

4. Козлов В.Н., Чжан Ц., Шэ Л. Напряженно-деформированное состояние режущей пластины при ее износе // Современные проблемы машиностроения: сборник трудов XV Международной научно-технической конференции. – Томск : Томский политехнический университет, 2022. – С. 123–125.

*Дин Цзэжу (Китай), Жуй Минхань (Китай), Козлов В.Н. (Россия),
Федоров В.В. (Россия), Донцов Ю.В. (Россия)*

Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: Клименов Василий Александрович, д.т.н., профессор

МОНИТОРИНГ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Аннотация: Проведен сравнительный анализ электронно-оптической и термографической визуализации для *in situ* мониторинга процессов PBF-EB и LPBF. Оцениваются их разрешающая способность, чувствительность к дефектам и интеграционный потенциал в системы замкнутого управления при аддитивном производстве металлов.

Ключевые слова: аддитивное производство, *in situ* мониторинг, электронно-оптическая визуализация, термография, замкнутый контур управления.

Введение

Аддитивное производство металлов (АМ) предоставляет неоспоримую свободу дизайна и возможности быстрого прототипирования, однако изменчивость процессов и формирование дефектов серьезно влияют на качество и надежность. В данной работе проводится критический анализ двух основных методов мониторинга процесса в реальном времени (*in situ*) – электронно-оптической визуализации (ELO) и термографической (инфракрасной и спектральной) визуализации, разработанных для обеспечения обратной связи во время процессов, таких как электронно-лучевое спекание порошкового слоя (PBF-EB) и лазерное спекание порошкового слоя (LPBF) (рис. 1).

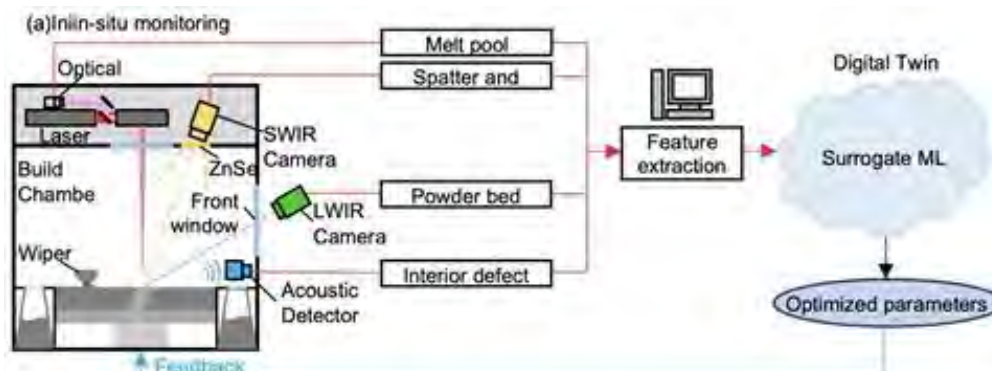


Рис. 1. Схема мониторинга и оперативного управления процесса лазерного сплавления порошкового слоя

Опираясь на детальные экспериментальные исследования, проведенные Арнольдом [1], А. Быковым и соавторами [2], Динвидди и соавторами [3], Олдаве и соавторами [4], а также Т. Лю [5] (см. рис. 1), авторы данной работы исследуют фундаментальные физические принципы, вопросы оснащения, алгоритмы обработки сигналов и методы валидации. В статье представлен сравнительный анализ с точки зрения пространственного / временного разрешения, чувствительности к образованию дефектов, требований к калибровке и потенциала интеграции для реализации замкнутого контроля. В заключение обсуждаются перспективные направления будущих исследований и промышленные последствия применения мульти-модальных систем мониторинга.

Основная часть

На рисунке 2 представлена схема установки для электронно-лучевой аддитивной печати, разработанной в Томском политехническом университете (ТПУ).



Рис. 2. Схематическое изображение конструкции установки для электронно-лучевой аддитивной печати ТПУ: а) внешний вид оборудования, б) рабочая камера для печати, в) место для технологического окна для монтажа системы видеорегистрации

Конструкция установки включает три ключевых функциональных модуля:

1. Корпус оборудования выполнен в виде герметичной камеры с двухконтурной системой безопасности и блокировкой, обеспечивающей радиационную защиту при работе с высокоэнергетическим электронным пучком (рис. 2, а).
2. Рабочая зона оснащена современной вакуумной системой с давлением до 10^{-3} Па и терморегулирующим комплексом, поддерживающим температурный режим в диапазоне от -50 до $+300$ °С, что соответствует требованиям к формированию аэрокосмических материалов на основе титановых сплавов (рис. 2, б).
3. Технологическое окно (рис. 2, в) интегрирует систему видеомониторинга с CCD-сенсором и инфракрасной подсветкой, обеспечивающей частоту съемки до 2000 кадров/с. Данная система позволяет проводить на месте (in situ) наблюдение за морфологией расплавленной зоны и оптимизировать технологические параметры на основе визуализированных данных.

Одна из основных трудностей, с которыми столкнулась команда ТПУ в текущих исследованиях, связана с конструктивными ограничениями вакуумной камеры, используемой в аддитивном производстве металлов (рис. 3, а). Камера изначально не была спроектирована для одновременного размещения системы процессного мониторинга и тепловизионной системы. В результате для захвата изображений процессная камера вынуждена использовать сложные системы подъемных зеркал (рис. 3, б).

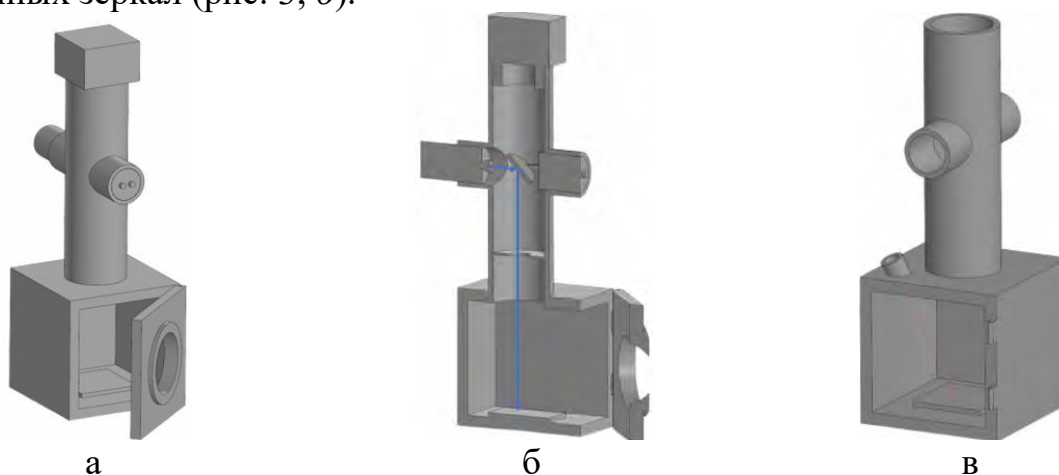


Рис. 3. Принципиальные схемы внешнего вида электронно-лучевого аддитивного принтера (а), оптического пути предлагаемой системы облучения электронным пучком (б) и расположение монтажного окна инфракрасной тепловизионной системы в корпусе принтера (в)

Эта конфигурация требует остановки облучения электронным пучком для получения кратковременных снимков, что исключает возможность получения четких, непрерывных изображений во время процесса печати, которые крити-

чески важны для детального анализа процесса и дальнейших исследований. Более того, проблема усугубляется отсутствием специального окна для тепловизионного наблюдения, расположенного аксиально по отношению к базовой платформе. Без такого окна невозможно напрямую установить тепловизионную систему для отслеживания температурных изменений базовой платформы в ходе процесса печати.

Для преодоления этих трудностей были рассмотрены два потенциальных решения. Первое предполагает размещение тепловизионной камеры снаружи свинцового стеклянного окна камеры. Однако этот подход вызывает дополнительные сложности, главным образом, риск получения неточных температурных данных из-за отражающих свойств свинцового стекла. Эта проблема требует разработки специальных алгоритмов калибровки для коррекции ошибок, вызванных отражением.

Альтернативное решение предусматривает установку тепловизионной камеры внутри самой вакуумной камеры. Хотя такое расположение может обеспечить более точные температурные измерения, устраняя влияние свинцового стекла, оно создает значительные практические сложности: крайне ограниченное пространство внутри камеры и высокие температуры во время печати могут негативно сказаться на работе и долговечности камеры. В связи с этим установка специального окна для монтажа тепловизионного оборудования на корпусе печатной камеры становится оптимальным решением (см. рис. 3, в).

Заключение

Необходимость обеспечения мониторинга процесса при существующей конструкции оборудования требует принятия инновационных решений, способных согласовать ограничения существующей вакуумной камеры с требованиями к высокоточной визуализации в реальном времени в аддитивном производстве металлов.

Список литературы

1. Arnold C. Fundamental Investigation of Electron-Optical Process Monitoring in Electron Beam Powder Bed Fusion (Doctoral Dissertation). – Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2023. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://open.fau.de/items/7f6d580e-48d1-45f2-a88c-451271d0b540/full> (дата обращения: 12.05.2025).
2. Bykov A., Khokhlov D., Polyakov M. Spectral Thermography Techniques for Melt Pool Thermal Imaging in Electron Beam Additive Manufacturing, 2024.
3. Dinwiddie R. B., Dehoff R. R., Lloyd, P., Lowe L. E. Thermographic In-Situ Process Monitoring of the Electron-Beam Melting Technology Used in Additive Manufacturing // Proceedings of SPIE. – 2013. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings->

- of-spie/8705/1/Thermographic-in-situ-process-monitoring-of-the-electron-beam-melting/10.1117/12.2018412.short (дата обращения: 12.05.2025).
4. Aldave I.J., Venegas Bosom P., Vega González L., López de Santiago I., Vollheim B., Krausz L., Georges M. Review of Thermal Imaging Systems in Composite Defect Detection // Infrared Physics & Technology. – 2013. – № 61. – P. 167–175.
 5. Liu T. In Situ Infrared Thermographic Inspection in Additive Manufacturing (Doctoral Dissertation). – Missouri University of Science and Technology, 2024. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://scholarsmine.mst.edu/doctoral_dissertations/3345 (дата обращения: 12.05.2025).

*Дин Цзэжу (Китай), Цао Сяокай (Китай), Ли Вэйхан (Китай),
Ди Чэнь (Китай), Козлов Виктор Николаевич (Россия)*

Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: Козлов Виктор Николаевич, к.т.н., доцент ОМШ ИШНПТ НИ ТПУ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ СИЛЫ РЕЗАНИЯ НА ГЛАВНОЙ РЕЖУЩЕЙ КРОМКЕ КОНЦЕВОЙ ФРЕЗЫ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ СТАЛИ 40X13

Аннотация: В работе представлена методика определения удельной силы резания на разных участках главной режущей кромки концевой фрезы. Представлены схемы и уравнения для расчета удельной силы резания на разных участках главной режущей кромки концевой фрезы на основе технологических составляющих силы резания, измеренных с помощью динамометра Kistler, и геометрических параметров фрезы, приведен пример расчета при фрезеровании стали 40X13 цельной концевой твердосплавной фрезой диаметром 8 мм.

Ключевые слова: удельная сила резания, фрезерование концевой фрезой, силы на участках режущей кромки фрезы, сталь 40X13, динамометр Kistler.

Введение

Для уменьшения вероятности поломки дорогой твердосплавной концевой фрезы при фрезеровании заготовок из стали 40X13, полученных по аддитивной технологии и поэтому имеющих высокую твердость, необходимо использовать рациональные режимы фрезерования, которые можно определить, зная напряженно-деформированное состояние (НДС) режущей части. Для расчета НДС необходимо знать не только величину технологических сил при фрезеровании Ph , Pv , Px , но и распределение контактных напряжений на передней и задней поверхностях зуба фрезы [1, 2]. Экспериментальное исследование их распре-