

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ РЕШЕНИЙ И МЕТОДОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПЕКТРОГРАММ

Омельченко П.П. (Университет ИТМО), **Новопашин А.А.** (Университет ИТМО)

Научный руководитель – PhD, в.н.с. Соколов Михаил Сергеевич
(Университет ИТМО)

Введение. Лазерная сварка является одним из ключевых процессов в современных производствах, особенно в аэрокосмической, автомобильной и электронной промышленности. Однако, несмотря на высокую точность и скорость, этот процесс подвержен возникновению дефектов, таких как поры, трещины и неоднородности шва, которые могут значительно снизить качество и надежность сварных соединений. Существующие методы контроля качества сварки (рентгенография и др.) являются дорогостоящими, трудоемкими и, как правило, применяются после завершения процесса. Это делает их непригодными для оперативного вмешательства и оптимизации процесса в реальном времени. В связи с этим актуальной задачей является разработка системы автоматической коррекции режимов лазерной сварки в реальном времени, которая позволит минимизировать дефекты и повысить качество продукции.

В настоящей работе предложен подход к созданию такой системы на основе анализа эмиссионных спектров плазмы. Основная цель исследования заключается в разработке устройства, способного автоматически корректировать параметры сварки на основе анализа оптического излучения, что позволит минимизировать частоту появления дефектов и откроет путь к массовому использованию лазерной сварки для создания ответственных конструкций.

Основная часть. В ходе исследования была выявлена корреляция между геометрическими характеристиками дефектов (509, 402, 507) [1] и параметрами эмиссионных спектров плазмы, полученных в ходе сварки стали 09Г2С встык при помощи лазера MAXPhotonics MFSC-3000, 3 кВт. Излучение фокусировалось оптической головой для сварки WSX ND40, линейное перемещение вдоль шва осуществлялось при помощи роботизированной системы FANUC M710iC/70. Для статистического анализа данных были выбраны две длины волны в составе спектра плазмы: 589.4558 нм и 533.4809 нм, соответствующие атомным линиям элементов плазмы [2]. Статистический анализ данных показал, что интенсивность излучения выбранных длин волн, форма, межквартильный размах и количество мод распределении интенсивности коррелируют с численными характеристиками дефектов, полученных в результате анализа макрошлифов. Коэффициент корреляции, рассчитанный по методу Спирмана составил до 0,65, по методу Пирсона – до 0,52. Это открывает возможность использования фотодетекторов для предсказания и предотвращения дефектов в реальном времени при помощи автоматической коррекции режима сварки.

В рамках работы были изучены существующие технические решения для контроля качества лазерной сварки. Были рассмотрены различные подходы, включая использование термографических камер [3], высокоскоростной съемки [4, 5] и акустических методов [5]. Однако, ни одно из этих решений не обеспечивает достаточной точности и скорости для реализации системы коррекции в реальном времени, а главное - неприменимы в промышленности ввиду крайне высокой цены, плохой пыле- и влагозащищенности компонентов. Коммерчески доступные системы используют регистрацию оптического излучения (как обратного излучения лазера, так и плазмы) и температуры (DILIGINE, PRECITEC LWM 4.0).

Таким образом, была предложена конфигурация прототипа сенсора, который сможет обеспечить необходимую точность и скорость обработки данных. А именно: блок светодиодов, чувствительных к различным длинам волн (InGaAs, Si, Ge), устанавливаемый вместо камеры в разъем оптической головы и интегрируемый с ЧПУ системой, контролирующей перемещение. Предлагается использовать нейронную сеть для описания зависимости характеристик дефектов от различных параметров режима лазерной сварки на основе большой выборки данных и использовать полученную модель для программирования управляющего контроллера. Подход с использованием нейронной сети для классификации и детекции дефектов показал эффективность в области исследований лазерной сварки, особенно при использовании нескольких методов. [6, 7] В случае обнаружения потенциального дефекта предложенная система автоматически корректирует параметры сварки (например, мощность лазера, скорость сварки, фокусное расстояние).

Выводы. В настоящей работе были получены следующие результаты:

1. Выявлена корреляция между геометрическими характеристиками дефектов 509, 402, 507 и параметрами эмиссионных спектров плазмы.
2. Предложена схема модуля для контроля качества лазерной сварки в реальном времени на основе анализа коммерчески доступных решений на рынке.

Финансирование исследования выполнено за счет НИРСИИ Университета ИТМО (проект №640115 «Разработка и интеграция систем мониторинга и управления для автоматизации производственных процессов на примере лазерной сварки»)

Список использованных источников:

1. ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012 «Национальный стандарт Российской Федерации. Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов геометрии и сплошности в металлических материалах»
2. Kramida, A., Ralchenko, Yu., Reader, J., and NIST ASD Team (2024). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.12), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2025, January 25]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. DOI: <https://doi.org/10.18434/T4W30F>
3. Buongiorno D. et al. Inline defective laser weld identification by processing thermal image sequences with machine and deep learning techniques //Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 13. – С. 6455.
4. Tang X. et al. A new method to assess fiber laser welding quality of stainless steel 304 based on machine vision and hidden Markov models //IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 130633-130646.
5. Schmidt L. et al. Acoustic process monitoring in laser beam welding //Procedia CIRP. – 2020. – Т. 94. – С. 763-768.
6. Peng P. et al. Real-time defect detection scheme based on deep learning for laser welding system //IEEE Sensors Journal. – 2023. – Т. 23. – №. 15. – С. 17301-17309.
7. Li J. et al. Prediction of penetration based on plasma plume and spectrum characteristics in laser welding //Journal of Manufacturing Processes. – 2022. – Т. 75. – С. 593-604.

Автор _____ Омельченко П.П.

Научный руководитель _____ Соколов М.С.