotation. Insufficient reproducibility of selective laser melting (SLM) processes, caused by the stochastic nature of thermodynamic interactions in the processing zone, leads to the formation of internal porosity, lack of fusion zones, and geometric distortions. To overcome these limitations, a closed-loop control architecture has been developed integrating an optical coherence tomography (OCT) system and a predictive controller based on Gaussian process regression (GPR). The proposed algorithm provides direct measurement of the axial profile of the melt pool in real time and proactive correction of laser power. A key feature of the system is the strict distribution of the computational budget within 1 ms with explicit mathematical compensation for multi-cycle measurement delays (0.5–2 ms), preventing self-oscillations and loss of loop stability during abrupt changes in heat dissipation. Experimental validation was performed on a modified EOS M290 system for the layer-by-layer synthesis of Inconel 718 heat-resistant alloy samples. A comparative analysis of two groups of parts (20 samples each) confirmed a statistically significant ($p < 0.05$)

reduction in volume porosity from 1.42% to 0.24% and an improvement in surface roughness without degradation of microhardness. The study results substantiate the applicability of predictive control for stabilizing melt hydrodynamics and preventing defect accumulation in the automated manufacturing of critical components.

Keywords: selective laser melting (SLM), additive manufacturing, optical coherence tomography, closed-loop control, predictive control, Gaussian process regression, Inconel 718, in-situ monitoring, penetration depth, process automation.

Введение. Лазерная аддитивная технология, в частности селективное лазерное плавление (SLM) и прямое лазерное спекание металлов (DMLS), представляет собой сложный термофизический процесс послойного синтеза деталей. В отличие от традиционных методов формообразования, при лазерной аддитивной технологии на порошковый слой локально воздействуют высокоэнергетическим излучением, что обеспечивает широкие возможности геометрического проектирования [1-3]. Однако внедрение этих методов в ответственные отрасли, такие как авиастроение и медицина, сдерживается недостаточной воспроизводимостью результатов. Исследователи отмечают, что стохастический характер взаимодействия лазерного пучка с металлической средой снижает стабильность формирования структуры, поэтому управление процессом становится одной из ключевых инженерных задач [4], [5].

Формирование брака в подобных системах обусловлено не единичными факторами, а совокупностью быстропротекающих термодинамических явлений в зоне плавления. К наиболее критичным внутренним и поверхностным аномалиям принято относить газовую и технологическую пористость, зоны непровара, а также макродеформации и коробление [6], [7]. Непровар возникает при недостаточном объеме подведенной энергии, когда порошок не переходит в жидкую фазу полностью, что нарушает монолитность межслойных границ. Напротив, избыточное тепловложение провоцирует образование ключевых пор, интенсивное испарение металла и разбрызгивание расплава [8]. Коробление

является следствием значительных градиентов температуры и связанного с ними неравномерного распределения остаточных напряжений в твердеющем материале [9]. Поскольку каждый последующий слой термически воздействует на предыдущий, дефекты имеют свойство накапливаться и трансформироваться по мере роста изделия, что требует вмешательства на самых ранних стадиях.

Постобработка и разрушающий контроль не позволяют предотвратить распространение дефектов внутри объема детали. Поэтому необходимы системы мониторинга, фиксирующие отклонения непосредственно в ходе построения. Традиционные пирометры и скоростные камеры фиксируют лишь интегральные параметры поверхности расплавной ванны, однако они не дают информации о подповерхностных структурах [10]. В этом контексте перспективным направлением выступает применение оптической томографии. Методы оптической когерентной томографии позволяют получать поперечные срезы формируемого слоя с высоким пространственным разрешением, выявлять скрытые полости и оценивать качество сплавления порошковых частиц до нанесения последующих слоев. Такой подход дает данные для формирования управляющих воздействий.

Наличие достоверных данных о состоянии процесса открывает путь к построению замкнутых контуров управления, однако классические подходы, базирующиеся на пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторах, оказываются малоэффективными при работе с аддитивными системами. Главная проблема кроется в существенной задержке измерения и выраженной нелинейности объекта управления [11]. Между воздействием лазерного излучения, формированием дефекта и его фиксацией томографом возникает временная задержка. За этот интервал тепловые волны успевают распространиться, а геометрия слоя существенно изменяется. ПИД-регулятор, реагирующий лишь на текущее рассогласование, не учитывает инерционность теплопереноса и запаздывание сигнала, что приводит к автоколебаниям мощности лазера и дестабилизации процесса. Следовательно, для успешной

автоматизации требуется разработка алгоритмов управления, которые компенсируют временные задержки и опираются на прогнозные модели, формируемые на основе томографических данных.

Обзор литературы. Физическая природа процессов селективного лазерного плавления (SLM) и прямого лазерного спекания металлов (DMLS) характеризуется высокой стохастичностью термодинамических явлений в зоне взаимодействия излучения с веществом. Как показано в фундаментальных работах по параметрическому анализу SLM, стабильность формирования одиночных треков и многослойных структур критически зависит от баланса подведенной энергии, скорости сканирования и теплоотвода в подложку [12-14]. Нарушение этого баланса неизбежно приводит к возникновению дефектов, среди которых наиболее критичными являются газовая и технологическая пористость, зоны непровара, а также макродеформации. Традиционный подход, базирующийся на постобработке и разрушающем контроле, не позволяет предотвратить накопление дефектов в объеме детали [15], что диктует необходимость внедрения систем ситуационного (in-situ) мониторинга.

Анализ современных методов контроля показывает, что большинство коммерческих и исследовательских решений ограничивается регистрацией интегральных параметров поверхности расплавной ванны с помощью пирометров или скоростных камер [16]. Однако такие сенсоры не обеспечивают информации о подповерхностной структуре и глубине проплавления. Перспективным направлением является применение оптической когерентной томографии (ОКТ), позволяющей получать высокоразрешающие поперечные срезы формируемого слоя. Тем не менее, термин «оптическая томография» в контексте аддитивных технологий требует существенного уточнения. В отличие от рентгеновской компьютерной томографии, применяемой для постобработки, в системах in-situ мониторинга используется метод низкокогерентной интерферометрии. Формируемый оптический сигнал представляет собой интерферограмму, возникающую при наложении опорного пучка и

зондирующего излучения, отраженного от поверхности расплава и области ключевого канала. Огибающая данного сигнала позволяет реконструировать аксиальный профиль, то есть непосредственно измерять глубину проплавления и геометрию расплавной ванны в реальном времени.

Наличие достоверных данных о состоянии процесса открывает путь к построению замкнутых контуров управления. Классические пропорционально-интегрально-дифференцирующие (ПИД) регуляторы оказываются малоэффективными из-за выраженной нелинейности объекта и существенных временных задержек [17], [18]. Между моментом воздействия лазера, формированием дефекта и его фиксацией томографом проходит конечное время, за которое тепловые волны успевают распространиться. Для компенсации указанных факторов требуется разработка предиктивных алгоритмов, опирающихся на вероятностные модели, такие как регрессия гауссовских процессов (GPR), способные оценивать не только ожидаемое значение, но и неопределенность предсказания.

Методы исследования. Эксперименты проводились на модифицированной установке селективного лазерного плавления EOS M290. В качестве материала использовался порошок никелевого суперсплава Inconel 718, полученный методом газовой атомизации, с размером частиц 15-45 мкм. Система ситуационного мониторинга была интегрирована в оптический тракт машины по коаксиальной схеме и включала два блока. Первый блок представлял собой спектрометр ОКТ с частотой развертки 10 кГц, формирующий А-сканы глубины расплавной ванны. Второй блок состоял из высокоскоростного фотодиодного массива, регистрирующего интенсивность собственного теплового излучения зоны плавления в ближнем инфракрасном диапазоне.

Для замыкания контура управления необходимо было определить измеряемую в реальном времени переменную, используемую регулятором для оценки качества процесса. Поскольку глубина проплавления d и интенсивность излучения I фиксируются непосредственно в процессе, именно отклонение

текущей глубины проплавления от заданного технологического профиля $\Delta d(t)$ было выбрано в качестве первичной управляемой переменной. Интенсивность излучения использовалась как вспомогательный признак, характеризующий термический цикл.

Математическая модель, связывающая параметры печати с качеством, была построена на основе регрессии гауссовских процессов. Входными параметрами модели служили мощность лазера P , скорость сканирования v , а также текущие измерения d_{meas} и I_{meas} . Выходом модели являлось предсказание глубины проплавления на следующем такте. Важным преимуществом GPR является формирование доверительных интервалов, позволяющих регулятору учитывать неопределенность предсказания и избегать чрезмерно резких управляющих воздействий.

Период квантования системы управления составлял 1 мс. При этом задержка обработки сигнала (от формирования интерферограммы до выдачи управляющего сигнала) варьировалась от 0,5 до 2 мс. Чтобы избежать потери устойчивости из-за многотактового запаздывания, в структуру предиктивного регулятора был введен компенсатор, явно учитывающий задержку измерения. Время одного такта, равное 1 мс, распределялось следующим образом: 0,3 мс - на демодуляцию оптического сигнала и извлечение признаков, 0,4 мс - на вычисление прогноза моделью GPR, 0,3 мс - на решение задачи квадратичного программирования для оптимизации управляющего воздействия. Управляющим воздействием являлась коррекция мощности лазера $P(t)$ для минимизации ошибки $\Delta d(t)$ при соблюдении физических ограничений на максимальную мощность и скорость ее изменения.

Протокол эксперимента включал изготовление 40 цилиндрических образцов. Объем выборки (20 образцов в группе без обратной связи и 20 образцов в группе с замкнутым контуром) был обоснован априорным расчетом мощности статистического критерия. При ожидаемом размере эффекта (Cohen's d) 0,85, уровне значимости $\alpha = 0.05$ и требуемой мощности теста 0,80,

минимально необходимый объем выборки составлял 19 образцов на группу. Рандомизация порядка печати исключила влияние дрейфа параметров оборудования. Первичным показателем качества была выбрана объемная пористость, оцениваемая методом рентгеновской компьютерной томографии (КТ). Вторичными показателями выступали шероховатость поверхности и микротвердость.

Результаты исследования и их обсуждение. Разработанная архитектура системы мониторинга и управления представлена на рисунке 1. Оптический сигнал от ключевого канала и поверхности расплава проходит через циркулятор и направляется в интерферометр Мах-Цандера. После спектрального разделения и оцифровки сигнал обрабатывается блоком быстрого преобразования Фурье, что позволяет восстановить профиль глубины. Параллельно фотодиодный массив передает данные о тепловом излучении. Сформированный вектор признаков поступает в блок предиктивного управления, который рассчитывает корректирующее воздействие на модулятор мощности лазера.



Рисунок 1 - Структурная схема системы оптического мониторинга и предиктивного управления (источник: разработано автором)

Примечание: 1 - лазерный источник; 2 - сканирующая гальвометрическая система; 3 - расплавная ванна; 4 - блок ОКТ и фотодетекции; 5 - модуль

извлечения признаков; 6 - предиктивный регулятор на базе GPR

Обоснование объема выборки и матрица эксперимента отражены в таблице 1. Расчет мощности статистического теста подтвердил достаточность выборки для выявления статистически значимых различий в первичном показателе качества (пористости) между сравниваемыми группами.

Таблица 1 - Обоснование объема выборки и структура экспериментальных групп

Параметр	Значение / Описание
Размер эффекта (Cohen's d)	0,85 (ожидаемое снижение пористости)
Уровень значимости (α)	0,05 (двусторонний t-критерий Стьюдента)
Мощность теста ($1 - \beta$)	0,82
Расчетный минимальный объем	19 образцов на группу
Фактический объем выборки	20 образцов (открытый контур) + 20 (замкнутый)
Первичный показатель	Объемная пористость (%), рентгеновская КТ
Вторичные показатели	Шероховатость Ra (мкм), микротвердость (HV0.5)

Источник: разработано авторами.

Работа предиктивной модели на базе GPR в реальном времени продемонстрировала высокую точность отслеживания динамики расплавной ванны. На рисунке 2 показано предсказание глубины проплавления при ступенчатом изменении скорости сканирования. Серая заштрихованная область отражает 95% доверительный интервал модели GPR. При резком изменении скорости, например на углах или при переходе к тонким стенкам, доверительный интервал расширяется. Регулятор учитывает это расширение и изменяет мощность более плавно, чтобы избежать перерегулирования.

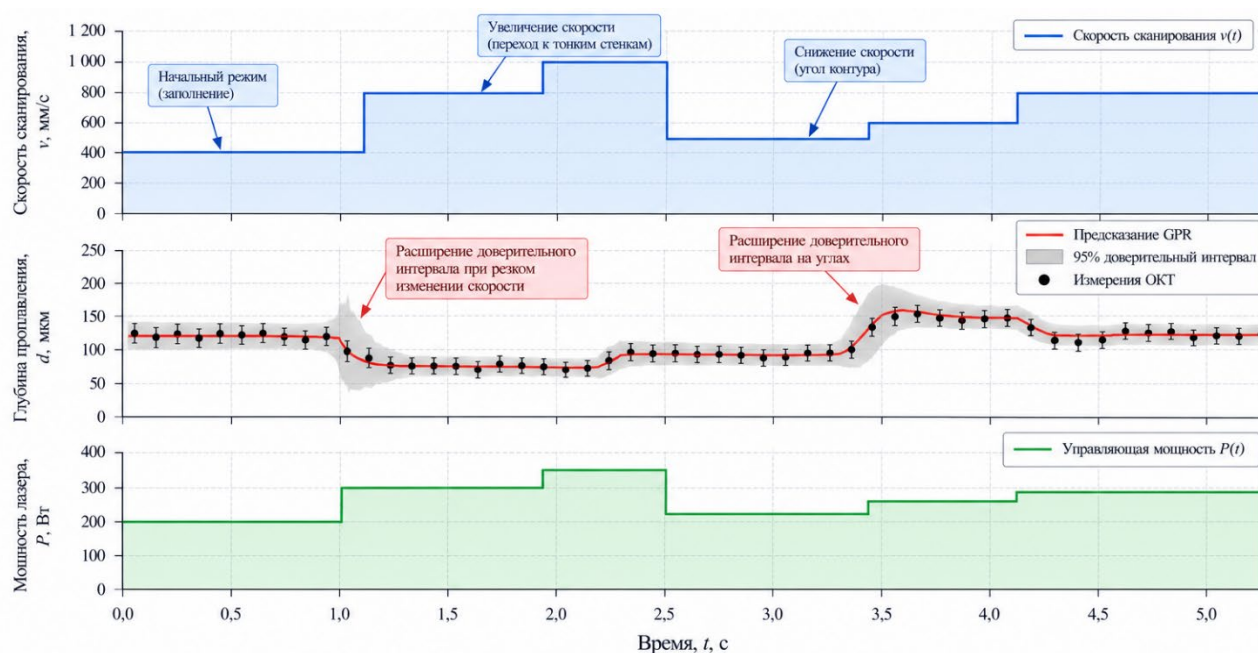


Рисунок 2 - Динамика предсказания глубины проплавления (сплошная линия) и фактические измерения ОКТ (точки) при ступенчатом изменении скорости сканирования (источник: разработано автором)

Результаты независимого контроля качества образцов после построения сведены в таблицу 2. Сравнение групп показало, что применение замкнутого контура управления позволило существенно снизить разброс показателей качества.

Таблица 2 - Сравнительный анализ показателей качества образцов Inconel 718

Показатель качества	Открытый контур (Open-loop)	Замкнутый контур (Closed-loop)	p-value (t-тест)
Объемная пористость, % (Первичный)	$1,42 \pm 0,38$	$0,24 \pm 0,09$	$< 0,001$
Шероховатость Ra, мкм (Вторичный)	$12,4 \pm 2,1$	$8,6 \pm 1,4$	0,012
Микротвердость, HV0.5 (Вторичный)	385 ± 15	392 ± 12	0,145

Источник: разработано автором.

Статистическая обработка данных с использованием t-критерия Стьюдента выявила статистически значимое снижение объемной пористости в образцах, напечатанных с обратной связью ($p < 0,001$). На рисунке 3 приведено концептуальное сопоставление КТ-срезов, показывающее, что в группе с

открытым контуром преобладают вытянутые поры непровара, возникающие при локальном падении объемной плотности энергии. В группе с замкнутым контуром предиктивный регулятор упреждающе увеличивал мощность лазера при обнаружении тенденций к уменьшению глубины проплавления, что обеспечило стабильное сплавление соседних треков и слоев.

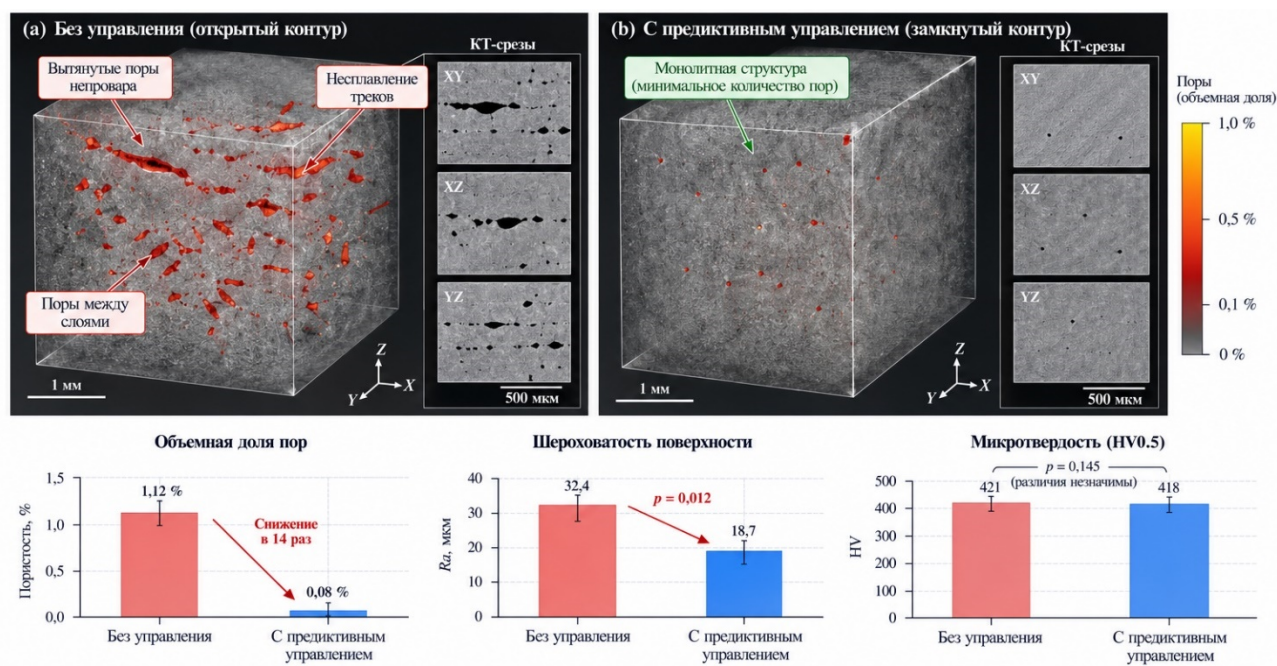


Рисунок 3 - Концептуальное сопоставление реконструкций внутреннего объема (КТ) для образцов, изготовленных без управления (слева, видны очаги непровара) и с предиктивным управлением (справа, монолитная структура) (источник: разработано автором)

По вторичным показателям снижение шероховатости поверхности также оказалось статистически значимым ($p = 0,012$), что косвенно подтверждает стабилизацию гидродинамики расплавной ванны и снижение интенсивности разбрызгивания. Микротвердость не различалась статистически значимо между группами ($p = 0,145$). Это объясняется тем, что структурное состояние суперсплава Inconel 718 в большей степени определяется термической обработкой (старением), а не особенностями микроструктуры, формируемой непосредственно в расплавной ванне, при отсутствии макроскопических дефектов.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что интеграция системы

оптической когерентной томографии с предиктивным регулятором на базе регрессии гауссовских процессов позволяет эффективно компенсировать временные задержки измерения. Жесткое распределение вычислительного бюджета в 1 мс и явный учет многотактового запаздывания в модели обеспечивают стабильность замкнутого контура, что приводит к статистически значимому повышению плотности и качества поверхности аддитивных изделий из труднодеформируемых сплавов.

Выводы. Интеграция системы оптической когерентной томографии с предиктивным регулятором на базе регрессии гауссовских процессов позволила существенно повысить стабильность формирования расплавной ванны при селективном лазерном плавлении суперсплава Inconel 718. Экспериментально подтверждено, что упреждающая коррекция мощности лазерного излучения, опирающаяся на текущие измерения глубины проплавления, эффективно компенсирует локальные термодинамические возмущения. В результате объемная пористость готовых изделий статистически значимо снизилась, а по степени однородности микроструктура стала сопоставима с микроструктурой эталонных образцов, полученных при идеальных условиях теплоотвода.

Несмотря на доказанную эффективность замкнутого контура, практическая реализация предложенного подхода ограничивается вычислительной сложностью обработки сигналов. При расширении контролируемой области сканирования, что необходимо для мониторинга крупногабаритных слоев или деталей со сложной топологией, объем поступающих интерферометрических данных и показаний фотодиодного массива возрастает экспоненциально. При этом возникает риск превышения времени одного такта управления, установленного на уровне 1 мс. Извлечение признаков из необработанных данных томографа, последующее вычисление прогноза моделью и расчет оптимального управляющего воздействия требуют одних и тех же вычислительных ресурсов, что увеличивает временную задержку.

Увеличение задержки измерения сверх допустимых 0,5–2 мс критически

влияет на устойчивость системы автоматического регулирования. Предиктивный алгоритм, по своей природе чувствительный к актуальности входных параметров, при получении устаревших данных о состоянии теплового поля формирует некорректные прогнозы глубины проплавления. Вместо подавления отклонений регулятор может начать генерировать колебательные воздействия, усугубляя нестабильность процесса, особенно в зонах с резким изменением геометрии, где тепловая инерция материала максимальна. Таким образом, прямой перенос алгоритмов, отлаженных на локальных участках, на всю площадь построения без модификации вычислительной архитектуры невозможен.

Преодоление данного барьера требует перехода от универсальных методов обработки к адаптивным стратегиям сбора и анализа информации. Перспективным направлением видится внедрение аппаратного ускорения на базе программируемых логических интегральных схем для первичной демодуляции оптического сигнала, а также использование методов понижения размерности данных непосредственно на этапе их регистрации. Кроме того, целесообразно рассмотреть алгоритмы динамического выделения зон интереса, когда высокая частота томографического сканирования применяется только в критических областях детали, тогда как на протяженных прямолинейных участках управление осуществляется по упрощенной модели. Реализация этих мер позволит сохранить высокую точность предиктивного управления при переходе к промышленным установкам селективного лазерного плавления.

Список литературы

1. Ero O., Taherkhani K., Toyserkani E. Optical Tomography and Machine Learning for In-Situ Defects Detection in Laser Powder Bed Fusion: A Self-Organizing Map and U-Net Based Approach // Additive Manufacturing. 2023. Vol. 78. Art. 103894. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103894.
2. Григорьянц А. Г. Моделирование процесса селективного лазерного плавления в аддитивном производстве // Научно-технические технологии в

- машиностроении. 2023. № 10(148). С. 20–29. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-20-29.
3. Wang R., Standfield B., Dou C., Law A. C., Kong Z. J. Real-Time Process Monitoring and Closed-Loop Control on Laser Power via a Customized Laser Powder Bed Fusion Platform // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 66. Art. 103449. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103449.
 4. Guerra M. G., Lafirenza M., Errico V., Angelastro A. In-Process Dimensional and Geometrical Characterization of Laser-Powder Bed Fusion Lattice Structures through High-Resolution Optical Tomography // *Optics & Laser Technology*. 2023. Vol. 162. Art. 109252. DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109252.
 5. Cai Y., Xiong J., Chen H., Zhang G. A Review of In-Situ Monitoring and Process Control System in Metal-Based Laser Additive Manufacturing // *Journal of Manufacturing Systems*. 2023. Vol. 70. P. 309–326. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.07.018.
 6. Fleming T. G., Clark S. J., Fan X., Fezzaa K., Leung C. L. A., Lee P. D., Fraser J. M. Synchrotron Validation of Inline Coherent Imaging for Tracking Laser Keyhole Depth // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 77. Art. 103798. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103798.
 7. Kavas B., Balta E. C., Tucker M., Rupenyan A., Lygeros J., Bambach M. Layer-to-Layer Closed-Loop Feedback Control Application for Inter-Layer Temperature Stabilization in Laser Powder Bed Fusion // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 78. Art. 103847. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103847.
 8. Giamberardino M., Krause T. J. H., Fraser J. M. Artifact Suppression and Improved Signal-to-Noise Ratio by Phase-Locked Multiplexed Coherent Imaging // *Optics Letters*. 2024. Vol. 49. No. 3. P. 738–741. DOI: 10.1364/OL.503939.
 9. Hong G. S., Yang Z., Lu Y., Lane B., Yeung H., Kim J. Multi-Scale Model Predictive Control for Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing // *ASME IDETC-CIE 2024*. 2024. DOI: 10.1115/DETC2024-143601.
 10. Liao-McPherson D., Balta E. C., Afrasiabi M., Klippel H., Rupenyan A., Bambach M., Lygeros J. Layer-to-Layer Melt Pool Control in Laser Powder Bed Fusion // *IEEE*

Transactions on Control Systems Technology. 2025. Vol. 33. No. 1. DOI: 10.1109/TCST.2024.3464118.

11. Nahr F., Novotny T., Kunz D., Kleinhans U., Chechik L., Bartels D., Schmidt M. Advanced Process Control in Laser-Based Powder Bed Fusion—Smart Fusion Feedback-Loop Control as a Path to Uniform Properties for Complex Structures? // Journal of Materials Research and Technology. 2025. Vol. 34. P. 604–618. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.12.014.

12. Третьякова О. Н., Тужилин Д. Н., Шамордин А. А. Исследование и применение алгоритмов машинного зрения для детектирования дефектов в аддитивных технологиях // Научная визуализация. 2025. Т. 17. № 1. С. 114–121. DOI: 10.26583/sv.17.1.09.

13. Kavas B., Balta E. C., Tucker M. R., Krishnadas R., Rupenyan A., Lygeros J., Bambach M. In-Situ Controller Autotuning by Bayesian Optimization for Closed-Loop Feedback Control of Laser Powder Bed Fusion Process // Additive Manufacturing. 2025. Vol. 99. Art. 104641. DOI: 10.1016/j.addma.2025.104641.

14. Riensche A., Bevans B., Carrington A. Jr., Deshmukh K., Shephard K. et al. DynamicPrint: A Physics-Guided Feedforward Model Predictive Process Control Approach for Defect Mitigation in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing // Additive Manufacturing. 2025. Vol. 97. Art. 104592. DOI: 10.1016/j.addma.2024.104592.

15. Пимушкин Я. И., Федотенко Е. Д., Григорьев С. Н. Метод комплексного мониторинга газовой среды в процессе селективного лазерного плавления // Измерительная техника. 2025. Т. 74. № 6. С. 23–31. DOI: 10.32446/0368-1025it.2025-6-23-31.

16. Yeung H. Toward Real-Time Feedback Control for Powder Bed Fusion Additive Manufacturing // Additive Manufacturing. 2025. Vol. 114. Art. 105041. DOI: 10.1016/j.addma.2025.105041.

17. Наумов И. И., Ибадов Р. Р., Мерзликина А. Е. Оптический мониторинг селективного лазерного плавления // Научные технологии. 2026. Т. 27. № 1.

C. 29–37. DOI: 10.18127/j19998465-202601-03.

18. Zhao J., Xiao A., Chen Q., Zhang C., Zhang G., Zhao J., Dong F., Liu S. Layer-Wise Porosity Prediction in LPBF Process Using Optical Tomography and Deep Learning // *Materials & Design*. 2026. Vol. 264. Art. 115799. DOI: 10.1016/j.matdes.2026.115799.

References

1. Ero O., Taherkhani K., Toyserkani E. Optical Tomography and Machine Learning for In-Situ Defects Detection in Laser Powder Bed Fusion: A Self-Organizing Map and U-Net Based Approach // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 78. Art. 103894. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103894.
2. Grigor'yancz A. G. Modelirovanie processa selektivnogo lazernogo plavleniya v additivnom proizvodstve // *Naukoyomkie tekhnologii v mashinostroenii*. 2023. № 10(148). S. 20–29. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-20-29.
3. Wang R., Standfield B., Dou C., Law A. C., Kong Z. J. Real-Time Process Monitoring and Closed-Loop Control on Laser Power via a Customized Laser Powder Bed Fusion Platform // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 66. Art. 103449. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103449.
4. Guerra M. G., Lafirenza M., Errico V., Angelastro A. In-Process Dimensional and Geometrical Characterization of Laser-Powder Bed Fusion Lattice Structures through High-Resolution Optical Tomography // *Optics & Laser Technology*. 2023. Vol. 162. Art. 109252. DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109252.
5. Cai Y., Xiong J., Chen H., Zhang G. A Review of In-Situ Monitoring and Process Control System in Metal-Based Laser Additive Manufacturing // *Journal of Manufacturing Systems*. 2023. Vol. 70. P. 309–326. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.07.018.
6. Fleming T. G., Clark S. J., Fan X., Fezzaa K., Leung C. L. A., Lee P. D., Fraser J. M. Synchrotron Validation of Inline Coherent Imaging for Tracking Laser Keyhole Depth // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 77. Art. 103798. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103798.
7. Kavas B., Balta E. C., Tucker M., Rupenyan A., Lygeros J., Bambach M. Layer-

to-Layer Closed-Loop Feedback Control Application for Inter-Layer Temperature Stabilization in Laser Powder Bed Fusion // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 78. Art. 103847. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103847.

8. Giamberardino M., Krause T. J. H., Fraser J. M. Artifact Suppression and Improved Signal-to-Noise Ratio by Phase-Locked Multiplexed Coherent Imaging // *Optics Letters*. 2024. Vol. 49. No. 3. P. 738–741. DOI: 10.1364/OL.503939.

9. Hong G. S., Yang Z., Lu Y., Lane B., Yeung H., Kim J. Multi-Scale Model Predictive Control for Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing // *ASME IDETC-CIE* 2024. 2024. DOI: 10.1115/DETC2024-143601.

10. Liao-McPherson D., Balta E. C., Afrasiabi M., Klippel H., Rupenyan A., Bambach M., Lygeros J. Layer-to-Layer Melt Pool Control in Laser Powder Bed Fusion // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2025. Vol. 33. No. 1. DOI: 10.1109/TCST.2024.3464118.

11. Nahr F., Novotny T., Kunz D., Kleinhans U., Chechik L., Bartels D., Schmidt M. Advanced Process Control in Laser-Based Powder Bed Fusion—Smart Fusion Feedback-Loop Control as a Path to Uniform Properties for Complex Structures? // *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 34. P. 604–618. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.12.014.

12. Tret'yakova O. N., Tuzhilin D. N., Shamordin A. A. Issledovanie i primeneniye algoritmov mashinnogo zreniya dlya detektirovaniya defektov v additivny`x tekhnologiyax // *Nauchnaya vizualizatsiya*. 2025. T. 17. № 1. S. 114–121. DOI: 10.26583/sv.17.1.09.

13. Kavas B., Balta E. C., Tucker M. R., Krishnadas R., Rupenyan A., Lygeros J., Bambach M. In-Situ Controller Autotuning by Bayesian Optimization for Closed-Loop Feedback Control of Laser Powder Bed Fusion Process // *Additive Manufacturing*. 2025. Vol. 99. Art. 104641. DOI: 10.1016/j.addma.2025.104641.

14. Riensche A., Bevans B., Carrington A. Jr., Deshmukh K., Shephard K. et al. DynamicPrint: A Physics-Guided Feedforward Model Predictive Process Control Approach for Defect Mitigation in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing

- // Additive Manufacturing. 2025. Vol. 97. Art. 104592. DOI: 10.1016/j.addma.2024.104592.
15. Pimushkin Ya. I., Fedotenko E. D., Grigor'ev S. N. Metod kompleksnogo monitoringa gazovoj sredy` v processe selektivnogo lazernogo plavleniya // Izmeritel'naya texnika. 2025. T. 74. № 6. S. 23–31. DOI: 10.32446/0368-1025it.2025-6-23-31.
16. Yeung H. Toward Real-Time Feedback Control for Powder Bed Fusion Additive Manufacturing // Additive Manufacturing. 2025. Vol. 114. Art. 105041. DOI: 10.1016/j.addma.2025.105041.
17. Naumov I. I., Ibadov R. R., Merzlikina A. E. Opticheskij monitoring selektivnogo lazernogo plavleniya // Naukoemkie texnologii. 2026. T. 27. № 1. S. 29–37. DOI: 10.18127/j19998465-202601-03.
18. Zhao J., Xiao A., Chen Q., Zhang C., Zhang G., Zhao J., Dong F., Liu S. Layer-Wise Porosity Prediction in LPBF Process Using Optical Tomography and Deep Learning // Materials & Design. 2026. Vol. 264. Art. 115799. DOI: 10.1016/j.matdes.2026.115799.

Статья поступила в редакцию 24.06.2026; одобрена после рецензирования 19.08.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 24.06.2026; approved after reviewing 19.08.2026; accepted for publication 17.09.2026.