

УДК 004.032.26

## К созданию замкнутого контура в аддитивном производстве: управление процессом на основе онлайн - анализа порошка методами компьютерного зрения

Мартысюк Дмитрий Александрович

dmart9945@mail.ru

SPIN-код: 9674-3460

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Аннотация.** Рассмотрена концепция создания замкнутого контура управления в аддитивном производстве, на изменение ключевых параметров которого влияют результаты автоматизированного анализа морфологии порошков. Представлены результаты разработки и верификации метода, определяющие траекторию дальнейшего совершенствования системы для ее промышленного использования. Показаны направления развития интеллектуальных систем, основанных на компьютерном зрении и машинном обучении. Перечислены потенциальные возможности применения алгоритмов детекции и классификации частиц при контроле качества сырья и в режиме реального времени, нацеленные на повышение воспроизводимости свойств конечных изделий и ресурсоэффективности всего технологического цикла. Представлено видение архитектуры такой системы с учетом специфики производственных задач; сделано заключение о необходимости проведения систематических исследований для успешной имплементации решений, направленных на глубокую автономизацию процессов аддитивного производства.

**Ключевые слова:** селективное лазерное плавление (SLM), аддитивное производство, компьютерное зрение, замкнутый контур управления, адаптивное производство, машинное обучение (ML), автономная система

## Toward Closed - Loop Control in Additive Manufacturing: Process Optimization through Real - Time Powder Monitoring with Computer Vision

Martysyuk Dmitriy Aleksandrovich

dmart9945@mail.ru

SPIN-code: 9674-3460

BMSTU, Moscow, Russia

**Abstract.** This study explores the concept of establishing a closed-loop control system for additive manufacturing, where key process parameters are dynamically adjusted based on the automated morphological analysis of powder feedstocks. The findings from the development and validation of the proposed method outline a pathway for its further refinement and industrial implementation. The potential for advancing intelligent systems founded on computer vision and machine learning is demonstrated. The capabilities of particle detection and classification algorithms are highlighted for applications in raw material quality control and real-time process monitoring, aiming to enhance the reproducibility of final

product properties and the resource efficiency of the entire manufacturing cycle. A prospective architecture for such a system is presented, considering the specific constraints of production environments, leading to the conclusion that systematic research is essential for the successful implementation of solutions aimed at achieving full autonomy in additive manufacturing processes.

**Keywords:** Selective Laser Melting (SLM), computer vision, closed-loop control, adaptive manufacturing, machine learning, autonomous system

**Введение.** Обеспечение стабильного качества изделий остается ключевой проблемой для селективного лазерного плавления (SLM), ограничивающей его применение в ответственных отраслях [1]. Качество напрямую зависит от морфологии металлического порошка, которая влияет на сыпучесть и плотность упаковки, определяющие возникновение дефектов [2].

Существующие выборочные лабораторные методы не обеспечивают контроль в реальном времени. Перспективным решением является внедрение систем непрерывного мониторинга и адаптивного управления, которые на основе онлайн-анализа данных автоматически корректируют параметры процесса, такие как мощность лазера [2, 3].

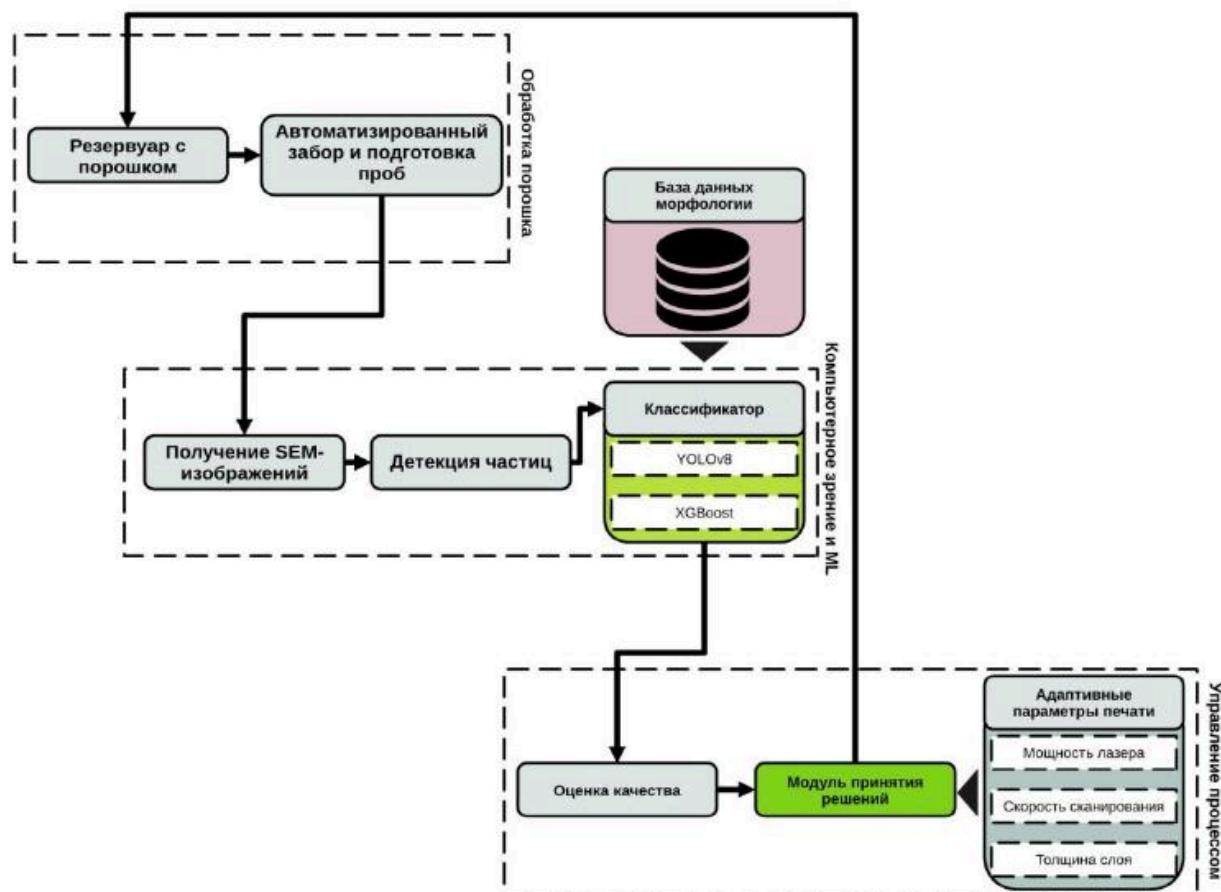
Для перехода к адаптивному управлению, являющемуся перспективным решением для SLM [3], критически важен анализ морфологии частиц в реальном времени.

**Материалы и методы.** Для реализации адаптивного управления в селективном лазерном плавлении необходимы методы анализа морфологии частиц в реальном времени. В исследовании апробирована методика автоматизированного анализа на стандартных порошках (316L, AlSi10Mg, Ti-6Al-4V) с использованием сканирующей электронной микроскопии и машинного обучения. Разработанный конвейер обработки включает сегментацию частиц и их классификацию методами традиционного машинного обучения и глубинного обучения. Оценка по стандартным метрикам подтвердила устойчивость алгоритмов, что демонстрирует потенциал методики для интеграции в системы адаптивного управления с автоматической корректировкой параметров процесса.

**Результаты.** Сравнительный анализ методов обработки SEM-изображений выявил преимущества преобразования Хафа для сегментации сферических частиц. При классификации морфологии ансамблевые методы и нейросетевая архитектура YOLOv8 показали высокую точность распознавания различных форм частиц с производительностью, достаточной для работы в квази-реальном времени. Анализ выявил характерные распределения морфологических классов для различных порошков: преобладание сферических форм у сталей, наличие брызг у алюминиевых сплавов и минимальное количество дефектов у титановых порошков. Предложенные алгоритмы демонстрируют точность и скорость, необходимые для интеграции в систему адаптивного управления процессами аддитивного производства.

**Обсуждение.** Предложенный подход на основе глубокого обучения (YOLOv8) демонстрирует высокую точность классификации морфологии по-

рошков со скоростью обработки, достаточной для интеграции в систему адаптивного управления. Архитектура системы (см. рисунок) позволяет использовать данные классификатора для автоматической коррекции параметров сплавления в реальном времени, что соответствует принципам построения интеллектуальных производственных систем с замкнутым контуром управления.



Структурная схема системы автоматического управления качеством порошка в аддитивном производстве

**Заключение.** Разработанная система анализа морфологии порошков позволяет в автоматическом режиме с высокой точностью и скоростью классифицировать частицы. Это открывает возможность создания замкнутого контура управления аддитивным производством, где параметры печати будут корректироваться в реальном времени на основе анализа порошка. Разработка таких систем является необходимой для перехода к полностью автоматизированному и стабильному производству высококачественных изделий.

*Работа выполнена в рамках программы государственной поддержки центров Национальной технологической инициативы на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций (Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества» при МГТУ им. Н.Э. Баумана).*

**Список источников**

- [1] Fang Q. et al. Process monitoring, diagnosis and control of additive manufacturing. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2022, vol. 21, no. 1, pp. 1041–1067.
- [2] Malashin I., Martisyuk D. Powder Particle Classification with Scanning Electron Microscopy Images Using Machine Learning Techniques. Expert Systems with Applications, 2025, vol. 286, art. no. 128001. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128001>
- [3] Мехр Э., Эллис Т., Нун Д. *Адаптивное управление процессами аддитивного производства в реальном масштабе времени с использованием машинного обучения*. Патент № 2722525 С1 РФ, МПК G06N 20/00, B29C 64/393, B33Y 50/02, заявитель и патентообладатель Релативити Спэйс, Инк., 2020.