



АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕР
ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
INFORMATION SYSTEMS

DOI 10.51885/1561-4212_2023_3_186
MPHTI 28.23.15

М.Г. Емельянова

Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: mariya_yemelyanova@mail.ru

**АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ В ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ СРАВНЕНИЯ
ГИСТОГРАММ ЯРКОСТИ**

**АШЫҚТЫҚ ГИСТОГРАММАСЫН САЛЫСТЫРУ НЕГІЗІНДЕ ҚҰРЫЛҒАН
ДӘНЕКЕРЛЕНГЕН ҚОСЫЛЫСТАРДАҒЫ АҚАУЛАРДЫ БЕЙНЕ ТІЗБЕКТЕРІНІҢ ІШІНЕН
АВТОМАТТЫ ТҮРДЕ АНЫҚТАУ АЛГОРИТМІ**

**ALGORITHM FOR AUTOMATIC DETECTION OF DEFECTS IN WELDED JOINTS IN A
VIDEO SEQUENCE BASED ON COMPARISON OF BRIGHTNESS HISTOGRAMS**

Аннотация. В работе рассматривается задача автоматического обнаружения поверхностных дефектов сварных соединений труб из нержавеющей стали в ходе их изготовления. Предлагается алгоритм решения поставленной задачи на основе метода сравнения гистограмм распределения яркости цифровых изображений. Проведены экспериментальные исследования работы алгоритма путём обработки кадров видеопоследовательностей, полученных со статичной камеры. Алгоритм позволяет выявить наличие дефектов и локализовать области дефектов на кадрах видеопоследовательностей. Проведённые исследования подтвердили работоспособность алгоритма.

Ключевые слова: визуальный контроль, сварные соединения, автоматическое обнаружение дефектов, гистограммы яркости.

Аңдатпа. Бұл жұмыста тот баспайтын болаттан жасалған құбырлардың дәнекерленген қосылыстарын жасау кезінде, бетінде пайда болатын ақауларды автоматты түрде анықтау мәселесі қарастырылған. Мәселені шешу үшін, сандық кескіндердің ашықтығының таралу гистограммаларын салыстыру әдісі негізіндегі алгоритм ұсынылған. Алгоритм жұмысының эксперименттік зерттеулері статикалық камерадан алынған бейне тізбектерінің кадрларын өңдеу арқылы жүргізілді. Алгоритм ақаулардың бар-жоқтығын анықтауға және бейне тізбектерінің кадрларындағы ақауларды табуға мүмкіндік береді. Жүргізілген зерттеулер нәтижесі алгоритмнің тиімділігін растады.

Түйін сөздер: көзбен шолу, дәнекерленген қосылыстар, ақауларды автоматты түрде анықтау, ашықтық гистограммалары.

Abstract. The paper discusses the problem of automatic detection of surface defects in stainless steel pipe welded joints during manufacture. An algorithm for solving the problem based on comparing brightness distribution histograms of digital images is proposed. Experimental studies of the algorithm by processing frames of video sequences obtained from a static camera have been conducted. The algorithm makes it possible to detect the presence of defects and localize the defect areas on the frames of video sequences. The studies confirmed the efficiency of the algorithm.

Keywords: visual inspection, welded joints, automatic defect detection, brightness histograms.

Введение. Одним из направлений развития производства по изготовлению сварных труб

является автоматизация процесса визуального контроля качества сварных соединений. Визуальный контроль соединений металлических материалов, выполненных сваркой плавлением, осуществляется согласно международному стандарту ISO 17637:2016 [1] (ГОСТ Р ИСО 17637 – 2014 [2]).

В процессе изготовления труб из нержавеющей стали на производственной линии используется автоматическая дуговая сварка вольфрамовым электродом в инертном газе – TIG (Tungsten Inert Gas). На качество сваривания тонких кромок нержавеющей стали оказывают влияние такие факторы как качество используемых материалов, перепады напряжения в электрической сети, уровень подачи газа и другие. Указанные факторы приводят к появлению различных дефектов сварных соединений. Дефекты описаны в международном стандарте ISO 6520-1:2007 [3] (ГОСТ Р ИСО 6520-1 – 2012 [4]).

Производственным персоналом постоянно осматриваются поверхности сварных соединений для выявления дефектов, а также быстрого устранения неполадок или причин, вызвавших их появление. На результат визуального осмотра оказывает влияние человеческий фактор. Для того чтобы исключить субъективность, была поставлена задача автоматического обнаружения дефектов сварных соединений стальных труб в ходе их изготовления. Требуется программная обработка кадров видеопоследовательностей, получаемых со статичной камеры, для обнаружения на кадрах возможных дефектов сварки. По сути, на каждом шаге обработки кадров видеопоследовательности требуется решение задачи бинарной классификации.

Описанные подходы и методы в работах [5-8] позволяют решить задачу автоматического обнаружения дефектов в сварных соединениях. Каждый из предлагаемых исследователями методов имеет свои достоинства и недостатки. В работе [6] используется пороговый метод сегментации, при необходимости требующий поиска оптимального порога. Исследователи в работе [7] успешно использовали модифицированный метод вычитания фона, но при этом учитывали возможность обнаружения на кадрах видеопоследовательностей ложных дефектов. Авторы [8] предлагают традиционные методы машинного зрения и интеллектуальные модели для решения задачи автоматического обнаружения дефектов сварки. В статье [8] авторы указывают на возможные проблемы с глубоким обучением нейронной сети при использовании небольшого количества обучающих выборок.

К одному из требований обработки кадров видеопоследовательностей относятся низкие вычислительные затраты. Этим преимуществом обладают методы, основанные на использовании гистограмм распределения яркости изображений [9-12]. Такие методы основываются на анализе, сравнении распределений значений яркости пикселей на изображениях. В обзорных статьях [11, 12] ссылаются на применение статистических данных яркостных гистограмм для решения задачи обнаружения дефектов на изображениях. Например, задача поиска оптимального порога яркости при пороговой сегментации решается на основе гистограммных методов [13, 14].

Целью статьи является разработка и проверка работоспособности алгоритма автоматического обнаружения дефектов сварных соединений труб из нержавеющей стали, не требующего значительных вычислительных ресурсов при обработке кадров видеопоследовательности.

На рис. 1 представлено изображение сварного соединения без дефектов, на рис. 2 – изображения возможных поверхностных дефектов, таких как несплавление, окисление металла, возникающих при сваривании кромок нержавеющей стали. Нормальное сварное соединение имеет незначительную волнообразную форму (рис. 1). Дефект несплавление металла проявляется как отсутствие сварки между кромками (рис. 2, а). Окисление металла

– появление затемнения и цветов побежалости (рис. 2, б).



Рисунок 1. Изображение нормального сварного соединения



а)



б)

Рисунок 2. Изображения сварных соединений с дефектами: несплавление металла (а); окисленная поверхность металла (б)

Далее в статье представлено описание методов решения задачи, предлагаемый алгоритм, а также экспериментальные результаты проверки работоспособности алгоритма, сделаны выводы.

Методы и алгоритм решения задачи. Для каждого кадра видеопоследовательности необходима предварительная обработка: преобразование в полутоновое изображение, выделение области интереса ROI (Range Of Interest).

Для обнаружения дефектов сварных соединений на кадрах видеопоследовательности предлагается использовать метод сравнения яркостных гистограмм текущего кадра и эталонного изображения сварного соединения.

Гистограмма распределения яркости цифрового изображения представляет собой график, на котором указано число пикселей на каждом уровне яркости цвета (диапазон значений от 0 до 255) [9, 10]. На рис. 3а представлена гистограмма яркости изображения (кадра) сварного соединения без дефекта, а на рис. 3, б – с окислением металла. Видна значительная разница.

За эталонное изображение принимается усреднённое изображение из определённого количества кадров, не содержащих дефект. Усреднение кадров позволит сгладить колебания геометрических и яркостных характеристик.

Схожесть гистограмм яркости можно определить корреляционным методом (1), расстоянием Бхаттачария, метрикой хи-квадрат и др. [9, 10].

$$d(H_1, H_2) = \frac{\sum_{h=0}^{LH} (H_1(h) - \bar{H}_1)(H_2(h) - \bar{H}_2)}{\sqrt{\sum_{h=0}^{LH} (H_1(h) - \bar{H}_1)^2 \cdot (H_2(h) - \bar{H}_2)^2}}, \quad (1)$$

где H_1 , H_2 – исходная и эталонная гистограммы соответственно; h – номер столбца гистограммы; LH – количество столбцов гистограммы.

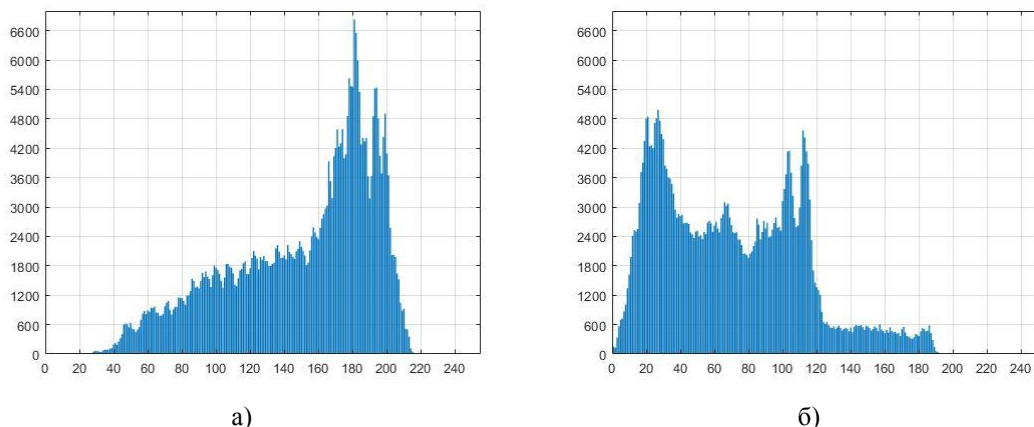


Рисунок 3. Гистограммы распределения яркости изображений сварных соединений без дефектов (а); с окислением металла (б)

При $d(H_1, H_2) = 1$ наблюдается полное совпадение сравниваемых признаков, $d(H_1, H_2) = -1$ – полное несовпадение. Чем ближе к 1 искомая величина, тем больше обрабатываемый кадр видеопоследовательности схож с эталоном, то есть на кадре, содержащем сварное соединение, отсутствует дефект сварки.

Результат сравнения гистограмм яркости эталона и текущего кадра видеопоследовательности является критерием сходства для определения наличия или отсутствия дефекта сварного соединения на кадре. В случае выявления на кадре видеопоследовательности дефекта сварки по критерию необходимо сегментировать возможный дефект. Для этого предлагается использовать метод моделирования и вычитания фона [7]. Суть метода заключается в попиксельном сравнении текущего кадра с моделью фона. За модель фона принимается эталонное изображение, которое является усреднением определённого количества кадров. Яркость пикселей полученного разностного изображения фильтруется на основе порогового значения. Результатом такой обработки является бинарное изображение, в котором белые пиксели (яркость 255) соответствуют возможному дефекту. На бинарном изображении могут быть отдельные сегменты, которые объединяются в единую область с помощью морфологической операции закрытия и фильтруются по площади.

На основе метода сравнения гистограмм яркости предлагается алгоритм обнаружения дефектов сварных соединений на кадрах видеопоследовательностей. На рис. 4 представлен предлагаемый алгоритм. Работа алгоритма начинается с получения кадров видеопоследовательности. Затем формируется эталонное изображение из s кадров, прошедших предварительную обработку. Кадры, из которых получается эталонное изображение, не должны содержать дефекты сварки. Далее строится гистограмма яркости эталонного изображения H . На следующем шаге для каждого поступающего предварительно обработанного кадра создаётся гистограмма яркости H_k , которая сравнивается с гистограммой яркости эталона. Если получаемая величина $d(H, H_k)$ меньше значения R , полученного экспериментальным путём, то это указывает на наличие дефекта в обрабатываемом кадре видеопоследовательности. В случае выполнения условия, происходит сегментация дефектной области и выделение прямоугольной рамкой этой области на кадрах видеопоследовательности. Эталонное изображение постоянно обновляется через определённое количество кадров, при условии отсутствия на кадрах каких-либо дефектов.

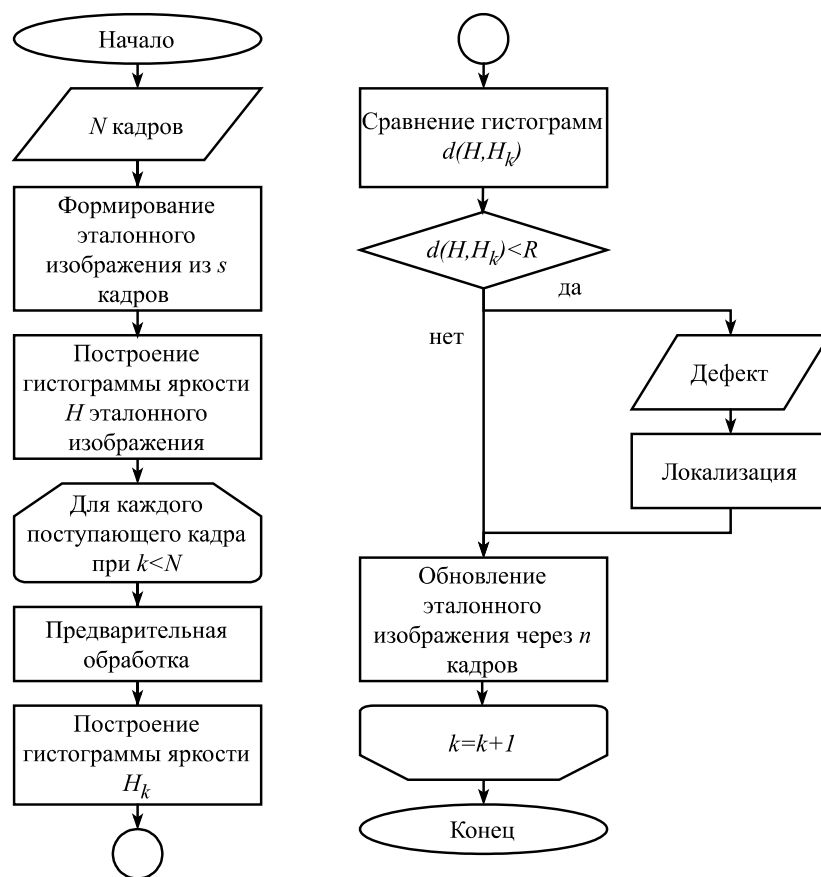


Рисунок 4. Предлагаемый алгоритм обнаружения и локализации дефектов сварных соединений на кадрах видеопоследовательности

Алгоритм реализован, и его работоспособность проверена экспериментальным путём.

Результаты. Реализация алгоритма выполнена в среде Visual Studio 2019 на языке программирования C#.

Экспериментальные исследования предложенного алгоритма проводились путём обработки кадров видеопоследовательностей, полученных со статичной камеры. Было получено более 40000 кадров, на которых содержались сварные соединения труб из нержавеющей стали. Известно, что на кадрах некоторых полученных видеопоследовательностей есть дефекты сварки, такие как несплавление и окисление металла. Уровень окисления металла при отбраковке определяет специалист производства.

Проведены исследования для определения порогового значения критерия сходства с использованием метода сравнения гистограмм яркости. Область интересов была выбрана 1010×60 пикселей. На рис. 5, а приведён фрагмент обработки кадров видеопоследовательности в виде графика значений корреляции между каждым кадром исследуемой видеопоследовательности и эталоном. Видны незначительные колебания корреляции. На рис. 5, б и 5, в показаны изменения корреляции между эталоном и кадрами фрагментов видеопоследовательностей, содержащих дефекты сварных соединений. На рис. 5, б можно увидеть резкое снижение значения корреляции при появлении на кадрах видеопоследовательности дефекта (несплавление металла) на небольшой области сварного соединения. На рис. 5, в видно постепенное ослабление корреляции, так как на

исследуемой видеопоследовательности окисление металла происходит медленно, наблюдается сначала незначительное, а затем сильное затемнение.



а)



б)



в)

Рисунок 5. Изменение корреляции между эталоном и кадрами фрагментов видеопоследовательностей на основе сравнения гистограмм яркости: при отсутствии дефектов (а); при появлении несплавления металла (б); при постепенном окислении металла (в)

Можно сделать вывод, что при появлении дефекта сварного соединения на кадре видеопоследовательности происходит снижение корреляции между сравниваемыми изображениями (текущим кадром и эталоном). На значение корреляции также оказывает влияние размер дефекта. В ходе экспериментов при обработке более 20000 кадров исследуемых видеопоследовательностей, не содержащих какие-либо дефекты, установлено пороговое значение критерия сходства как $R=0,65$ с учётом возможного колебания яркости. Это значение является пороговым значением критерия сходства для выявления наличия или отсутствия дефекта на кадре. Возможно снижение порогового значения критерия сходства, так как слегка окисленная поверхность в зоне сварки является допустимой.

Было известно, что одна из исследуемых видеопоследовательностей, состоящая из 2015 кадров со сварными соединениями, содержит 278 кадров с видимыми дефектами несплавления металла, в том числе с их фрагментами. При проверке работоспособности предложенного алгоритма было определено 216 кадров по пороговому значению критерия сходства, содержащих дефекты. Автоматически выполнена сегментация дефектной области. Для получения бинарного изображения экспериментально было установлено пороговое значение равное 50. Метод Otsu для автоматического определения порога бинаризации не дал хороших результатов. Для объединения сегментов в бинарном изображении использовалась морфологическая операция закрытия с размером ядра 9×9 , фильтрация мелких областей меньше 500 пикселей. При проведении экспериментов были выделены дефектные области прямоугольной рамкой на всех выявленных кадрах. На кадрах, содержащих начальные или конечные фрагменты дефектов, не были автоматически обнаружены дефектные области, так как размеры фрагментов дефектов малы по количеству пикселей.

Оценить качество классификации можно, используя функцию Ассигасу (правильность), которая определяет долю правильных ответов [15]. В рассматриваемом случае значение функции Ассигасу составляет 96,9 %.

На рис. 6 видны некоторые результаты работы алгоритма автоматического обнаружения дефектов сварных соединений на кадрах видеопоследовательностей.

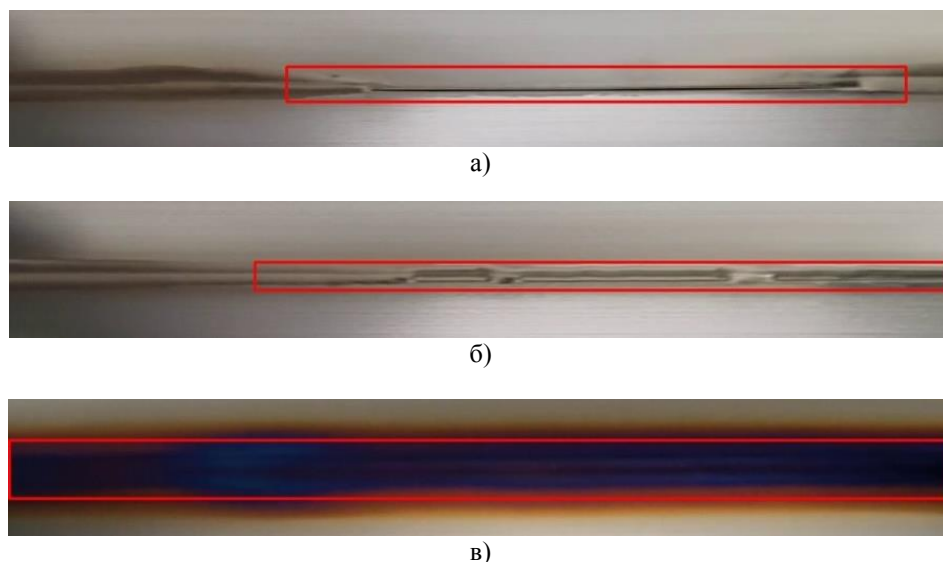


Рисунок 6. Результаты автоматического обнаружения дефектов сварных соединений на кадрах видеопоследовательностей: несплавление металла (а), (б); сильное окисление металла (в)

Заключение. Проведённые исследования показали, что предложенный алгоритм позволяет решить задачу автоматического обнаружения дефектных областей в сварных соединениях на кадрах видеопоследовательностей. Если дефект незначительный по количеству пикселей, то произойдёт пропуск при обработке кадра.

Предложенный алгоритм имеет несколько недостатков: высокая чувствительность к случайному изменению освещения, следовательно, при получении кадров видеопоследовательности требуется изолирование объекта контроля от каких-либо воздействий; отсутствует определение класса дефекта, алгоритм позволяет только обнаруживать дефектную область.

В дальнейшем, после обнаружения на кадрах видеопоследовательностей дефектных областей, предполагается автоматическая множественная классификация дефектов, а именно, распознавание таких дефектов как несплавление, окисление, прожог.

Список литературы

1. ISO 17637:2016. Non-destructive testing of welds – Visual testing of fusion-welded joints.
2. ГОСТ Р ИСО 17637-2014. Контроль неразрушающий. Визуальный контроль соединений, выполненных сваркой плавлением; введ. 2016-01-01. – М.: Стандартиформ, 2015.
3. ISO 6520-1:2007. Welding and allied processes – Classification of geometric imperfections in metallic materials – Part 1: Fusion welding.
4. ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012. Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов геометрии и сплошности в металлических материалах. Часть 1. Сварка плавлением; введ. 2014-01-01. – М.: Стандартиформ, 2014.
5. Hou W., Zhang D., Wei Y., Guo J., Zhang X. Review on computer aided weld defect detection from radiography images // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10, No. 5, pp. 1878. DOI: 10.3390/app10051878.
6. Муравьев С.В., Погадаева Е.Ю. Автоматизированное распознавание дефектов сварных соединений при визуальном контроле с использованием геометрических признаков // *Дефектоскопия*. – 2020. – № 3. – С. 49-57. DOI: 10.31857/S0130308220030069.
7. Sun J., Li C., Wu X.J., Palade V., Fang W. An effective method of weld defect detection and classification based on machine vision // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2019. – Vol. 15, pp. 6322-6333. DOI: 10.1109/TII.2019.2896357.
8. Sassi P., Tripicchio P., Avizzano C.A. A smart monitoring system for automatic welding defect detection // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2019. – Vol. 66, No. 12, pp. 9641-9650. DOI: 10.1109/TIE.2019.2896165.
9. Davies E.R. *Computer Vision: Principles, Algorithms, Applications, Learning*. – 5th Edition. – Academic Press, 2018. – 879 p. – ISBN 978-0-12-809284-2.
10. Dawson-Howe K. *A practical introduction to computer vision with OpenCV*. – Wiley, 2014. – 217 p. – ISBN: 9781118848456.
11. Zimmermann T., Ciuti G., Milazzo M., Chiurazzi M., Roccella S., Oddo C.M., Dario P. Visual-Based Defect Detection and Classification Approaches for Industrial Applications – A SURVEY // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, pp. 1459. DOI: 10.3390/s20051459.
12. Sun X., Gu H., Tang S., Li J. Research Progress of Visual Inspection Technology of Steel Products – A Review // *Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 8, pp. 2195. DOI: 10.3390/app8112195.
13. Емельянова М.Г., Бакланова О.Е. Исследование методов бинаризации для решения задачи автоматического обнаружения дефектов сварных соединений // *Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева*. – 2020. – № 3. – С. 90-94. DOI: 10.51885/15614212_2020_3_90.
14. Pare S., Kumar A., Singh G., Bajaj V. Image Segmentation Using Multilevel Thresholding: A Research Review // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 44. DOI: 10.1007/s40998-019-00251-1.

15. Старовойтов В.В., Голуб Ю.И. Сравнительный анализ оценок качества бинарной классификации // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 1. – С. 87–101. DOI: 10.37661/1816-0301-2020-17-1-87-101.

References

1. ISO 17637:2016. Non-destructive testing of welds – Visual testing of fusion-welded joints.
 2. GOST R ISO 17637-2014. Kontrol' nerazrushayushchij. Vizual'nyj kontrol' soedinenij, vypolnennyh svarkoj plavleniem; 2016-01-01. – M.: Standartinform, 2015.
 3. ISO 6520-1:2007. Welding and allied processes – Classification of geometric imperfections in metallic materials – Part 1: Fusion welding.
 4. GOST R ISO 6520-1-2012. Svarka i rodstvennye processy. Klassifikaciya defektov geometrii i sploshnosti v metallicheskih materialah. CHast' 1. Svarka plavleniem; 2014-01-01. – M.: Standartinform, 2014.
 5. Hou W., Zhang D., Wei Y., Guo J., Zhang X. Review on computer aided weld defect detection from radiography images // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10, No. 5, pp. 1878. DOI: 10.3390/app10051878.
 6. Murav'ev S.V., Pogadaeva E.YU. Avtomatizirovannoe raspoznavanie defektov svarnyh soedinenij pri vizual'nom kontrole s ispol'zovaniem geometricheskikh priznakov // *Defektoskopiya*. – 2020. – № 3. – S. 49-57. DOI: 10.31857/S0130308220030069.
 7. Sun J., Li C., Wu X.J., Palade V., Fang W. An effective method of weld defect detection and classification based on machine vision // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2019. – Vol. 15, pp. 6322-6333. DOI: 10.1109/TII.2019.2896357.
 8. Sassi P., Tripicchio P., Avizzano C.A. A smart monitoring system for automatic welding defect detection // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2019. – Vol. 66, No. 12, pp. 9641-9650. DOI: 10.1109/TIE.2019.2896165.
 9. Davies E.R. *Computer Vision: Principles, Algorithms, Applications, Learning*. – 5th Edition. – Academic Press, 2018. – 879 p. – ISBN 978-0-12-809284-2.
 10. Dawson-Howe K. *A practical introduction to computer vision with OpenCV*. – Wiley, 2014. – 217 p. – ISBN: 9781118848456.
 11. Czimmermann T., Ciuti G., Milazzo M., Chiurazzi M., Roccella S., Oddo C.M., Dario P. Visual-Based Defect Detection and Classification Approaches for Industrial Applications – A SURVEY // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, pp. 1459. DOI: 10.3390/s20051459.
 12. Sun X., Gu H., Tang S., Li J. Research Progress of Visual Inspection Technology of Steel Products – A Review // *Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 8, pp. 2195. DOI: 10.3390/app8112195.
 13. Emel'yanova M.G., Baklanova O.E. Issledovanie metodov binarizacii dlya resheniya zadachi avtomaticheskogo obnaruzheniya defektov svarnyh soedinenij // *Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan technical university*. – 2020. – № 3. – С. 90-94. DOI: 10.51885/15614212_2020_3_90.
 14. Pare S., Kumar A., Singh G., Bajaj V. Image Segmentation Using Multilevel Thresholding: A Research Review // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 44. DOI: 10.1007/s40998-019-00251-1.
 15. Starovoitov V.V., Golub Yu.I. Comparative study of quality estimates of binary classification // *Informatics*. – 2020. – Vol. 17, No. 1. – pp. 87–101. DOI: 10.37661/1816-0301-2020-17-1-87-101.
-
-