

Анализ и перспективы применения автоматизированных технологий и лазерной триангуляции для визуального контроля качества сварных швов на производстве прямошовных сварных труб большого диаметра

И.В. Михайлов, А.Р. Алиагаев

Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева

Аннотация: В статье представлен анализ современных методов и перспектив применения автоматизированных технологий и лазерной триангуляции для визуального контроля качества сварного шва на производстве прямошовных сварных труб большого диаметра. Обзор научных и патентных публикаций за последние 5 лет был проведен с использованием таких баз данных, как Google Scholar, Scopus, Web of Science, eLibrary и Google Patents. Были рассмотрены такие ключевые аспекты, как использование лазерных триангуляционных датчиков (далее ЛТД) для оценки геометрических параметров сварного шва и интеграция методов машинного обучения для повышения точности контроля и автоматизации. Исследование показывает, что применение ЛТД в сочетании с методами машинного обучения обеспечивает высокую точность оценки качества сварных швов, что имеет решающее значение для обеспечения надежности трубопроводов в различных отраслях промышленности. На основе проведенного анализа определены рекомендации по разработке автоматизированной системы визуального контроля сварных швов на производственных линиях.

Ключевые слова: лазерная триангуляция, визуальный контроль, сварные швы, автоматизированные технологии, машинное обучение, контроль качества, сварные трубы большого диаметра.

Введение. Требования к сварке и контролю качества сварных соединений, установленные промышленными стандартами, определяют не только технические параметры производства, но и общие условия обеспечения безопасности трубопроводов в строительстве, нефтегазовой и химической отраслях. Стандарты, такие, как ISO 5817 и API 1104, устанавливают определенные критерии для качества сварных швов, требуя придерживаться уровня качества, который обеспечивает безотказную эксплуатацию трубопроводов под нагрузками различного характера.

В этой связи особенно актуален визуальный контроль, так как он является первичным и незаменимым этапом оценки качества сварного соединения, предшествующим использованию более сложных методов неразрушающего контроля. Визуальный контроль, нормализованный международным стандартом ISO 17637/2003, позволяет оперативно выявлять

поверхностные недостатки и выполнять первоначальный отбор сварных швов перед дополнительными испытаниями.

Современные промышленные инновации направлены на интеграцию и усовершенствование методов автоматизированного контроля, включая различные техники лазерной триангуляции, для повышения эффективности и надежности инспекционных операций. В частности, лазерная триангуляция обеспечивает высокоточное измерение параметров шва, что является неотъемлемой частью автоматизированных систем контроля.

Текущее исследование направлено на анализ принципов визуальной оценки сварных швов на основе инновационных методов автоматизации этого процесса с применением лазерной триангуляции.

Для достижения цели мы провели литературный обзор научных трудов и патентов за последние 5 лет, используя ресурсы поисковых систем Google Scholar, Scopus, Web of Science, eLibrary, Google Patents, по следующим ключевым словам: определение качества сварного шва с использованием лазерного триангуляционного датчика; автоматическое определение качества сварного шва; обнаружение дефектов сварных швов; метод контроля сварных швов; welding inspection methods by laser triangulation sensor; лазерный триангуляционный датчик; laser triangulation sensor; геометрия сварного шва; машинное обучение для дефектоскопии сварного шва; machine learning techniques welding inspection / Weld Quality Inspection; welding inspection by laser triangulation sensor. Для данного метаанализа мы использовали статьи и патенты, содержащие доказательную экспериментальную базу по вопросу применения лазерного триангуляционного датчика в визуальном контроле сварного шва.

Цель настоящей обзорной статьи заключается в том, чтобы на основе анализа академической информации и практически зафиксированных примеров использования, обеспечить концептуальную основу для разработки

и внедрения интегрированной системы автоматизированного визуального контроля сварных швов внутри труб на линии по производству сварных прямошовных труб большого диаметра.

Автоматизированный контроль качества сварных соединений. В современной промышленности для определения качества сварных соединений стремятся применять различные автоматизированные средства контроля с целью минимизировать человеческий фактор и повысить качество продукции. В частности, на предприятиях по производству трубопроводов к качеству сварного соединения предъявляются особые требования, так как от целостности тела трубы или соединения двух трубных участков зависит герметичность трубопровода. Качество трубопровода в значительной степени зависит от качества стыковых сварных соединений стальных труб, поэтому необходимо применять средства объективного контроля, которые автоматизирует процесс выявления анализа сварных соединений путем построенного трехмерного изображения поверхности сварного шва [1, 2] с последующим автоматизированным выявлением дефектов [3, 4].

Средства диагностики сварных соединений основаны на различных принципах: ультразвуковые, электромагнитные, оптические и др. К оптическим средствам относятся лазерные триангуляционные датчики. Различают одно-, двух- и трехмерные ЛТД. Это устройства бесконтактного профилирования поверхностей, измерения геометрических параметров и обнаружения локальных дефектов. В основу работы ЛТД положен принцип оптический триангуляции (рис.1). ЛТД состоит из полупроводникового лазера, излучение которого фокусируется на объекте. Отраженное от объекта излучение собирается на CCD-матрице. Встроенный сигнальный процессор оценивает расстояние до объекта по положению светового пятна на матрице. ЛТД обладают высокой скоростью сканирования и относительно большим диапазоном измерения [5].

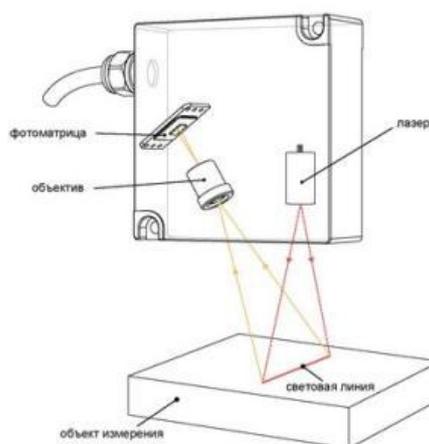


Рис. 1. – Схема работы лазерного триангуляционного датчика [6]

Одним из первых патентов на автоматизированное устройство контроля на базе ЛТД является [2]. Целью предложенного авторами устройства является контроль сварного соединения участков трубопровода на этапах изготовления и прокладки трубопровода, а именно: контроль точного совмещения торцов стыкуемых труб, оценка качества полученного сварного соединения (отсутствие непроваров, облоя) и документирование полученной информации с точной привязкой к конкретному месту сварного соединения. В этом и последующих патентах [1, 3, 4] ЛТД устанавливается на самоходную платформу, которая автоматически перемещает датчик вдоль сварного шва по окружности стыкового соединения труб. В процессе перемещения ЛТД строится трехмерная поверхность сварного шва и околошовной зоны на основе полученного от ЛТД двумерного профиля сечения шва. По полученному таким образом трехмерному изображению сварного шва (3D-реконструкция сварного соединения) происходит количественная оценка с эталонным профилем шва. В [1] разработанное устройство контроля оснащено блоком формирования эталонного профиля шва по нормативным значениям высоты и ширины шва с учетом физических свойств материала. Затем количественная оценка отклонения формы поверхности шва от заданного выводится на дисплей оператора.

Можно выделить следующие геометрические параметры сварных швов, определяемые с помощью ЛТД:

- высота усиления;
- ширина шва;
- смещения свариваемых поверхностей;
- смещения шва;
- выпуклость шва;
- неполное заполнение шва.

Анализ отклонения этих параметров от нормативных происходит по трехмерному изображению поверхности сварного соединения (см. рис. 2). Методы получения данных, необходимых для 3D-реконструкции сварного соединения, в основе своей восходят к оптическому триангуляционному способу (ЛТД) получения двумерного профиля сечения в каждый дискретный момент времени в процессе перемещения вдоль шва.

Перемещение ЛТД вдоль исследуемого сварного шва осуществляется вручную или автоматически. В последнем случае ЛТД устанавливается на самоходную платформу, вид и конструкция которой определяется типом сварного соединения. Выше были упомянуты патенты, где конструкция самоходной платформы для ЛТД выполнена под кольцевой сварной шов стыкового соединения. Для проверки качества сварного шва на линии по производству сварных прямошовных труб, требуется перемещение ЛТД вдоль продольного сварного шва по всей длине трубы как с внешней, так и с внутренней стороны. Существующие конструкции самоходных платформ можно поделить на стационарные линейные [1], кольцевые [2-4] и мобильные [10, 11]. Но предложенные конструкции не позволяют выполнять задачу по перемещению ЛТД вдоль сварного соединения прямошовных труб. Перемещение датчика вручную требует временных затрат, что нежелательно в условиях потокового производства и имеет негативное эффект, а в

некоторых случаях невозможно для труб с малым диаметром. Таким образом задачу создания автоматизированного устройства оценки качества сварного шва прямошовных труб можно разделить на две подзадачи: обеспечение автоматического перемещения ЛТД вдоль сварного шва и последующая 3D-реконструкция поверхности сварного шва по массиву измерений ЛТД.

Ряд исследователей не используют готовые ЛТД, а разрабатывают оригинальные оптические системы с полосковым лазером и видеокамерой [7–9], но по сути их работа идентична промышленным ЛТД. Дальнейшая обработка данных с целью воспроизведения поверхности шва включает в себя фильтрацию данных и сшивания профилей сечения вдоль оси перемещения.

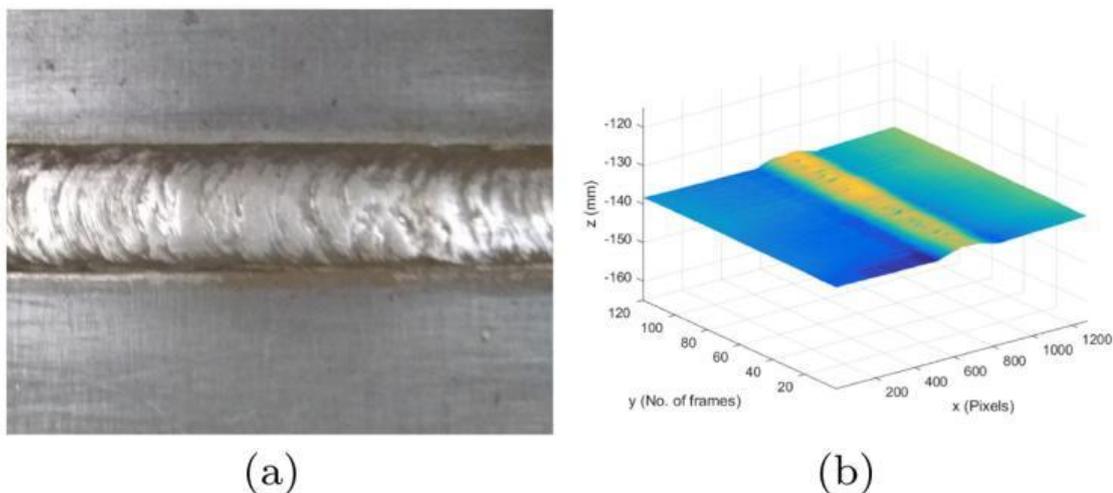


Рис. 2. – Участок сварного шва: а) собственно сварной шов, б) его 3D-реконструкция [8]

Интересна работа [9] тем, что авторы исследования применяют не полосковый лазер, а сетчатый, который проецирует на поверхность шва ортогональную сетку. Далее по изображению после бинаризации и скелетизации оцениваются высоты всех точек деформированной сетки методом триангуляции. В результате получается скелетное облако точек профиля шва, которое сливается с чистым изображением шва (без

проецирования ортогональное сетки) для получения трехмерной поверхности сварного шва.

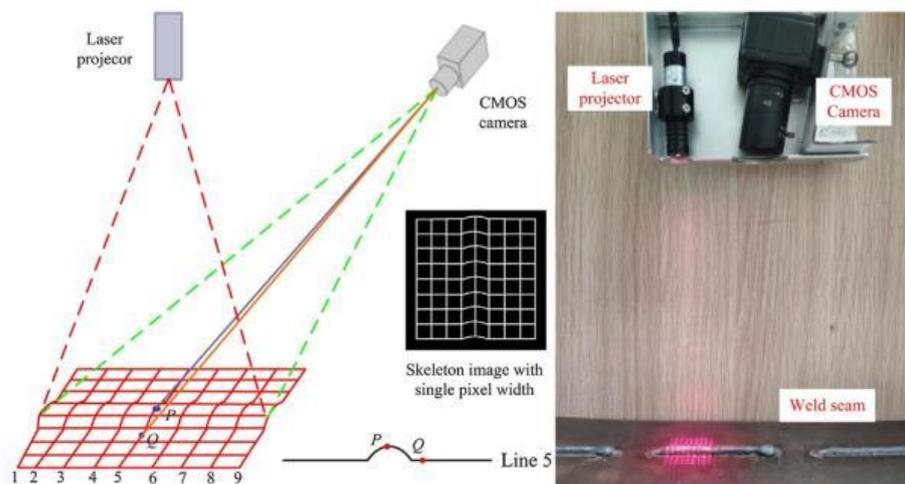


Рис. 3. – Устройство и принцип работы оптической системы на основе сетчатого лазера [9]

Предложенный авторами [9] алгоритм 3D-реконструкции сварного шва дает погрешность измерения геометрии поверхности шва менее $\pm 0,09$ мм. Типовая погрешность промышленных ЛТД $\pm 0,05 - 0,1$ % от измеряемого диапазона. Таким образом можно добиться точности измерения геометрии сварного шва с точность до нескольких сотых миллиметра.

Достигнутая авторами точность работы оригинальных оптических триангуляционных систем соизмерима с характеристиками современных промышленных 2D ЛТД. Поэтому, в устройствах определения качества сварного шва, основанных на триангуляционном методе получения точек профиля сечений шва, с целью сокращения времени разработки целесообразно использовать готовые промышленные ЛТД.

В работах [10, 11] в качестве устройства перемещения лазерных триангуляционных систем используются мобильные колесные платформы. В патенте [10] модуль перемещения состоит из платформы с четырьмя колесами - мобильный сканер (см. рис. 4). На модуле перемещения смонтировано два 2D - ЛТД и датчик счисления пути для определения

пройденного модулем расстояния вдоль продольной оси сварного шва. Датчик счисления пути необходим для определения местоположения вдоль оси сварного шва в каждый момент измерения ЛТД. Таким образом возможно построение трехмерного изображения путем сшивания профилей сечений сварного шва вдоль линии движения. Данные измерений точек формы поверхности шва с ЛТД проходят через фильтрацию для отсеивания помех, вызванных неровностями сканируемой поверхности и бликами. Установка мобильного сканера на сварной шов происходит вручную так, что шов оказался по центру ширины диапазоны лазерной полосы ЛТД.

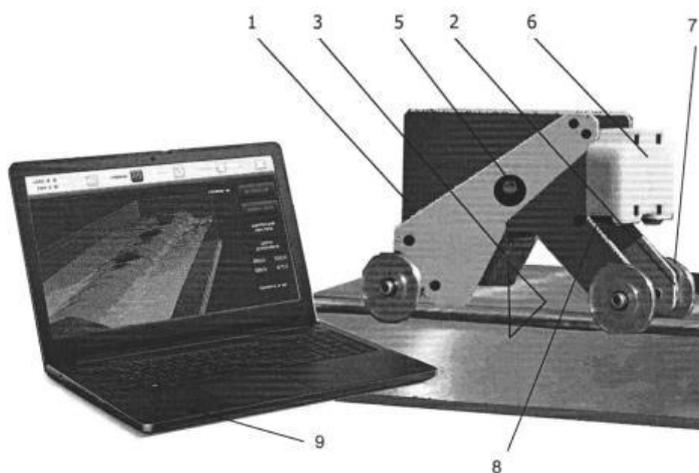


Рис. 4. – Мобильный сканер [10]

В работе [11] модулем перемещения для ЛТД является самоходный мобильный робот, который перемещается по стенкам металлической трубы. Отличительной особенностью данной системы является автоматическое следование вдоль линии при одновременной 3D-реконструкции сварного шва. На роботе также установлен датчик счисления пути для сопоставления профилей сечений и вдоль траектории движения.

Задача 3D-реконструкции сварного соединения по измерениям ЛТД может быть решена методами машинного и глубокого обучения, что эффективно снижает сложность алгоритмов 3D-реконструкции и повышает точность оценки геометрии поверхности сварного шва [12]. Автоматическое

определение качества сварного шва по данным ЛТД-методами глубокого обучения (deep neural network) могут давать точность классификации до 96,88%, что соответствует современным оптическим системам контроля [13]. Кроме того, использование глубокого обучения для автоматизированной оценки качества сварного шва повышает скорость принятия решения, что позволяет использовать такую систему непосредственно на производственной линии.

Заключение. На основе проанализированных выше научных работ, посвященных визуальному определению качества сварного шва с использованием лазерного триангуляционного датчика, выявлены следующие особенности, на которые можно ориентироваться при разработке системы автоматизированного визуального контроля сварных швов внутри труб на линии по производству сварных прямошовных труб большого диаметра:

- используется 2D ЛТД, который позволяет получить двумерный контур сечения шва;
- ЛТД всегда устанавливается на подвижной модуль перемещения, который может быть стационарным или мобильным, самоходным или ручным;
- движение несущей платформы отслеживается датчиками счисления пути для сопоставления кадра с ЛТД с координатой места;
- обычно применяется один ЛТД, но для повышения точности возможно применение пары датчиков;
- по массиву данных с ЛТД строится трехмерное изображение сварного соединения;

- для каждого сечения сварного шва, полученного с ЛТД, дается количественная оценка соответствия эталонному профилю шва, который вносится перед началом обследования;
- необходима первичная фильтрация данных с ЛТД из-за наличия шероховатости сканируемой поверхности и бликов, попадающих на матрицу ЛТД;
- данные с ЛТД хорошо обрабатываются методами и алгоритмами машинного обучения, что улучшает процесс определения качества сварного шва.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Астраханского государственного университета (Приоритет-2030).

Литература

1. Панков В.В., Букин В.М., Панков С.В., Крючков П.А. Устройство для оценки качества сварного шва. Патент на изобретение. № RU2550673C2. 2015. URL: elibrary.ru/item.asp?id=37815376 (дата обращения: 18.03.2024).
2. Хоменко В.И., Курочкин А.В., Чирсков В.А. Устройство лазерографического контроля. Патент на изобретение. № RU101958U1 2011. URL: patents.google.com/patent/RU101958U1/ru (дата обращения: 20.03.2024).
3. Филиппов О.И., Неганов Д.А., Колесников О.И., Юшин А.А., Гейт А.В., Михайлов И.И., Масляев А.М. Устройство для проведения автоматизированной оценки качества сборки сварного соединения. Патент на изобретение. № RU178440U1. 2018. URL: elibrary.ru/item.asp?id=38151382 (дата обращения: 18.03.2024).
4. Лексашов О.Б., Гусев А.С., Юдин М.И. Способ автоматизированной наружной диагностики трубопровода и автоматизированный диагностический комплекс для его осуществления.

Патент на изобретение. № RU2757203C1. 2021. URL: elibrary.ru/item.asp?id=47121672 (дата обращения: 19.03.2024).

5. Демкин В. Н., Степанов В. А., Шадрин М. В. Системы быстрого прототипирования с лазерным сканированием // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2013. № 3 (177). С. 136-143.

6. Лазерный триангуляционный 2-D датчик LS2D от производителя - НПП Призма. URL: prizmasensors.ru/ls2d-triangulyacionnyj-lazernyj-2d-datchik/.

7. Chu H.-H., Wang Z.-Y. A vision-based system for post-welding quality measurement and defect detection // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. V. 86. No. 9. pp. 3007-3014.

8. Han Y., Fan J., Yang X. A structured light vision sensor for on-line weld bead measurement and weld quality inspection // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. V. 106. No. 5. pp. 2065-2078.

9. Jia N., Li Z., Ren J., Wang Y., Yang L. A 3D-reconstruction method based on grid laser and gray scale photo for visual inspection of welds // Optics & Laser Technology. 2019. V. 119. P. 105648.

10. Панков В.В., Панков С.В., Букин В.М.. Мобильный сканер для определения качества поверхности сварного шва. Патент на изобретение. № RU2644617C2. 2018. URL: elibrary.ru/item.asp?edn=bzpnxe (дата обращения: 20.03.2024).

11. Zhang L., Ke W., Ye Q., Jiao J. A novel laser vision sensor for weld line detection on wall-climbing robot // Optics & Laser Technology. 2014. V. 60. P. 69-79.

12. Yang P., Hu D., Wang C., Zhang Y., You D., Gao X., Zhang N. Weld Surface Imperfection Detection by 3D Reconstruction of Laser Displacement Sensing // 2020 5th International Conference on Mechanical, Control and

Computer Engineering (ICMCCE) 2020 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE). 2020. P. 2102-2105.

13. Spruck A., Seiler J., Roll M., Dudziak T., Eckstein J., Kaup A. Quality Assurance of Weld Seams Using Laser Triangulation Imaging and Deep Neural Networks // 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT. 2020. pp. 407-412.

References

1. Pankov V.V., Bukin V.M., Pankov S.V., Kryuchkov P.A. Patent No. RU2550673C2. Ustroystvo dlya otsenki kachestva svarnogo shva: zayavl. 25.03.2013: opubl. 10.05.2015. [Device for Assessing the Quality of a Welded Joint: appl. 25.03.2013: publ. 10.05.2015].

2. Khomenko V.I., Kurochkin A.V., Chirskov V.A. Patent No. RU101958U1. Ustroystvo lazerograficheskogo kontrolya: zayavl. 10.08.2010: opubl. 10.02.2011. [Device for Laserographic Control: appl. 10.08.2010: publ. 10.02.2011].

3. Filippov O.I., Neganov D.A., Kolesnikov O.I., Yushin A.A., Gate A.V., Mikhaylov I.I., Maslyayev A.M. Patent No. RU178440U1. Ustroystvo dlya provedeniya avtomatizirovannoy otsenki kachestva sborki svarnogo soedineniya: zayavl. 31.10.2017: opubl. 04.04.2018. [Device for Conducting Automated Evaluation of Welded Joint Assembly Quality: appl. 31.10.2017: publ. 04.04.2018].

4. Leksashov O.B., Gusev A.S., Yudin M.I. Patent No. RU2757203C1. Sposob avtomatizirovannoy naruzhnoy diagnostiki truboprovoda i avtomatizirovannyi diagnosticheskiy kompleks dlya yego osushchestvleniya: zayavl. 26.01.2021: opubl. 12.10.2021. [Method of Automated External Diagnostics of Pipeline and Automated Diagnostic Complex for Its Implementation: appl. 26.01.2021: publ. 12.10.2021].

5. Demkin V.N., Stepanov V.A., Shadrin M.V. Nauchnye i tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki. 2013. № 3 (177). pp. 136-143.
 6. Lazer'nyy triangulyatsionnyy 2-D datchik LS2D ot proizvoditelya - NPP Prizma. [Laser Triangulation 2-D Sensor LS2D from Manufacturer - NPP Prizma]. URL: prizmasensors.ru/l2d-triangulyacionnyj-lazernyj-2d-datchik/.
 7. Chu H.-H., Wang Z.-Y. A vision-based system for post-welding quality measurement and defect detection. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016. V. 86, № 9. pp. 3007–3014.
 8. Han Y., Fan J., Yang X. A structured light vision sensor for on-line weld bead measurement and weld quality inspection. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2020. V. 106, № 5. pp. 2065–2078.
 9. Jia N., Li Z., Ren J., Wang Y., Yang L. A 3D-reconstruction method based on grid laser and gray scale photo for visual inspection of welds. Opt. Laser Technol. 2019. V. 119. pp. 105648.
 10. Pankov V.V., Pankov S.V., Bukin V.M. Patent No. RU2644617C2. Mobil'nyy skaner dlya opredeleniya kachestva poverkhnosti svarnogo shva: zayavl. 21.06.2016: opubl. 13.02.2018. [Mobile Scanner for Determining the Quality of Welded Joint Surface: appl. 21.06.2016: publ. 13.02.2018].
 11. Zhang L., Ke W., Ye Q., Jiao J. A novel laser vision sensor for weld line detection on wall-climbing robot. Optics & Laser Technology. 2014. V. 60. pp. 69-79.
 12. Yang P., Hu D., Wang C., Zhang Y., You D., Gao X., Zhang N. Weld Surface Imperfection Detection by 3D Reconstruction of Laser Displacement Sensing. 2020 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE). 2020. pp. 2102–2105.
-



13. Spruck A., Seiler J., Roll M., Dudziak T., Eckstein J., Kaup A. Quality Assurance of Weld Seams Using Laser Triangulation Imaging and Deep Neural Networks. 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT. 2020. pp. 407–412.

Дата поступления: 14.04.2024

Дата публикации: 25.06.2024