



ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ СЕГМЕНТАЦИИ РЕНТГЕНТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СВАРНЫХ ШВОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ

Я. П. ЛАЗОРЕНКО, Е. В. ШАПОВАЛОВ, Т. Г. СКУБА, Д. Д. ТОПЧЕВ, Ф. С. КЛИЩАР

Предложено три новых алгоритма сегментации цифровых рентгентелевизионных изображений сварных швов, которые предназначены для автоматического обнаружения дефектов. Данные алгоритмы основаны на адаптивных методах пороговой обработки. Показано, что оптимальное значение порога устанавливается для каждой точки изображения на основе свойств ее локальной окрестности. Для выбора оптимального порогового значения использованы следующие критерии: среднеквадратический, моментный и энтропийный. Экспериментальное исследование показало эффективность предложенных алгоритмов сегментации, что делает возможным их применение в системах автоматизированного рентгентелевизионного контроля.

Three new algorithms of segmentation of digital X-Ray TV images of welds have been proposed, which are designed for automatic defect detection. These algorithms are based on adaptive methods of threshold treatment. In these methods the optimum threshold value is set for each image point based on the properties of its local vicinity. Selection of the optimum threshold value was performed on the basis of the following criteria: mean root square, instant and entropy. Experimental study has shown the effectiveness of the proposed segmentation algorithms, which enables their application in systems of automated X-Ray TV inspection.

В настоящее время ведутся интенсивные работы по созданию систем автоматизированного рентгеновского контроля [1–5]. Основной целью исследований является синтез эффективных алгоритмов расшифровки рентгеновских изображений, обеспечивающих надежное обнаружение и идентификацию дефектов сварного шва. Однако к настоящему времени систему, пригодную для внедрения в производство, реализовать пока не удалось.

Целью данной статьи является исследование эффективности новых алгоритмов сегментации рентгентелевизионных изображений сварных швов, предназначенных для автоматического обнаружения дефектов.

В существующих подходах к обнаружению дефектов сварных швов на рентгеновских изображениях цифровая обработка обычно осуществляется в два этапа [1, 3, 5]. На первом выполняется сегментация рентгеновского изображения. Сегментация представляет собой отделение областей изображения, которые соответствуют дефектам сварного шва, от фона — нормальной структуры шва. Результатом сегментации является двухуровневое (бинарное) изображение, на котором одним уровнем яркости выделяются искомые области, а другим — фон. На втором этапе с помощью методов распознавания образов выполняется классификация выделенных областей на два класса: дефект и ложное обнаружение. На этом этапе из рассмотрения исключаются области, которые не содержат дефектов сварного шва.

Поскольку дефекты являются объектами, выделяющимися на более светлом (или темном) фоне, то для их обнаружения целесообразно применять методы пороговой обработки [6]. В методах пороговой обработки разметка точек изображения на два класса (объект и фон) осуществляется путем сравнения их яркости с некоторым порогом. Если на изображении искомые объекты (дефекты) представляют собой светлые области на более темном окружающем фоне, то при удачном выборе порога их яркость будет превышать пороговое значение, а уровень яркости фона будет ниже этого порога. Так как яркость изображения на разных участках шва, как правило, достаточно сильно изменяется, то на практике применяют методы локальной пороговой обработки, в которых порог выбирается отдельно для каждой точки изображения в зависимости от свойств ее локальной окрестности.

Применяемые в настоящее время алгоритмы сегментации рентгеновских изображений [2, 4, 5] основаны на выделении границ областей дефектов и адаптивной пороговой обработке и построены таким образом, что качество сегментации во многом определяется некоторыми изначально задаваемыми параметрами. Поэтому при одних и тех же значениях параметров для разных дефектов и изображений сварных швов эти алгоритмы могут давать разное качество сегментации. Так как методика выбора оптимальных значений параметров для данных алгоритмов отсутствует и подходящие значения выставляются «вручную», то обеспече-

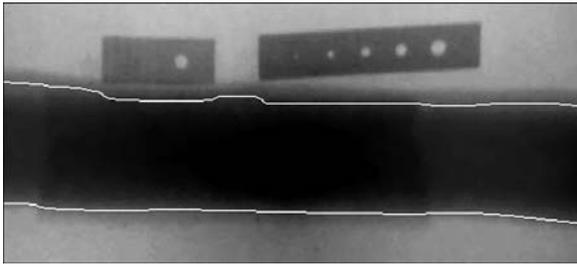


Рис. 1. Выделение области сварного шва с помощью разработанного алгоритма

ние высокого качества сегментации рентгеновских изображений, а следовательно, и корректности выделения дефектов, представляет определенную сложность.

Для обеспечения высокого качества сегментации рентгенотелевизионных изображений в данной работе предлагается использовать адаптивные алгоритмы пороговой обработки, которые способны найти наилучшее значение порога исходя только из распределения яркости на изображении и не требуют для корректности своей работы набора правильно заданных значений параметров.

Перед сегментацией в синтезированных в данной работе алгоритмах цифровой обработки на исходных изображениях осуществляется выделение области сварного шва. Процедура выделения сварного шва основана на алгоритмах пороговой обработки и выделения границ областей. На рис. 1 приведено рентгенотелевизионное изображение, на котором границы сварного шва выделены с помощью разработанного алгоритма белыми линиями. Последующая обработка цифровых изображений проводится в области сварного шва.

Для повышения качества сегментации выполнялась предварительная обработка исходных изображений, которая заключалась в сглаживании шума на изображении и повышении контраста. Для сглаживания шума применяли два пространственных фильтра: медианный [6] и так называемый сигма-фильтр [7]. Применение медианного фильтра обусловлено тем, что он эффективно устраняет импульсный шум, и при этом приводит к меньшему размытию изображения, чем линейные сглаживающие фильтры с маской того же размера [6]. После подавления импульсного шума медианным фильтром осуществлялась фильтрация сигма-фильтром, который сглаживает только однородные по яркости (согласно определенному критерию) участки изображения. Благодаря этому сглаживание и подавление шума выполняется только в областях, соответствующих нормальной структуре сварного шва, а области изображения со значительными перепадами яркости, в которых находятся дефекты, остаются неискаженными.

Медианный фильтр [6] представляет собой пространственный фильтр, который заменяет зна-

чение яркости в заданной точке изображения на медиану ряда яркостей пикселей, лежащих в локальной окрестности этой точки, покрываемой маской фильтра. При этом центральный элемент маски находится в точке, в которой выполняется замена яркости, а маска должна состоять из нечетного количества элементов. Медианой последовательности чисел, состоящей из нечетного количества элементов N , называется тот ее элемент, для которого существует $(N - 1)/2$ элементов, меньших или равных ему по величине, и $(N - 1)/2$ элементов, больших или равных ему по величине. Если последовательность чисел, состоящую из нечетного количества элементов, упорядочить по возрастанию или убыванию, то медианой будет элемент, лежащий в ее центре. Обработка цифрового изображения медианным фильтром состоит в проходе маской фильтра по всем точкам изображения и замещении яркостей точек соответствующими медианами. В данной работе использовали медианный фильтр с квадратной маской размером 3×3 точки изображения. Данный фильтр подавляет характерный для рентгенотелевизионных изображений импульсный шум размером $1 \dots 4$ точки.

Сигма-фильтр [7] представляет собой простейший усредняющий фильтр, осуществляющий сглаживание только однородных по яркости участков изображения, не искажая области с достаточно большими перепадами яркости, в которых могут быть дефекты сварного шва. Яркость заданной точки изображения $f(x, y)$ (f — функция яркости) заменяется на среднее значение яркости μ ее локальной окрестности, если $f(x, y) - \mu > 2k\sigma$ и $N \leq N_{\text{ш}}$, где σ — среднеквадратическое отклонение шума на изображении; k — регулировочный параметр, $k \approx 1$; N — количество точек (i, j) локальной окрестности, для которых выполняется условие $f(i, j) - \mu > 2k\sigma$; $N_{\text{ш}}$ — максимальный размер импульсного шума. В данной работе оценка σ для заданного рентгенотелевизионного изображения делается следующим образом. Область сварного шва на изображении разбивается на блоки размером 20×20 точек. Для каждого из этих блоков вычисляется среднеквадратическое отклонение. Значение σ вычисляется как медиана последовательности этих среднеквадратических отклонений. На рис. 2 приведен результат обработки сигма-фильтром фрагмента рентгенотелевизионного изображения. Фильтрация осуществлялась со следующими значениями параметров: локальная окрестность размером 9×9 точек; $N_{\text{ш}} = 20$; $k = 1,0$.

Для повышения контраста рентгенотелевизионных изображений использовали операцию линейного контрастирования [6], которая заключается в линейном растяжении диапазона яркости изображения на полный динамический диапазон, благодаря чему увеличивается контрастность



изображения. Применение этой процедуры связано с тем, что яркость на исходном рентгеновизуальном изображении распределена только на каком-то одном ограниченном участке полного динамического диапазона. После линейного контрастирования повышается общий контраст изображения.

Кроме перечисленных выше процедур цифровой обработки в качестве метода, позволяющего улучшить результаты сегментации, в данной работе исследовали метод вычитания фона [3]. С помощью этого метода осуществляется устранение фоновой составляющей изображения с сохранением информации о дефектах. Процедура вычитания фона состоит в том, что из исходного изображения формируется так называемое изображение фона, на котором исключены или сильно сглажены изображения дефектов. Потом изображение фона вычитается из исходного изображения. На полученном в результате бесфоновом изображении в областях без дефектов уровень яркости приблизительно нулевой (присутствует некоторая шумовая составляющая), а там, где есть дефекты, яркость сохраняется на уровне разности между яркостью дефекта и окружающего его фона. Таким образом, на бесфоновом изображении дефекты могут быть отличены от фона по уровню яркости, а значение яркости может интерпретироваться как мера отклонения от нормальной структуры сварного шва.

Для формирования изображения фона применяли медианную фильтрацию с квадратной маской. Если маска фильтра имеет размеры $N \times N$, то на изображении фона будут исключены дефекты с площадью не более половины площади маски, т.е. дефекты, площадь которых не превышает $N^2/2$ точек изображения. Также корректно будет исключен любой дефект большего размера, если каждый его фрагмент, в процессе фильтрации попадающий в маску фильтра, по площади не превышает $N^2/2$ точек. Все остальные дефекты, не удовлетворяющие перечисленным выше условиям, при вычислении фона исключены не будут, что приведет к их искажению на бесфоновом изображении. В данной работе использовали маску медианного фильтра размером 17×17 , обеспечивающую правильное выявление дефектов, имеющих площадь, не превышающую 144 точки изображения. Такая площадь соответствует размеру дефекта 12×12 точек. На рис. 3 показано изображение, полученное в результате применения процедуры вычитания фона. Для наглядности к преобразованному изображению было применено также линейное контрастирование.

Предложенные алгоритмы сегментации рентгеновизуальных изображений основаны на методах локальной пороговой обработки. Значение порога вычисляется для каждой точки изображения на основе гистограммы распределения яркос-

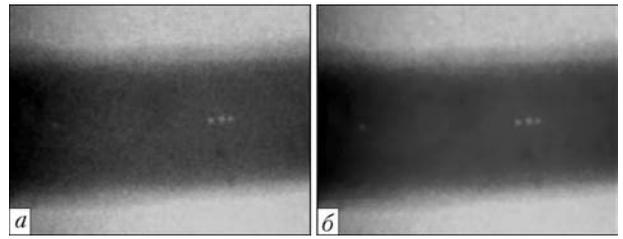


Рис. 2. Применение сигма-фильтра для подавления шума: *a* — исходное изображение; *б* — преобразованное

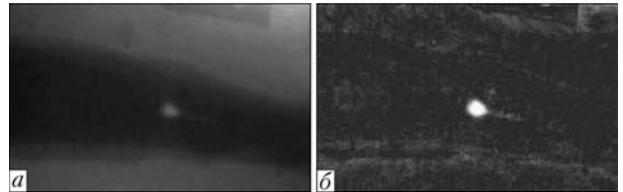


Рис. 3. Процедура вычитания фона: *a* — исходное изображение; *б* — преобразованное

ти в локальной окрестности этой точки. Оптимальный пороговый уровень разделяет гистограмму на две части, которые соответствуют дефекту и фону. Такое разделение гистограммы может быть сделано только в том случае, если гистограмма не является унимодальной, т. е. содержит более чем один локальный максимум. Поэтому в разработанных в данной работе алгоритмах сегментации перед выбором порога для заданной точки изображения осуществляется проверка гистограммы на наличие более чем одного локального максимума. Если гистограмма содержит один локальный максимум, то принимается решение, что соответствующая точка принадлежит фону. Если локальных максимумов более одного, то выполняется пороговая обработка.

В данной работе исследовали три адаптивных алгоритма пороговой обработки, каждому из них соответствует определенный критерий выбора оптимального порога. В этих алгоритмах использовали следующие критерии выбора порога: среднеквадратический, моментный и энтропийный.

Метод пороговой обработки, в котором используется среднеквадратический критерий выбора порога, описан в работе [8]. В нем рассматривается аппроксимация исходного изображения двухуровневым: $S(x, y) \in \{a_0, a_1\}$, ($a_0 < a_1$). Согласно этому методу наилучшему порогу соответствует такой, при котором среднеквадратическое отклонение $\sigma(a_0, a_1, t)$ сегментированного изображения от исходного является наименьшим. Квадрат среднеквадратического отклонения:

$$\sigma^2(a_0, a_1, t) = \sum_{i=1}^{t-1} (i - a_0)^2 p_i + \sum_{i=t}^L (i - a_1)^2 p_i, \quad (1)$$

где t — значение порога; L — количество уровней яркости исходного цифрового изображения; p_i — значение гистограммы яркости исходного изоб-



ражения для i -го уровня яркости.

Гистограмма яркости рассматривается как оценка распределения вероятностей:

$$p_i = n_i/n; \quad i = 1, 2, \dots, L; \quad p_i > 0; \quad \sum_{i=1}^L p_i = 1, \quad (2)$$

где n_i — количество точек изображения, имеющих яркость i ; n — общее количество точек изображения.

В работе [7] доказано, что

$$\sigma^2(t) = \min_{a_0, a_1} \sigma^2(a_0, a_1, t) = \sigma^2(\mu_0, \mu_1, t) \sum_{i=1}^{t-1} (i - \mu_0)^2 p_i + \sum_{i=t}^L (i - \mu_1)^2 p_i, \quad (3)$$

где

$$\mu_0 = \frac{1}{\omega_0} \sum_{i=1}^t i p_i; \quad \mu_1 = \frac{1}{\omega_1} \sum_{i=t+1}^L i p_i; \quad (4)$$

$$\omega_0 = \sum_{i=1}^t p_i; \quad \omega_1 = \sum_{i=t+1}^L p_i.$$

Следовательно, оптимальному порогу t^* соответствует наименьшее значение $\sigma^2(t)$.

Моментный критерий выбора порога [8] основан на рассмотрении моментов m_j от первого до третьего порядка исходного изображения $f(x, y)$:

$$m_j = \sum_{i=1}^L (i)^j p_i, \quad j = 1, 2, 3. \quad (5)$$

Оптимальным считается порог, обеспечивающий равенство соответствующих моментов сегментированного и исходного изображений. Моменты сегментированного изображения $g(x, y)$ имеют вид:

$$m'_j = \sum_{l=0}^1 (a_l)^j \omega_l, \quad j = 1, 2, 3, \quad (6)$$

где a_0, a_1 — представительные уровни яркости сегментированных областей $S(x, y)$. Оптимальное значение порога t^* определяется из условия $m'_j = m_j$ для $j = 1, 2, 3$.

Принимая во внимание, что $\omega_0 + \omega_1 = 1$, условие равенства первых трех моментов можно записать в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} \omega_0 + \omega_1 &= 1, \quad \omega_0 a_0 + \omega_1 a_1 = m_1, \\ \omega_0 a_0^2 + \omega_1 a_1^2 &= m_2, \quad \omega_0 a_0^3 + \omega_1 a_1^3 = m_3. \end{aligned} \quad (7)$$

В рассматриваемом случае алгоритм решения системы (7) сводится к решению системы линейных уравнений относительно вспомогательных переменных b_0 и b_1 :

$$\begin{aligned} b_0 + b_1 m_1 &= -m_2, \\ b_0 m_1 + b_1 m_2 &= -m_3, \end{aligned} \quad (8)$$

решению квадратного уравнения $a^2 + b_1 a + b_0 = 0$, дающего значения представительных уровней яркости a_0, a_1 , и, наконец, к подстановке этих значений в первые два уравнения (7) для получения значений ω_0 и ω_1 . Значение ω_0 позволяет определить оптимальный порог t^* , минимальный из удовлетворяющих неравенству:

$$\omega_0 \leq \sum_{i=1}^t p_i. \quad (9)$$

Энтропийный критерий к выбору порога [8] состоит в следующем. Если изображение состоит из двух классов однородных по яркости точек, то оптимальным порогом t^* , разбивающим изображение на эти два класса, будет порог, при котором энтропии распределений яркости полученных частей изображения будут максимальны. Энтропии H_0 и H_1 каждого из этих распределений определяются выражениями:

$$H_0 = \log_2 \omega(t) + \frac{H(t)}{\omega(t)}, \quad (10)$$

$$H_1 = \log_2 [1 - \omega(t)] + \frac{H(L) - H(t)}{1 - \omega(t)}, \quad (11)$$

где $H(t) = - \sum_{i=1}^t p_i \log_2 p_i$, $H(L) = - \sum_{i=1}^L p_i \log_2 p_i$ — частичная и полная энтропии гистограммы $\{p_i\}$, $i = 1 \dots L$; $\omega(t) = \sum_{i=1}^t p_i$.

Для нахождения наилучшего значения порога используется следующая критериальная функция:

$$\psi(t) = H_0 + H_1. \quad (12)$$

Поскольку каждое из слагаемых H_0 и H_1 характеризует равномерность распределения яркостей на соответствующих интервалах и резко уменьшается при попадании в данный интервал «чужого» фрагмента гистограммы, максимум функции $\psi(t)$, достигаемый при некотором значении t^* , будет соответствовать наилучшему варианту сегментации.

Результаты сегментации фрагмента рентгено-телевизионного изображения с помощью трех предложенных алгоритмов пороговой обработки



приведены на рис. 4. В качестве локальной окрестности при выборе порога использовали окно размером 11×11 точек изображения.

Для оценки эффективности предложенных алгоритмов сегментации рентгенотелевизионных изображений провели экспериментальное исследование, в котором оценивали качество сегментации набора тестовых изображений. В качестве тестовых образцов использовали четыре цифровых рентгенотелевизионных изображения сварных швов труб большого диаметра (рис. 5), предоставленных Харцызским трубным заводом. Разработанные алгоритмы цифровой обработки были реализованы в виде программного модуля на языке C++.

Оценку качества сегментации тестовых изображений проводили на основе следующих критериев:

- на результирующем бинарном изображении должны быть выделены все дефекты;
- форма выделенных дефектов на бинарном изображении должна соответствовать форме дефектов на исходном изображении.

Степень соответствия формы выделенных областей на бинарном изображении форме дефектов на исходном изображении оценивали визуально.

Предварительную обработку тестовых изображений выполняли в такой последовательности: медианная фильтрация; сигма-фильтрация; линейное контрастирование; вычитание фона.

Полученные после сегментации бинарные изображения обрабатывали медианным фильтром с маской размером 3×3 для исключения отдельных шумовых точек.

В результате проведенных исследований установлено, что все три алгоритма сегментации рентгенотелевизионных изображений корректно (согласно двум сформулированным выше критериям) выделяют области с дефектами. На тестовых изображениях были выделены все дефекты. Форма выделенных областей соответствовала (с точки зрения визуальной оценки) форме изображений самих дефектов. Все три алгоритма при проверке на тестовых изображениях показали одинаковое качество сегментации. На рис. 6 приведен результат сегментации одного тестового изображения с помощью трех предложенных алгоритмов сегментации.

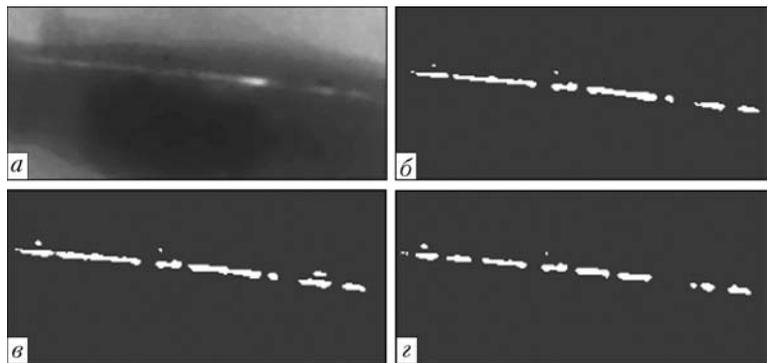


Рис. 4. Адаптивная пороговая обработка с помощью трех предложенных алгоритмов: *a* — исходное изображение; *б* — выбор порога по среднеквадратическому критерию; *в* — моментный подход к выбору порога; *г* — энтропийный метод выбора порога

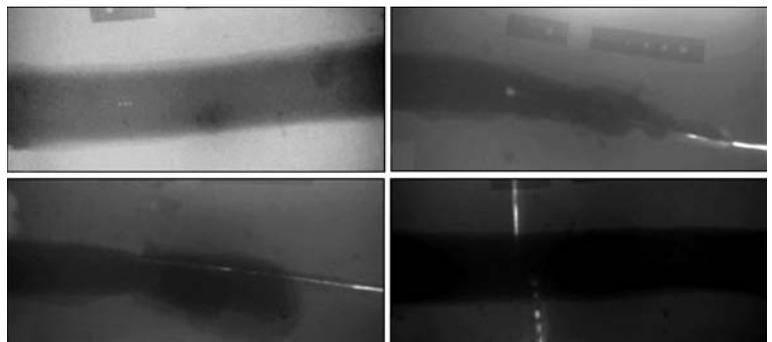


Рис. 5. Тестовые изображения сварных швов, которые использовались для оценки эффективности предложенных алгоритмов сегментации рентгенотелевизионных изображений

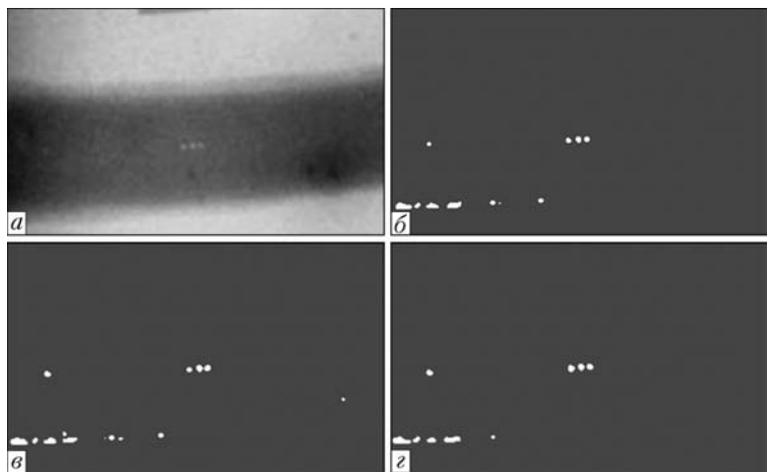


Рис. 6. Результат сегментации тестового изображения с помощью трех предложенных алгоритмов с применением вычитания фона: *a* — исходное изображение; *б* — среднеквадратический алгоритм; *в* — моментный алгоритм; *г* — энтропийный алгоритм

Исходя из проведенных исследований можно сделать выводы, что предложенные алгоритмы сегментации рентгенотелевизионных изображений сварных швов являются эффективными. Высокая эффективность данных алгоритмов делает перспективным их применение для обнаружения дефектов сварных швов в системах автоматизированного рентгенотелевизионного контроля.

1. Лазоренко Я. П. Автоматическое распознавание дефектов на радиационных изображениях сварных швов (Об-



- зор) // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 3. — С. 31–37.
2. *Alghalandis S., Alamdari G.* Welding defect pattern recognition in radiographic images of gas pipelines using adaptive feature extraction method and neural network classifier // 23rd World gas conference, 2006.
 3. *Wang G., T. W. Liao.* Automatic identification of different types of welding defects in radiographic images // NDT&E International. — 2002. — № 35. — P. 519–528.
 4. *Weld defect detection in industrial radiography based digital image processing / N. Nacereddine, M. Zelmat, S. S. Belaiifa, M. Tridi* // Proc. of world academy of science, engineering and technology. — 2005. — January. — 2. — ISSN 1307-6884.
 5. *Mery D., Berti M. A.* Automatic detection of welding defects using texture features // Intern. symp. on computed tomography and image processing for industrial radiology, 2003.
 6. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2006. — 1072 с.
 7. *Бакут П. А., Колмогоров Г. С.* Сегментация изображений: методы выделения границ областей // Зарубежная радиоэлектроника. — 1987. — № 10. — С. 25–47.
 8. *Бакут П. А., Колмогоров Г. С., Ворновицкий И. Э.* Сегментация изображений: методы пороговой обработки // Там же. — 1987. — № 10. — С. 6–24.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
Киев

Поступила в редакцию
10.10.2008

Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. посібник. У 3 т. — Київ: Наук. думка, 2009.

Т.1. Теоретичні основи методу акустичної емісії. — 287 с.

У монографії викладено основи поширення пружних хвиль у твердому тілі з позицій теорії пружності. Описано особливості їх проходження у стрижнях і пластинах, взаємодії з різними включеннями, несучільностями, вільними поверхнями. Класифіковано й детально описано найпоширеніші типи пружних хвиль, які застосовують для проведення неруйнівного контролю методом акустичної емісії з метою діагностування виробів та елементів конструкцій. На засадах основних положень механіки руйнування викладено взаємозв'язок зародження й розвитку тріщин у твердих тілах із хвильовими процесами, які супроводжують ці явища. Наведено розрахункові моделі та розв'язки низки нестационарних динамічних задач теорії тріщин, проілюстровано залежності між характеристиками тріщин і параметрами сигналів акустичної емісії.

Т.2. Методологія акустико-емісійного діагностування. — 263 с.

Розглянуто методичні особливості добору і реєстрування сигналів акустичної емісії в умовах лабораторних досліджень та експлуатації об'єктів контролю. Описано методики визначення міцнісних характеристик, статичної тріщиностійкості конструкційних матеріалів. Розглянуто методологічні основи оцінки їх об'ємної пошкодженості за параметрами акустичних сигналів. Показано інваріантність акустико-емісійного вимірювання об'ємного пошкодження матеріалів стосовно товщини матеріалу, способу його навантаження, типу випробовуваних зразків. Наведено методики встановлення базових характеристик конструкційних матеріалів для запропонованих критеріїв і моделей. Викладено методичний підхід, що ґрунтується на новому критерії оцінювання типів руйнування матеріалів на етапі субкритичного розвитку. Підтверджено ефективність створеного методологічного підґрунтя щодо визначення зародження і розвитку руйнування на різних конструкційних матеріалах: сталях (у вихідному стані й після тривалого експлуатування), чавунах, алюмінієвих сплавах, бетони, залізобетони, композитних матеріалах тощо.

Т.3. Засоби та застосування методу акустичної емісії. — 327 с.

Описано підходи до побудови акустико-емісійної апаратури різного функціонального призначення. Розглянуто особливості застосування первинних перетворювачів пружних хвиль у електричні сигнали, найуживаніші конструкційні матеріали для їх виготовлення, класифікацію перетворювачів за різними ознаками й особливостями конструкційного виконання. Наведено принципові електричні схеми основних вузлів і блоків портативних засобів відбору, обробки і зберігання акустико-емісійної інформації, отриманої під час виконання діагностичних робіт, опис їх функціонування та основні технічні характеристики. Продемонстровано ефективність методу на прикладі реального діагностування низки великогабаритних конструкцій тривалої експлуатації.

Для наукових працівників та інженерів-дослідників, а також аспірантів і студентів вищих навчальних закладів зі спеціальностей діагностика матеріалів і конструкцій, методи неруйнівного контролю, фізична акустика, механіка руйнування тощо.

3 питань придбання посібників звертатися за тел.: 0322-63-12-64, Скальський В. Р.