

Солонченко М.Е.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация

ИНТЕГРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО СКАНИРОВАНИЯ, УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Аннотация. В статье рассматривается интеграция рентгеновского сканирования, ультразвукового контроля и измерительных датчиков для повышения эффективности входного контроля в машиностроении. Комплексное применение этих методов позволяет выявлять внутренние дефекты (трещины, пустоты) и оценивать точность размеров компонентов на этапе поставки сырья. Рентгеновские технологии обеспечивают высоко детализированный анализ структуры материалов, ультразвуковой контроль с фазированной решёткой (PAUT) улучшает локализацию подповерхностных дефектов, а современные датчики (лазерные сканеры, КИМ) гарантируют соответствие допускам. Интеграция данных технологий сокращает время проверки, минимизирует отходы и повышает надёжность производства. Рассмотрены преимущества автоматизации, аналитики на основе ИИ и проблемы внедрения, включая управление большими данными и высокие первоначальные затраты.

Ключевые слова. Рентгеновское сканирование, ультразвуковой контроль, измерительные датчики, входной контроль, неразрушающий контроль (нк), обнаружение дефектов, точность размеров, автоматизация, интегрированные системы контроля, машиностроение.

Solonchenko M.E.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation

INTEGRATION OF X-RAY SCANNING, ULTRASONIC TESTING, AND MEASUREMENT SENSORS TO ENHANCE THE EFFICIENCY OF INCOMING INSPECTION IN MECHANICAL ENGINEERING

Abstract. The article explores the integration of X-ray scanning, ultrasonic testing, and precision measurement sensors to enhance incoming inspection in mechanical engineering. The combined use of these methods enables the detection of internal defects (cracks, voids) and dimensional accuracy assessment of components at the raw material supply stage. X-ray technologies provide high-resolution analysis of material structures, phased array ultrasonic testing (PAUT) improves the localization of subsurface defects, and advanced sensors (laser scanners, CMMs) ensure compliance with design tolerances. The integration of these technologies reduces inspection time, minimizes waste, and increases production reliability. The advantages of automation, AI-driven analytics, and implementation challenges, including big data management and high initial costs, are discussed. The results demonstrate that a combined approach to incoming inspection ensures compliance with quality standards and optimizes manufacturing processes.

Keywords. X-ray scanning, Ultrasonic testing, Measurement sensors, Incoming inspection, Non-destructive testing (NDT), Defect detection, Dimensional accuracy, Automation, Integrated inspection systems, Mechanical engineering.

Введение

В современной обрабатывающей промышленности обеспечение качества и надёжности компонентов имеет решающее значение для поддержания высоких стандартов производительности. В этой статье рассматривается интеграция рентгеновского сканирования, ультразвукового контроля и измерительных датчиков для повышения эффективности входного контроля в машиностроении. Объединяя эти передовые методы неразрушающего контроля (НК) с технологиями точных измерений, производители могут улучшить обнаружение дефектов, сократить отходы и оптимизировать производственные процессы [4].

Цель исследования — разработка и апробация интегрированного подхода, сочетающего рентгеновское сканирование, ультразвуковой контроль и измерительные датчики, для повышения эффективности входного контроля в машиностроении путем

комплексного обнаружения дефектов и контроля размеров компонентов. Данный подход направлен на сокращение времени проверки, минимизацию отходов и повышение надежности производства.

Входной контроль играет важную роль в машиностроении, гарантируя, что сырье и компоненты соответствуют строгим стандартам качества перед поступлением в производственный процесс [6]. Традиционные методы контроля качества часто полагаются на визуальный осмотр и испытание образцов, чего может быть недостаточно для обнаружения внутренних дефектов или изменений свойств материала. Интеграция рентгеновского сканирования, ультразвукового контроля и передовых измерительных датчиков обеспечивает комплексное решение для точного и эффективного контроля [2,7].

Целью исследования является разработка и апробация комплексного подхода к входному контролю в машиностроении с использованием рентгеновского сканирования, ультразвукового контроля и измерительных датчиков. Для контроля используются: рентгеновский томограф YXLON FF35 CT, обеспечивающий высокодетальный анализ внутренней структуры материалов, система ультразвукового контроля с фазированной решеткой Olympus OmniScan X3 для точной локализации подповерхностных дефектов, а также координатно-измерительная машина Zeiss Contura и лазерный сканер Faro Edge ScanArm для высокоточного измерения размеров.

Объектами исследования являются стандартные образцы стали и алюминия с искусственно введенными дефектами (трещины, пустоты, включения), а также реальные промышленные детали, включая литые детали и сварные соединения. Рентгеновское сканирование позволяет получать трехмерные изображения внутренней структуры образцов с разрешением до 5 мкм, ультразвуковой контроль выявляет подповерхностные дефекты на глубине до 50 мм, измерение размеров обеспечивает точность до 0,01 мм для проверки соответствия проектным допускам.

Интеграция методов осуществляется посредством единой цифровой платформы на базе программного обеспечения LabVIEW и MATLAB, которая синхронизирует данные из различных источников. Автоматизированная система управления данными, включающая алгоритмы искусственного интеллекта на основе нейронных сетей, анализирует изображения и сигналы для классификации дефектов и оценки размерных отклонений. Интеграция реализуется посредством стандартизированного интерфейса API, обеспечивающего совместимость аппаратных и программных средств.

Результаты исследования анализируются путем сравнения точности обнаружения дефектов и размерного измерения отдельными методами и их комбинацией, а также оценки времени контроля и объема производственных отходов. Такой подход позволяет обосновать эффективность предлагаемой комплексной системы контроля качества.

Виды контроля

Рентгеновское сканирование — это мощный метод НК, позволяющий обнаруживать внутренние дефекты, такие как трещины, пустоты, включения и пористость [3]. Основные преимущества включают:

- **Неразрушающий анализ:** позволяет проводить осмотр без изменения или повреждения компонента.
- **Высокое разрешение изображений:** обеспечивает детальное понимание внутренней структуры материалов [1].
- **Потенциал автоматизации:** может быть интегрирован с обнаружением дефектов на основе ИИ для анализа в реальном времени [5].
- **Рентгеновское сканирование** особенно полезно для осмотра сложных узлов, сварных соединений и литых компонентов, где скрытые дефекты могут поставить под угрозу производительность.

Ультразвуковой контроль (УТ) является еще одним важным методом неразрушающего контроля, который использует высокочастотные звуковые волны для обнаружения подповерхностных дефектов [8]. Основные преимущества включают:

Глубина проникновения: позволяет выявлять дефекты глубоко внутри материала.

Универсальность: применимо к широкому спектру материалов, включая металлы, композиты и полимеры.

Оценка в реальном времени: обеспечивает немедленную обратную связь по целостности материала.

Внедряя методы фазированной ультразвуковой решётки, производители могут улучшить локализацию дефектов и повысить точность обнаружения в сложных геометриях.

Помимо обнаружения дефектов, обеспечение точной точности размеров имеет важное значение в машиностроении [5]. Современные измерительные датчики, такие как лазерные сканеры, координатно-измерительные машины (КИМ) и оптические датчики, способствуют:

- Высокоточной проверке размеров: обеспечению соответствия допускам конструкции.
- Автоматизированным процессам инспекции: сокращению человеческих ошибок и повышению согласованности.
- Мониторингу в реальном времени: включению адаптивных стратегий контроля качества.

В сочетании с методами неразрушающего контроля измерительные датчики обеспечивают комплексный подход к контролю качества, который повышает надёжность входящих материалов и компонентов.

Интеграция рентгеновского сканирования, ультразвукового контроля и измерительных датчиков обеспечивает несколько ключевых преимуществ:

Комплексное обнаружение дефектов: идентифицирует как внутренние, так и поверхностные дефекты с высокой точностью.

Повышенная эффективность: сокращает время инспекции и устраняет необходимость в разрушающем контроле.

Улучшенный контроль: цифровые записи данных инспекций поддерживают соответствие требованиям и контроль качества.

Сокращение производственных затрат: минимизирует отходы и доработку за счет раннего обнаружения дефектов в цепочке поставок.

Хотя интегрированные системы инспекции обеспечивают значительные преимущества, проблемы включают:

Первоначальные инвестиционные затраты: высококачественное оборудование и автоматизация требуют значительного капитала.

Сложности управления данными: обработка больших объемов данных инспекций требует передовых решений по обработке и хранению.

Интеграция с существующими рабочими процессами: требует тщательного планирования для соответствия текущим производственным процессам.

Преодоление этих проблем включает использование интеллектуальной автоматизации, аналитики на основе ИИ и индивидуальных стратегий интеграции, адаптированных к конкретным производственным потребностям.

Заключение

Интеграция рентгеновского сканирования, ультразвукового контроля и измерительных датчиков значительно повышает эффективность входного контроля в машиностроении. Используя передовые методы неразрушающего контроля наряду с технологиями точных измерений, производители могут обеспечить превосходный контроль качества, сократить количество дефектов и повысить общую эффективность производства. Дальнейшие достижения в области искусственного интеллекта и автоматизации еще больше усовершенствуют эти системы контроля, прокладывая путь к более интеллектуальным и адаптивным производственным процессам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. García-Martín J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E. Advanced Sensor Technologies for Industry 4.0: A Review // Sensors. 2019. Vol. 19, no. 23. P. 5085. DOI: 10.3390/s19235085.

2. Rai P., Smith J., Brown T. Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT) for Complex Geometries: A Case Study in Aerospace // *Ultrasonics*. 2022. Vol. 126. Art. no. 106823. DOI: 10.1016/j.ultras.2022.106823.
3. Mery D. *Computer Vision for X-Ray Testing: Imaging, Systems, and Applications*. Berlin: Springer, 2021. 320 p. DOI: 10.1007/978-3-030-56769-9.
4. Петров А. В. Неразрушающий контроль в машиностроении. М.: Машиностроение, 2020. 245 с.
5. Kumar S., Zhang Y., Wang L. AI-Driven Defect Detection in X-ray Images for Automotive Manufacturing // *NDT & E International*. 2021. Vol. 124. Art. no. 102531. DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102531.
6. Vrana J., Singh R. Digital Twins in NDT: Bridging Physical and Virtual Inspection // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020. Vol. 16, no. 8. P. 5234–5243. DOI: 10.1109/TII.2020.2974547.
7. Сидоров И. Н., Козлов Д. А. Автоматизация входного контроля на промышленных предприятиях. СПб.: Политехника, 2019. 180 с.
8. Иванова Л. М. Применение ультразвуковых методов в диагностике материалов // *Вестник машиностроения*. 2021. № 3. С. 12–18.

REFERENCES

1. García-Martín J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E. Advanced Sensor Technologies for Industry 4.0: A Review // *Sensors*. 2019. Vol. 19, no. 23. P. 5085. DOI: 10.3390/s19235085.
2. Rai P., Smith J., Brown T. Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT) for Complex Geometries: A Case Study in Aerospace // *Ultrasonics*. 2022. Vol. 126. Art. no. 106823. DOI: 10.1016/j.ultras.2022.106823.
3. Mery D. *Computer Vision for X-Ray Testing: Imaging, Systems, and Applications*. Berlin: Springer, 2021. 320 p. DOI: 10.1007/978-3-030-56769-9.
4. Petrov A.V. *Nondestructive Testing in Mechanical Engineering* [Неразрушающий контроль в машиностроении]. Moscow: Mashinostroenie, 2020. 245 p.
5. Kumar S., Zhang Y., Wang L. AI-Driven Defect Detection in X-ray Images for Automotive Manufacturing // *NDT & E International*. 2021. Vol. 124. Art. no. 102531. DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102531.
6. Vrana J., Singh R. Digital Twins in NDT: Bridging Physical and Virtual Inspection // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020. Vol. 16, no. 8. P. 5234–5243. DOI: 10.1109/TII.2020.2974547.
7. Sidorov I.N., Kozlov D.A. *Automation of Incoming Inspection at Industrial Enterprises* [Автоматизация входного контроля на промышленных предприятиях]. St. Petersburg: Politekhnik, 2019. 180 p.
8. Ivanova L.M. Application of Ultrasonic Methods in Material Diagnostics [Применение ультразвуковых методов в диагностике материалов] // *Bulletin of Mechanical Engineering* [Вестник машиностроения]. 2021. No. 3. P. 12–18.

Информация об авторах

Солонченко Михаил Евгеньевич – студент второго курса магистратуры кафедры «Управление качеством», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, e-mail: solonchenko.01@mail.ru

Information about the authors

Solonchenko Mikhail Evgenievich – second-year master's student of the Department of Quality Management, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, e-mail: solonchenko.01@mail.ru