

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ГОТОВНОСТИ СЕНСОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МОНИТОРИНГА 3-D ПЕЧАТИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Будкин Ю.В., д-р техн. наук, ФГБУ «Институт стандартизации», профессор РУТ (МИИТ)

В статье представлены результаты исследований современных технологий мониторинга аддитивного производства и варианты использования сенсорных элементов информационных систем для мониторинга 3D-печати аддитивного производства (ISM). Определены функциональные характеристики одиннадцати сенсорных элементов информационных систем. Сенсорные элементы информационных систем успешно используются для обнаружения дефектов, но системы обработки данных и анализа данных требуют дальнейшего развития, чтобы усовершенствовать технологию 3-D печати в целом и добиться широкого внедрения в промышленности. Установлены основные технические пробелы, ограничивающие полное внедрение ISM для квалификации АМ. К ним относятся: установление причинно-следственной связи между сигналами датчиков и фактическими дефектами; ограниченная доступность базовых наборов данных; отсутствие стандартных образцов.

Определены области ISM, наиболее подготовленные для промышленного использования: мониторинг состояния установки (состояние системы); мониторинг верхнего слоя порошка; мониторинг искажения геометрии детали. Разработана методика технологической готовности сенсорных элементов информационных систем для мониторинга 3-D печати аддитивного производства, содержащая девять уровней. На основе методики разработан прогноз развития сенсорных технологий на период до 2025 года.

Ключевые слова: информационные системы и процессы, машиностроение, стандарт, мониторинг, аддитивное производство.

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг 3-D печати (in situ monitoring – ISM) является технологическим дополнением к системам аддитивного производства (АП), таким как установка для 3D-печати вспомогательного оборудования, используемого для АП. Мониторинг 3-D печати разработан для управления процессами обнаружения дефектов, корректировки параметров 3-D печати и обеспечения качества изделия аддитивного производства [1]. Известно три основных способа ISM: мониторинг состояния машины (мониторинг состояния системы); мониторинг процесса плавления и мониторинг наплавленного материала. Особенно технологические зрелые способы использования мониторинга содержат замкнутый цикл управления процессами АП и обнаружение дефектов на стадии печати изделия.

Мониторинг состояния установки АП для лазерного синтеза на подложке включает мониторинг рабочей атмосферы, уровня сырья, фокусировки и (или) мощности лазера [2] и представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общая схема мониторинга процесса АП, в котором поверхность предварительно нанесенного слоя порошкового материала выборочно, полностью или частично расплавляется тепловой энергией лазерной установки

Недостатком предложенного мониторинга является отсутствие причинно-следственной связи между сигналами датчиков информационной системы и фактическими дефектами изделия АП; ограниченная доступность базовых наборов данных; отсутствие стандартных образцов. Хотя статус ISM для мониторинга состояния машин АП (мониторинга состояния системы) хорошо развит, обнаружение конкретных дефектов требует значительных улучшений. Сенсорные элементы информационных систем успешно используются для обнаружения дефектов, но системы обработки данных и анализа данных требуют дальнейшего развития, чтобы усовершенствовать технологию 3-D печати в целом и добиться широкого внедрения в промышленности.

Мониторинг 3-D печати обычно используется для контроля стабильности процесса или геометрической точности конструкции [1]. Прежде чем обсуждать сенсорные технологии, важно определить характеристики элементов информационных систем, применяемых сегодня для ISM.

ИССЛЕДОВАНИЕ

Для исследования технологической готовности сенсорных элементов информационных систем выбран процесс синтеза на подложке, в котором энергия от лазера используется для избирательного спекания/сплавания предварительно нанесенного слоя порошкового материала.

1. Оптическая визуализация

Оптическое изображение процессов АМ обычно достигается с помощью известных технологий цифровых камер, таких как устройство с зарядовой связью (CCD, все сигналы пикселей обрабатываются одним чипом) или комплементарный металл-оксид-полупроводник (CMOS, каждый пиксель имеет свой собственный чип обработки), что повышает скорость, но увеличивает сложность и может снизить разрешение захвата. Оба упоминались в различных исследованиях, но ни в одном из них не было указано предпочтение одного перед другим [3]. Существующие реализации имеют широкий диапазон сложности: от однокамерной визуализации после каждого слоя [4] до многокамерной с высокой частотой кадров для наблюдения за ванной расплава.

2. Фотоэлектрические пирометры и тепловидение

Бесконтактные термометры используют инфракрасный свет для определения температуры в одной точке путем сравнения реакции отфильтрованного света со стандартом. Оптические пирометры используют оптическую систему (например, линзы, зеркала, фильтры и т. д.) для фокусировки испускаемого излучения на детектор, который реагирует сигналом напряжения или тока. Сигнал пропорционален излучаемой энергии и температуре в пределах

определенного рабочего диапазона, но зависит от излучательной способности измеряемого материала [3].

3. Спектрометр

Набор фотодетекторов используют для измерения количества фотонов, попадающих на датчики, в диапазоне длин волн. Эта расширенная возможность может быть использована для определения температуры ванны расплава, состава материала и окружающей атмосферы. В результате обнаруживаемые дефекты могут включать пористость (в зависимости от температуры), загрязнение (спектры излучения атмосферы и материала) и отсутствие плавления (температура).

В зависимости от количества каналов (длин волн) и частоты захвата (большинство исследовательских систем способны работать на частоте более 1000 Гц) эти датчики могут выдавать большие объемы данных, обработка которых может потребовать значительных затрат. Для решения этой проблемы важен выбор соответствующих длин волн для анализа и соответствующих скоростей захвата на основе параметров процесса. Соответствующие длины волн могут быть выбраны на основе того, насколько сильно они коррелируют с изменениями процесса или возникновением дефектов [5].

4. Термопары

Большинство исследований было сосредоточено на пирометрах для мониторинга температуры на месте, поскольку контакт, необходимый для термопар, значительно ограничивает их способность контролировать осаждаемый материал. Термопары чаще используются для контроля компонентов системы (например, рабочего стола, сопла для подачи сырья), чем для контроля сборных деталей.

Термопары могут обеспечивать очень точные измерения температуры в пределах определенного рабочего диапазона, и существует множество типов термопар, позволяющих выбрать подходящее рабочее окно (путем изменения двух материалов, используемых в проводах) [3].

5. Датчики перемещения/профилометры

В плавлении порошкового слоя лазерным лучом интерферометрия использовалась для мониторинга топологии порошкового слоя с целью выявления проблем с качеством повторного покрытия, которые были связаны с качеством изготовленной детали [6].

Потенциальные недостатки включают загрязнение оптики (из-за требуемой близости), высокую скорость передачи данных и требуемую направленность перемещения оболочки (в случае профилометра, монтируемого на головке оболочки).

6. Ультразвуковой датчик

Ультразвуковые системы обычно используют пьезоэлектрические передатчики и датчики для измерения отражений ультразвуковых колебаний (обычно 1–10 МГц) для исследования структурных свойств и свойств материалов. Ультразвуковой неразрушающий контроль зависит от шума внешних вибраций, сложности геометрии детали, большого количества дефектов и адекватного контакта между преобразователем и деталью. Ультразвуковые системы обладают высокой скоростью генерации данных и могут регистрировать ультразвуковые сигналы с временным разрешением до 4 нс [7].

7. Электромагнитный датчик

Метод электромагнитных испытаний применяют для неразрушающего контроля проводящих материалов. Датчик обнаруживает изменения импеданса катушки датчика, чтобы сделать вывод о наличии дефектов в испытуемом изделии.

8. Акселерометр

Акселерометры обычно представляют собой пьезоэлектрические материалы, предназначенные для обнаружения изменений ускорения на основе индуцированного напряжения. Они были интегрированы в системы плавления порошкового слоя лазерным лучом для контроля стабильности системы во время обработки [8].

9. Акустические сигналы

Общая акустика процесса меняется при настройке параметров, что позволяет использовать датчик для обнаружения неожиданных ухудшений процесса. Например, в дуговых процессах АД режим переноса металла можно идентифицировать и охарактеризовать с помощью акустических сигналов [9].

10. Рентгенография

Было продемонстрировано, что методы рентгенографии и дифракции с временным разрешением предоставляют количественную структурную информацию о размере/форме ванны расплава, выбросе порошка, затвердевании и фазовых превращениях LSM [10]. Однако в настоящее время они не имеют сложность в применении из-за ограничений стоимости, безопасности и размеров в большинстве производственных сред.

11. Нейтронная дифракция

Нейтронная дифракция может неразрушающим образом определить остаточные деформации и напряжения для системы плавления порошкового слоя лазерным лучом. По сравнению с рентгеновскими лучами нейтроны имеют

большую глубину проникновения (рассеяние рентгеновских лучей происходит в пределах нескольких микрометров или миллиметров, тогда как нейтроны могут проникать на глубину до нескольких сантиметров). Нейтронные рентгенограммы производятся с помощью сцинтиллятора $^6\text{LiF/ZnS}$, преобразующего нейтроны в свет, который затем может быть обнаружен прибором с зарядовой связью [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе проведенных исследований разработана методика определения технологической готовности сенсорных элементов информационных систем для мониторинга 3-D печати аддитивного производства. Методика содержит девять уровней готовности сенсорной технологии (табл. 1), разделенных на три блока разработки и промышленного внедрения.

Таблица 1

Определение готовности сенсорных элементов информационной системы

1	Формирование основных принципов работы датчика	Научное исследование
2	Разработка технических задач применения датчика	Технологическая отработка
3	Проверка сигналов датчика в лабораторных условиях	
4	Проверка работоспособности датчика в 3-D печати, в лабораторных условиях	
5	Интеграция датчика в информационную систему АМ	
6	Датчик работает с анализом сигнала в информационной среде, использован при сертификации деталей или процесса	
7	Информационная среда позволяет обнаруживать дефекты трехмерной печати	
8	Информационная среда управляет процессом качества трехмерной печати	Промышленное внедрение
9	Датчик сертифицирован и применен в информационной среде мониторинга 3-D печати в промышленном производстве	

Основное число уровней готовности относится к технологической отработке изделия, что обусловлено количественной оценкой с помощью системы показателей:

¹ Сцинтилляторы — вещества, проявляющие сцинтилляцию, то есть излучающие свет при поглощении ионизирующего излучения (гамма-квантов, электронов, альфа-частиц и т.д.).

- базовые (исходные) значения показателей технологичности, являющиеся предельными нормативами технологичности, обязательными для выполнения при разработке изделия;
- значения показателей технологичности, достигнутые при разработке изделия;
- показатели уровня технологичности конструкции разрабатываемого изделия.

Базовые значения показателей технологичности указываются в техническом задании на разработку изделия, а по отдельным видам изделий, номенклатура которых устанавливается отраслями, – в стандартах организации.

Данные об уровне технологичности конструкции и уровне готовности сенсорной технологии должны использоваться в процессе оптимизации конструктивных решений на стадиях разработки конструкторской документации, при принятии решения о производстве изделия, анализе технологической подготовки производства, разработке мероприятий по повышению уровня технологичности конструкции изделия и эффективности его производства и эксплуатации, при государственной, отраслевой и заводской аттестации качества изделия и определении технико-экономических показателей производства, эксплуатации и ремонта изделия в порядке, установленном отраслевой нормативно-технической документацией.

На основе методики ранжированы сенсорные технологии по состоянию на 2022 год, так и на пятилетнюю перспективу (рис. 3).



Рис. 3. Уровни технологической готовности сенсорных элементов информационных систем для мониторинга 3-D печати аддитивного производства по состоянию на 2022 год (темно-синий) и прогноз на 2025 год (голубой)

Хотя такие датчики, как термопары и акселерометры, широко доступны и обычно используются в системах АМ, они обычно обеспечивают обнаружение основных проблем процесса спекания или поверхности построения, что позволяет оператору своевременно скорректировать параметры трехмерной печати. Качество данных, как правило, недостаточно для обнаружения дефектов или нестабильности процесса, необходимые для обнаружения конкретных дефектов или контроля на месте.

Акустические микрофоны также недороги и легко доступны, но обычно не используются в основных коммерческих комплексах датчиков аддитивного оборудования или сторонних производителей. Микрофоны изучались для обеспечения безопасности при аддитивном производстве в течение многих десятилетий, но не получили существенного распространения в промышленном масштабе из-за проблем с качеством данных, возникающих из-за внешних шумовых помех, высокого риска ложных срабатываний и невозможности масштабирования в области построения.

Датчики, основанные на обнаружении фотонов (оптические, тепловые и спектрометрические), в настоящее время являются наиболее распространенными современными инструментами ISM. Оптическая визуализация в настоящее время является наиболее распространенной и, вероятно, останется таковой. Камеры видимого спектра света (VIS) и освещение для оптической топографии в части обнаружения проблем с устройством повторного нанесения покрытия и положением детали значительно усовершенствовались и интегрированы в информационные системы. Подобные NIR-камеры ближнего инфракрасного диапазона, которые наблюдают и интегрируют тепловое излучение ванны расплава для обнаружения горячих точек или брызг, вероятно, будут интегрированы в большинство систем в ближайшие несколько лет. Мониторинг ванны расплава по оси с помощью NIR-камер и фотодиодов легко доступен, но объем генерируемых данных требует высоких затрат на обработку и хранение. Спектрометры предлагают более широкий диапазон длин волн и, как правило, более высокую чувствительность, но имеют значительно более высокую стоимость и генерируют еще больше данных. Скорее всего, они останутся в качестве исследовательских инструментов для определения длин волн, которые можно контролировать с помощью фотодиодов или камер, а не для промышленного внедрения.

Датчики перемещения являются необходимым инструментом для большинства технологий 3-D печати, они широко доступны и применяются для контроля зазорного расстояния в сборке, но, как правило, не предоставляют информации, ценной для квалификации деталей.

Инструменты ультразвукового и вихретокового контроля имеют больший потенциал, чем другие методы для обна-

ружения конкретных дефектов и могут обеспечить сертификацию деталей.

Лазерная термография имеет аналогичный потенциал, но менее исследована в литературе по АП. Однако повышенная шероховатость поверхности деталей при лазерном спекании порошка по сравнению с электронно-лучевым спеканием может ограничивать применение лазерной термографии.

Несмотря на полезный потенциал информационных систем мониторинга 3-D печати, существует множество проблем при внедрении ISM для квалификации АП, которые были выявлены в результате этого анализа.

Вихретоковое тестирование на ISM предполагает прикрепление датчиков к дозирующему устройству для поверхности построения. Демонстрация этой технологии была проведена и запатентована, но необходимы дополнительные технические разработки и доработка, прежде чем ее можно будет полностью использовать в производственной среде [10].

Рентгеновская и нейтронная дифракция как методы поперечного объемного контроля в настоящее время являются исследовательскими инструментами и вряд ли станут коммерческими инструментами ISM. Однако исследования по обнаружению мониторинга вторичных электронов или обратно рассеянных электронов, часто называемых электронно-оптическими и взаимодействиями материалов, в настоящее время представляют интерес для мониторинга процессов как в технологиях электронно-лучевого спекания [12]. Вполне вероятно, что в ближайшие несколько лет эти системы будут более широко внедряться с ограниченными возможностями и более высоким потенциалом в течение более длительного периода времени.

Методика определения технологической готовности сенсорных элементов информационных систем для мониторинга 3-D печати аддитивного производства позволила определить области ISM наименее зрелыми, но имеющими наибольший потенциал для перспективного использования:

1. Анализ и интерпретация данных.
2. Методы вероятностного анализа.
3. Имитационное моделирование в масштабе ванны расплава.

Используя потенциал сенсорных технологий в ISM, пользователи должны иметь возможность достоверно моделировать создание дефектов, тем самым вызывая необходимость в формировании, хранении и обмене данными о стандартных образцах.

Как только сообщество достигнет консенсуса по стандартным образцам и процессам АП, чтобы обеспечить понимание возможностей обнаружения и доказанную причинную корреляцию между сенсорными системами, машинами, материалами и т. д., пользователи смогут быть уверены в применении технологии ISM для обнаружения дефектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы основные сенсорные элементы информационных систем для мониторинга 3-D печати аддитивного производства. Установлены основные технические пробелы, ограничивающие полное внедрение ISM для квалификации АМ. К ним относятся: установление причинно-следственной связи между сигналами датчиков и фактическими дефектами; ограниченная доступность базовых наборов данных; отсутствие стандартных образцов.

Определены области ISM, наиболее подготовленные для промышленного использования: мониторинг состояния машины; мониторинг верхнего слоя порошка; мониторинг искажения геометрии детали.

Разработана методика определения технологической готовности сенсорных элементов информационных систем для мониторинга 3-D печати аддитивного производства. Определены области ISM наименее технологически готовые, но имеющие наибольший потенциал для перспективного использования: анализ и интерпретация данных; методы вероятностного анализа; имитационное моделирование в масштабе ванны расплава.

Список использованных источников и литературы

1. Будкин Ю.В., Соколов Ю.А., Фролов В.А. Алгоритмы искусственного интеллекта в естественных и искусственных источниках излучения. Часть 2. Излучение высококонцентрированными источниками нагрева // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2022. № 5 (69). С. 27–34.
2. Фролов В.А., Князев А.В., Будкин Ю.В., Анисимов Н.Р., Федоров С.А. Алгоритмы искусственного интеллекта в естественных и искусственных источниках излучения. Часть 3. Лазерное излучение // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2022. № 6 (70). С. 42–48
3. Tapia G. and Elwany, A. A Review on Process Monitoring and Control in MetalBased Additive Manufacturing // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2014. – Т. 136. – No. 6. – P. 060801.

4. Straub J. Initial Work on the Characterization of Additive Manufacturing (3D Printing) using software image analysis // *Machines*. – 2015. – Т. 3. – No. 2. – Pp. 55–71.
5. Пат. 8723078 США, МКИЗ В 23К31/125. Контроль качества сварочных швов / J. Mazumder; S.H. Lee. – No. US12/623 249; Заявлено 20.11.2009; Опубл. 14.05.2014.
6. Neef A. et al. Low coherence interferometry in selective laser melting // *Physics Procedia*. – 2014. – Т. 56. – Pp. 82–89.
7. Rieder H. et al. Online monitoring of additive manufacturing processes using ultrasound // *Proceedings of the 11th European Conference on Non-destructive testing*. – 2014. – Т. 1. – Pp. 2194–2201.
8. Guo J. et al. An in-situ monitoring system for electron beam wire-feed additive manufacturing // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2020. – Т. 307. – P. 111983.
9. Additive Manufacturing–Nondestructive Testing–Intentionally Seeding Flaws in Metallic Parts // ASTM International, 2022. – <https://www.astm.org/iso-2fastmtr52906-eb.html> (дата обращения 21.12.2023).
10. Todorov E., Boulware P., Gaah K. Demonstration of array eddy current technology for real-time monitoring of laser powder bed fusion additive manufacturing process // *Nondestructive characterization and monitoring of advanced materials, aerospace, civil infrastructure, and transportation XII*. – SPIE, 2018. – Т. 10599. – Pp. 190–201.
11. Бушамба, Л. Моделирование и применение детектора на основе тонкого сцинтиллятора $ZnS(Ag)+6LiF$ для регистрации тепловых нейтронов природного и искусственного происхождения : специальность 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц» : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. 2021. – 122 с.
12. Fu Z., Körner C. Actual state-of-the-art of electron beam powder bed fusion // *European Journal of Materials*. 2022. Т. 2. No. 1. Pp. 54–116.

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE TECHNOLOGICAL READINESS OF SENSOR ELEMENTS OF INFORMATION SYSTEMS FOR MONITORING 3-D PRINTING OF ADDITIVE MANUFACTURING

Budkin Yu.V., Doctor of Engineering Sciences, Russian Standardization Institute, Professor of RUT (MIIT)

The article presents the results of research into modern technologies for monitoring additive manufacturing and options for using sensor elements of information systems for monitoring 3D printing of additive manufacturing (ISM). The functional characteristics of eleven sensor elements of information systems are determined. Sensory elements of information systems have been successfully used to detect defects, but data processing and data analysis systems require further development to improve 3-D printing technology as a whole and achieve widespread industrial adoption. Key technical gaps limiting the full implementation of ISM for AM qualification have been identified. These include: establishing a cause-and-effect relationship between sensor signals and actual defects; limited availability of underlying data sets; lack of standard samples.

The areas of ISM most prepared for industrial use have been identified: monitoring the state of the installation (system state); monitoring of the top layer of powder; monitoring of part geometry distortion. A methodology has been developed for the technological readiness of sensor elements of information systems for monitoring 3-D printing of additive manufacturing, containing nine levels. Based on the methodology, a forecast for the development of sensor technologies for the period up to 2025 has been developed.

Keywords: information systems and processes, mechanical engineering, standard, monitoring, additive manufacturing.

References

1. Budkin Yu.V., Sokolov Yu.A., Frolov V.A. Artificial intelligence algorithms in natural and artificial radiation sources. Part 2. Radiation from highly concentrated heating sources // Information and economic aspects of standardization and technical regulation. 2022. No. 5 (69). Pp. 27–34.
2. Frolov V.A., Knyazev A.V., Budkin Yu.V., Anisimov N.R., Fedorov S.A. Artificial intelligence algorithms in natural and artificial radiation sources. Part 3. Laser radiation // Information and economic aspects of standardization and technical regulation. 2022. No. 6 (70). Pp. 42–48
3. Tapia G. and Elwany, A. A Review on Process Monitoring and Control in MetalBased Additive Manufacturing // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2014. – Т. 136. – No. 6. – P. 060801.
4. Straub J. Initial Work on the Characterization of Additive Manufacturing (3D Printing) using software image analysis // Machines. – 2015. – Т. 3. – No. 2. – Pp. 55–71.
5. Пат. 8723078 США, МКИ3 В 23К31/125. Контроль качества сварочных швов / J. Mazumder; S.H. Lee. – No. US12/623 249; Заявлено 20.11.2009; Опубл. 14.05.2014.
6. Neef A. et al. Low coherence interferometry in selective laser melting // Physics Procedia. – 2014. – Т. 56. – Pp. 82–89.
7. Rieder H. et al. Online monitoring of additive manufacturing processes using ultrasound // Proceedings of the 11th European Conference on Non-destructive testing. – 2014. – Т. 1. – Pp. 2194–2201.
8. Guo J. et al. An in-situ monitoring system for electron beam wire-feed additive manufacturing // Sensors and Actuators A: Physical. – 2020. – Т. 307. – P. 111983.
9. Additive Manufacturing–Nondestructive Testing–Intentionally Seeding Flaws in Metallic Parts // ASTM International, 2022. – <https://www.astm.org/iso-2fastmtr52906-eb.html> (accessed 21.12.2023).

10. Todorov E., Boulware P., Gaah K. Demonstration of array eddy current technology for real-time monitoring of laser powder bed fusion additive manufacturing process // Nondestructive characterization and monitoring of advanced materials, aerospace, civil infrastructure, and transportation XII. – SPIE, 2018. – Т. 10599. – Pp. 190–201.
11. Bushama L. Modeling and application of a detector based on a thin ZnS(Ag)+6LiF scintillator for recording thermal neutrons of natural and artificial origin : MEPH. 2021. – 122 p.
12. Fu Z., Körner C. Actual state-of-the-art of electron beam powder bed fusion // European Journal of Materials. 2022. Т. 2. No. 1. Pp. 54–116.