

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОГО АНИЗОТРОПНОГО ДИФFUЗНОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

© 2021 г. Е.Г. Базулин^{1,*}

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»
Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино»
*E-mail: bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 22.01.2021; после доработки 09.02.2021
Принята к публикации 19.02.2021

В настоящее время для повышения скорости подготовки протокола ультразвукового контроля и уменьшения влияния человеческого фактора активно разрабатываются системы распознавания (классификации) отражателей на основе искусственных нейронных сетей. Для их более эффективной работы изображения отражателей необходимо обработать с целью повышения отношения сигнал/шум изображения и его сегментации (кластеризации). Один из способов сегментации состоит в обработке изображения адаптивным анизотропным диффузным фильтром, который используется для обработки оптических изображений. В модельных экспериментах продемонстрирована эффективность применения данного текстурного фильтра для сегментации изображений отражателей, восстановленных по эхосигналам, измеренным с помощью антенных решеток.

Ключевые слова: антенная решетка, цифровая фокусировка антенной (ЦФА), Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), адаптивный анизотропный диффузный фильтр (2D или 3D AADF).

DOI: 10.31857/S0130308221050018

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие техники проведения ультразвукового неразрушающего контроля (УЗК) позволяет получать изображения отражателей с высокой скоростью, используя антенные решетки как по технологии фазированных решеток (ФАР) [1], так и по технологии цифровой фокусировки антенной (ЦФА) [2]. Совместная обработка эхосигналов, измеренных антенной решеткой при перемещении ее в направлении, поперечном сварному сведению, понижает уровень шума и повышает разрешающую способность изображения. Такой метод получения изображения будем называть ЦФА-Х. Тем не менее решение задачи определения типа отражателей по их изображению остается сложной задачей, так как далеко не всегда удается полностью восстановить границу отражателя. Например, изображение вертикально ориентированной трещины на прямом луче будет представлено в виде двух бликов, соответствующих ее краям. А боковое цилиндрическое отверстие (БЦО) будет представлено в виде одного блика большой амплитуды, соответствующего участку границы БЦО, и блика, сформированного волной обегания—соскальзывания. В ЦФА-технологии существуют приемы, позволяющие в определенных случаях восстанавливать всю границу отражателя [3]. Эти методы используют эхосигналы, отраженные от границ объекта контроля, и требуют «освещения» сварного соединения с двух сторон. К сожалению, часть сварных соединений имеют только односторонний доступ, и возможны ситуации, когда форма дна неизвестна или оно из-за точечной коррозии изъязвлено, и рассчитать отраженное поле очень сложно. В этом случае определение типа обнаруженного отражателя становится нетривиальной задачей. Добавим к этому наличие в изображении шума и ложных бликов. Неравномерное «освещение» области восстановления изображения (ОВИ) еще больше осложняет задачу анализа изображения отражателей. В результате время анализа изображения оператором может стать больше, чем время восстановления изображения. Таким образом, создание систем автоматизированного распознавания (классификации) отражателей по их изображениям — это актуальная задача, решение которой позволит повысить скорость подготовки протокола контроля и уменьшить влияние оператора на объективность определения типа отражателя и его размеров.

На рис. 1 представлена структурная схема системы распознавания типа отражателей. На первом этапе нужно повысить качество изображения (уменьшить уровень шума и повысить разрешающую способность), а на втором этапе провести сегментацию изображения, то есть выделить его характерные области с бликами отражателей и без оных. В теории обработки изображений для этих целей используются различные текстурные фильтры. Обычно работа с текстурными фильтра-

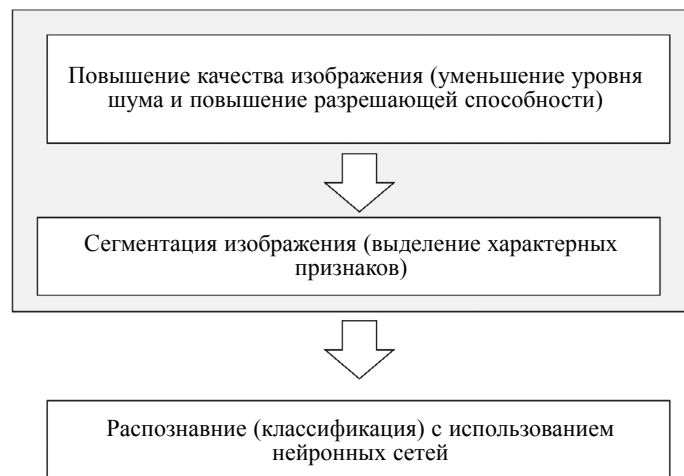


Рис. 1. Структурная схема системы распознавания образов.

ми приводит к уменьшению уровня шума. И, наконец, на третьем этапе происходит распознавание (классификация) образов отражателей. В настоящее время для этого используют искусственные нейронные сети (ANN) [4], которые с помощью технологии машинного обучения (ML) могут быть настроены для решения нужной задачи. Для классификации дефектов сварки эффективно использовать нейронные сети с функцией смещения (RBFNN) [5].

Как упоминалось выше, для эффективного решения задачи распознавания нужно специальным образом подготовить изображение отражателей. Один из этапов — это кластеризация (сегментация) изображения с использованием текстурного фильтра. В настоящий момент существует множество подходов к сегментации изображений. Приведенный ниже список не претендует на полный охват всех типов текстурных фильтров.

1. Адаптивный анизотропный диффузный фильтр (в зарубежной литературе 2D или 3D AADF) [6].
2. Модифицированный метод нечеткой кластеризации C-средних (в зарубежной литературе Modified Fast Fuzzy C-Means (MFFCM)) [7].
3. Построение матрицы яркостной зависимости (в зарубежной литературе Gray Level Co-Occurrence Matrix (GLCM)) [8].
4. Метод нечеткой логики второго типа (в зарубежной литературе 2D Band-let Transform (2D BT)) [9].
5. Алгоритм вычисления порога бинаризации для полутонового изображения (Otsu's method) [10].
6. Технология Deep Cluster (нейронные сети без обучения) [11].

Следует отметить, что в классической обработке изображений для улучшения контрастности часто используют метод выравнивания гистограмм (в зарубежной литературе Adaptive Mean Adjustment-Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (AMA-CLANE) [12]). Но тут возникает вопрос: «Окажется ли полезным «вытягивание» амплитуды бликов малых отражателей при наличии контрольного и браковочного уровня для конкретной методики контроля?». Полагаю, что развитие технологий распознавания несплошностей в сварных соединениях нивелирует эту методическую проблему — нейронная сеть будет находить отражатели и классифицировать их, не опираясь на контрольный и браковочные уровни.

Стремительное развитие технологий нейронных сетей позволяет предположить, что этапы повышения качества изображения, кластеризации и распознавания будут решаться обученной нейронной сетью одновременно, а не в соответствии со схемой на рис. 1. В этом случае структурная схема системы распознавания вырождается в один единственный квадрат «Распознавание (классификация) с использованием нейронных сетей».

1.1. Адаптивный анизотропный диффузный фильтр (2D или 3D AADF)

Из всех упомянутых выше текстурных фильтров рассмотрим адаптивный анизотропный диффузный фильтр для кластеризации изображения. Такой выбор объясняется изяществом идеи, лежащей в его основе — авторам статьи [6] удалось провести аналогию между методом обработки

изображения и процессом диффузии (распространения тепла). Процесс диффузии при постоянной температуре описывается следующим уравнением [13]:

$$\frac{\partial u(x, z, t)}{\partial t} = \operatorname{div} (D(x, z) \nabla u(x, z, t)), \quad (1)$$

где $D(x, z)$ — коэффициент диффузии; $u(x, z, t)$ — плотность диффундирующего вещества; $u(x, z, t = 0) = u_0(x, z)$ — начальное распределение плотности. Решая явным численным образом уравнение (1), можно наблюдать за процессом диффузии, то есть за трансформацией исходного изображения $u_0(x, z)$. Однако что в этом случае подразумевать под «коэффициентом диффузии»? Было предложено связать коэффициент диффузии $D(x, z)$ с модулем градиента изображения $|\nabla u(x, z)|$: если на фрагменте изображения нет резких границ, то есть $|\nabla u(x, z)| \rightarrow 0$, то надо сделать так, чтобы $D(|\nabla u(x, z)|) \rightarrow 1$, что означает активную диффузию в этой области, и, наоборот, если на фрагменте изображения есть резкие перепады на границах бликов, то есть $|\nabla u(x, z)| \rightarrow \infty$, то в таких областях диффузии нет ($D(|\nabla u(x, z)|) \rightarrow 0$). При таком подходе в изменяющемся изображении $u(x, z, t)$ блики оказываются окружены границами с очень малым коэффициентом диффузии и диффундирующее вещество не может уйти из этой области. Если резких границ в изображении нет, то диффузия идет активно и плотность вещества выравнивается. Это ключевая особенность метода AADF. Ниже приведен квадратичный вариант определения функции $D(u(x, z))$:

$$D(u(x, z)) = \frac{1}{1 + (|\nabla u(x, z)| / K)^2}, \quad K > 0. \quad (2)$$

В работе [14] приведено шесть вариантов определения функции $D(u(x, z))$ через градиент.

Уравнение (1) существует и в 3D-постановке $u(x, z, y, t)$, что можно использовать при совместной обработке изображений отражателей восстановленных для разных положений антенной решетки как в направлении вдоль сварного соединения, так и в поперечном направлении (режим ЦФА-Х).

Для того, чтобы воспользоваться методом AADF, нужно определить два параметра: K_{opt} в формуле и время наблюдения за диффузией, которая выражается количеством итераций N_{opt} решения уравнения (1). Если в формуле коэффициент K выбрать очень маленьким, то процесс диффузии практически не будет проходить, так как $D(u(x, z)) \rightarrow 0$, если выбрать коэффициент K очень большим $D(u(x, z)) \rightarrow 1$, то плотность диффундирующего вещества за несколько итераций станет одинаковой по всей области, то есть будет получено равномерно «засвеченное» изображение и задача кластеризации не будет решена.

Для определения оптимального значения параметра K_{opt} был предложен следующий способ [6]. Для обрабатываемого изображения определяется максимальное значение модуля градиента ∇_{max} . Затем выбираются границы трех областей (рис. 2):

$P1$ — область не содержит границ бликов и описывает медленные градиентные части изображения $[0, \nabla_{s1}]$;

$P2$ — область аккумулирует «нечеткие» пиксели, которые не могут быть определены как границы бликов $[\nabla_{s2}, \nabla_{w}]$;

$P3$ — область является подмножеством пикселей, принадлежащих границам бликов $[\nabla_{w}, \nabla_{\text{max}}]$.

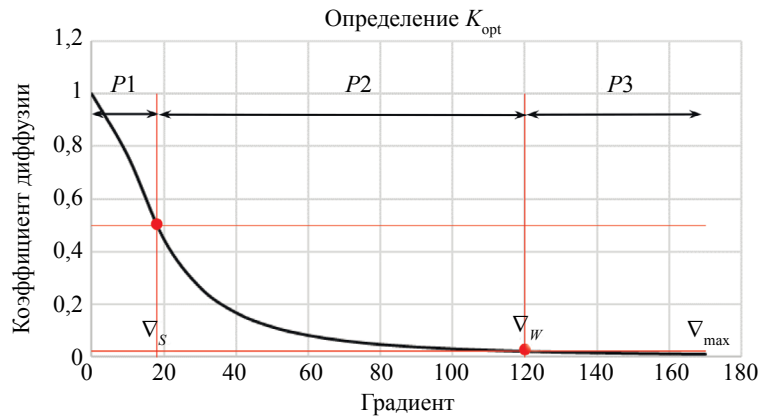
После определения перечисленных параметров выбирается K_{opt} , при котором график $D(u(x, z))$ пересекает точки, показанные на рис. 2 кругами красного цвета. К сожалению, в литературе не удалось обнаружить четких правил определения этих шести параметров, и в данной работе воспользоваться данным критерием не удалось.

Количество итераций, то есть временной интервал наблюдения за процессом диффузии («расплывания чернильных капель в воде»), определяется по формуле:

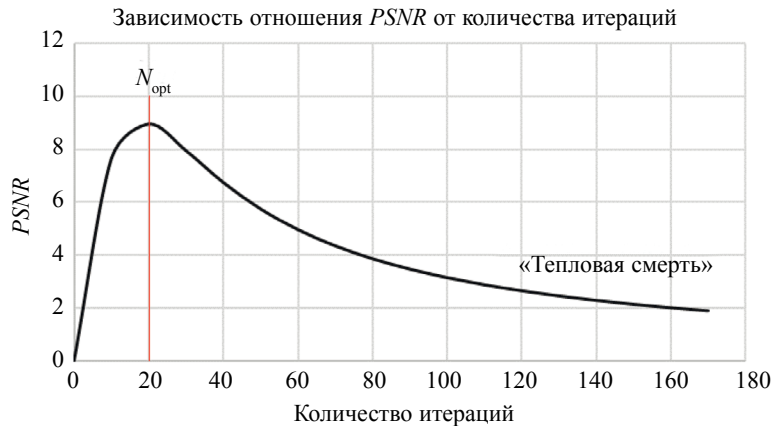
$$N_{\text{opt}} = \frac{PSNR}{\max(u(x, z, t_{\text{opt}}))}, \quad (3)$$

где $PSNR$ — максимальное пиковое соотношение сигнал/шум для текущей итерации. Понятно, что функция $PSNR$ имеет максимум, так как при большом времени наблюдения плотность диффундирующего вещества будет равномерна. Или учитывая то, что уравнение (1) описывает и процесс распространения тепла, наступит «тепловая смерть», то есть температура всей области станет одинаковой.

Можно провести следующую аналогию. Представим, что в неглубокую кювету в момент времени $t = 0$ одновременно падают капли чернил разного размера, которые заключены в оболочку с раз-

Рис. 2. К определению оптимального коэффициента K_{opt} .

ной проницаемостью. Часть капель, независимо от размера капли, символизирующих сфокусированные блики изображения, имеют слабо проницаемую оболочку $D(u(x, z)) \rightarrow 0$. Другая часть имеет легко проницаемые оболочки, то есть $D(u(x, z)) \rightarrow 1$. В момент времени $t_0 > 0$ фиксируется распределение плотности чернил $u_0(x, z)$ — это и есть обрабатываемое изображение. В статье [6] упоминается о том, что зная $u_0(x, z)$, можно решать уравнение в сторону уменьшения времени, и в момент времени $t = 0$ можно получить изображение $u(x, z, t = 0)$ со сверхразрешением. Однако в статье сказано, что расчет в сторону уменьшения времени неустойчив. В методе AADF начинают следить за изображением $u(x, z, t)$ при увеличении времени. Капли в легко проницаемых оболочках быстро растворятся в воде независимо от их размеров, а через трудно проницаемую оболочку чернила и вода будут диффундировать плохо. При неограниченно большом времени наблюдения в кювете растворятся все капли и чернила равномерно распределятся в воде.

Рис. 3. К определению оптимального числа итераций N_{opt} .

В статьях [15, 16] рассмотрено применение метода AADF для обработки изображений, полученных при проведении рентгеновского контроля.

2. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для регистрации эхосигналов в режиме двойного и тройного сканирования использовали дефектоскоп «АВГУР-АРТ», разработанный и изготовленный в Научно-производственном центре «ЭХО+» [17].

2.1. Образец трубопровода Ду800 с аустенитной ремонтной заваркой

В образце трубопровода Ду800 толщиной 38 мм с аустенитной ремонтной заваркой было просверлено три БЦО диаметром 2.2 мм, нумерованные выбитыми на поверхности образца цифрами

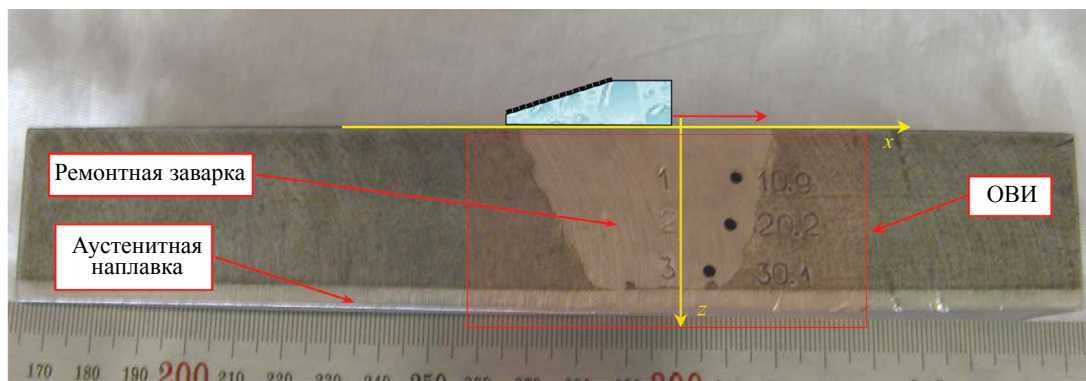


Рис. 4. Фотография образца трубопровода Ду800 с аустенитной ремонтной заваркой. Стрелкой красного цвета схематически показана апертура сканирования.

от 1 до 3 (рис. 4). Антенная решетка (2,25 МГц, 20 элементов, размер пьезоэлемента 1,1×10 мм, расстояние между краями элементов 0,1 мм) на призме 20 град перемещалась по поверхности образца 17 раз с шагом 0,98 мм (режим тройного сканирования) при фиксированном положении по оси y , направленной перпендикулярно плоскости рисунка.

На рис. 5 показано ЦФА-Х-изображение, на котором видны блики трех БЦО, дна образца и блик незаложеного отражателя — межваликового несплавления. ЦФА-Х-изображение было получено как когерентная сумма 17 парциальных ЦФА-изображений, восстановленных для каждого положения антенной решетки. Заварка обладает слабо выраженной анизотропией, что учитывалось при восстановлении ЦФА-Х-изображения [18]. Анизотропные свойства наплавки толщиной 5 мм не учитывались, так как изображение восстановилось только на прямом луче (акустическая схема LdL). На рисунок линиями красного цвета нанесены контуры образца, сварного соединения и трех БЦО.

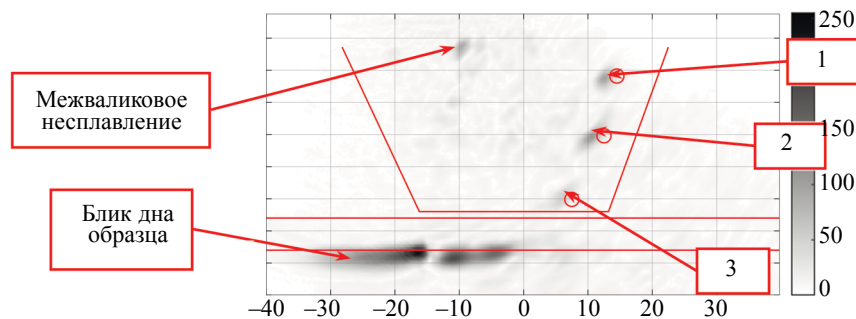


Рис. 5. ЦФА-Х-изображение ремонтной заварки и трех БЦО.

На рис. 6а показан результат обработки ЦФА-Х-изображения методом AADF в 2D-варианте. Фактически на изображении остались блики трех БЦО, межваликового несплавления и дна образца. Полученное изображение более пригодно для анализа как оператором, так и автоматизированной системой распознавания. Методы выделения контуров так же эффективнее сработают при обработке изображения на рис. 6а, нежели на рис. 5. На рис. 6б показан срез изображения вдоль пунктирной линии красного цвета на рис. 6а. Хорошо видно, что уменьшился «дребезг» изображения и четко обозначились области бликов БЦО 1, 2, 3 и дна образца, так как на их границах коэффициент диффузии $D(u(x, z)) \rightarrow 0$, что не позволило расплыться «чернильным пятнам». В пределах блика «чернилла» распределяются равномерно и изображение имеет примерно одинаковую амплитуду. Применение обычных сглаживающих фильтров уменьшит «дребезг», но приведет к размытию границ бликов.

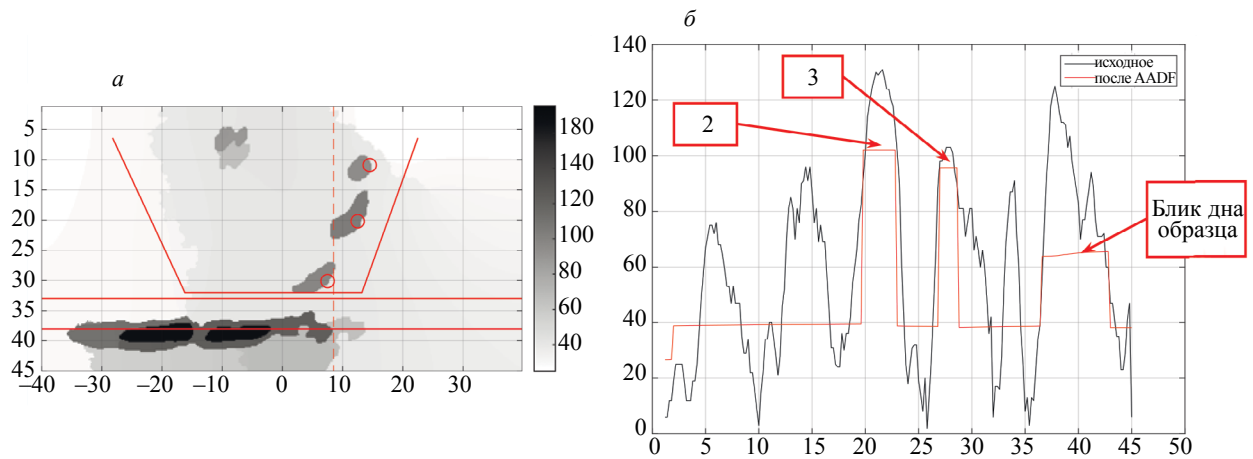


Рис. 6. Результат обработки ЦФА-Х-изображения методом AADF в 2D-варианте (а) и вертикальный срез обработанного изображения (б).

На рис. 7 представлен результат обработки ЦФА-Х-изображения методом AADF в 3D-варианте. Обработка проходила следующим образом: все 17 парциальных ЦФА-изображений, восстановленных для каждого положения антенной решетки, обрабатывались одновременно методом AADF в 3D-варианте, а объединенное изображение получалось как медиана всех парциальных изображений. Из-за совместной обработки 17-и парциальных ЦФА-изображений методом AADF на полученном изображении блики отражателей имеют более компактную форму по сравнению с изображением на рис. 6а.

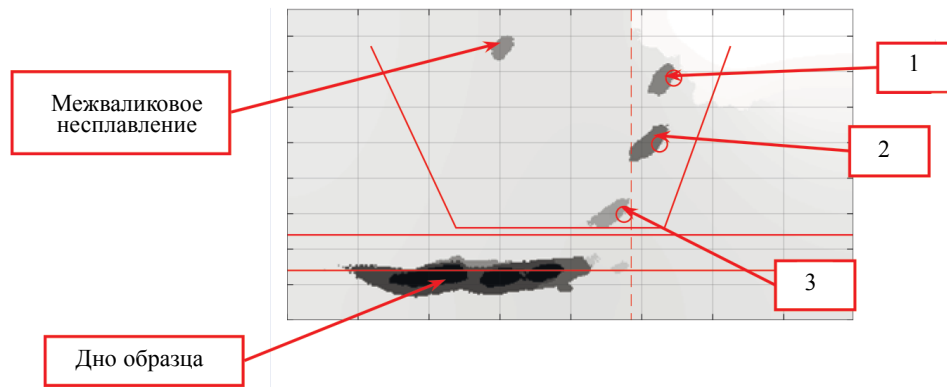


Рис. 7. Результат обработки ЦФА-Х-изображения методом AADF в 3D-варианте.

2.2. Усталостная трещина в фрагменте трубопровода Ду800

Измерения проводили на образце, сделанном из фрагмента трубопровода Ду800 толщиной 38 мм, в котором со стороны наплавки толщиной 5 мм был выфрезерован паз. В пазе была сделана затравка, в результате рассчитанного числа циклических нагрузок была выращена продольная усталостная трещина заданной высоты. Затем затравка была удалена и паз заварен. Изготовленный образец содержит в себе усталостную трещину, практически идентичную той, которая могла бы возникнуть в сварном соединении в результате эксплуатации. Эхосигналы регистрировались антенной решеткой (5 МГц, 32 элемента, размер пьезоэлемента $0,76 \times 10$ мм, расстояние между краями элементов 0,04 мм), установленной на рексолитовую 35-градусную призму. Антенная решетка перемещалась с шагом 2 мм вдоль сварного соединения для получения трехмерного изображения объекта контроля.

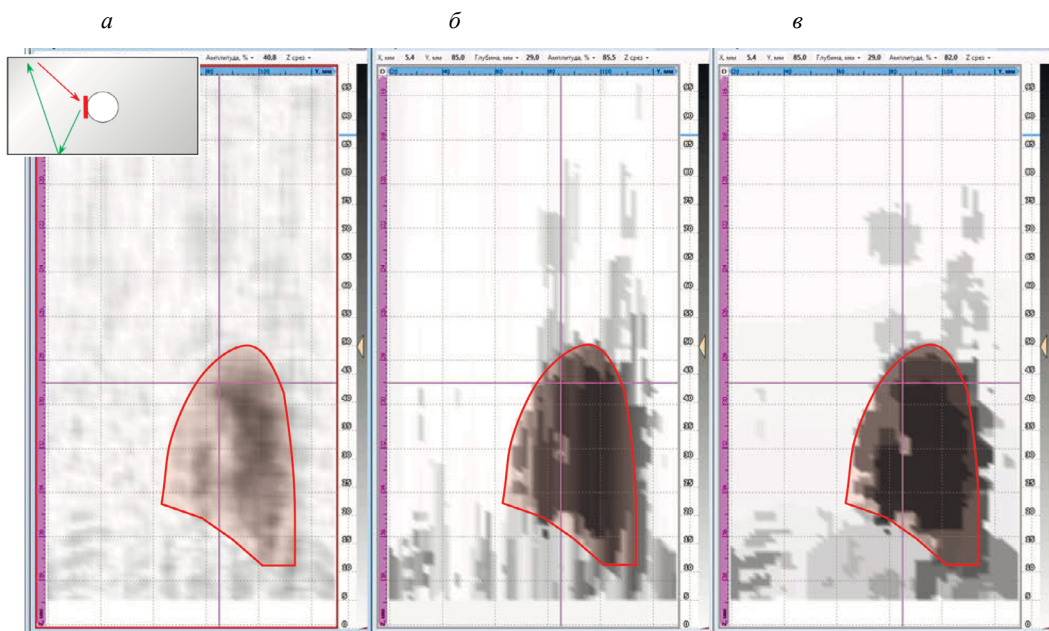


Рис. 8. Исходное ЦФА-изображение D-типа усталостной трещины (а), после обработки его методом AADF в 2D-варианте (б) и в 3D-варианте (в).

На рис. 8а представлено ЦФА-изображение D-типа усталостной трещины, восстановленное по акустической схеме SdLL, когда излучение происходит на поперечной волне, а прием — на продольной волне с однократным отражением от дна образца. В левом верхнем углу схематически показан ход лучей акустической схемы. Восстановленное изображение недостаточно высокого качества, так как по нему можно уверенно обнаружить вертикально расположенную трещину, но определить ее размеры достаточно сложно из-за невысокого отношения сигнал/шум. На рисунок наброшена предполагаемая маска трещины, границы которой были оценены в статье [19] при использовании прореженной антенной решетки. Следует отметить, что в обычно используемой цветной палитре блик трещины существенно заметнее. На рис. 8б показан результат обработки изображения методом AADF в 2D-варианте, когда каждое изображение вдоль оси y обрабатывалось независимо от соседних. Из-за возросшего отношения сигнал/шум блик трещины стал более заметен. А после применения метода AADF в 3D-варианте блик трещины стал иметь более ровные края, что позволяет надеяться на более качественное оконтуривание блика и более точное решение задачи распознавания (рис. 8в).

2.3. Образец из стали 40 с одиннадцатью БЦО

В образце толщиной 210 мм, изготовленного из стали 40 с примесью никеля, наличие которого приводит к повышенному уровню структурного шума, было просверлено четырнадцать сквозных БЦО диаметром 4 мм, расположенных на глубинах от 10 до 200 мм (рис. 9). Эхосигналы регистрировались антенной решеткой (5 МГц, 32 элемента, размеры пьезоэлемента $0,9 \times 10$ мм, расстояние между краями элементов 0,1 мм), установленной на плексигласовую 20-градусную призму. Измерения эхосигналов проводились в режиме тройного сканирования в 40 положениях с шагом 5 мм.

На рис. 10а показано ЦФА-Х-изображение девяти самых глубоких БЦО, восстановленное по акустической схеме LdL, когда на прямом луче излучается и принимается продольная волна. Апертура сканирования была выбрана так, что фронтальная разрешающая способность у БЦО, расположенных у дна образца, была наиболее высокая — для самого глубокого отверстия она равна примерно 2,5 мм. На рис. 10а хорошо виден структурный шум порядка -14 дБ от средней амплитуды бликов БЦО. ЦФА-Х-изображение было подвергнуто процедуре выравнивания гистограммы. После применения AADF в 2D-варианте (рис. 10б) уровень структурного шума уменьшился, а все блики БЦО стали более заметны, что делает более эффективной процедуру их оконтуривания.

На рис. 11 показан срез изображения вдоль пунктирной линии красного цвета на рис. 10б. Амплитуда структурного шума уменьшилась более чем на 6 дБ, а блики БЦО не потеряли своей

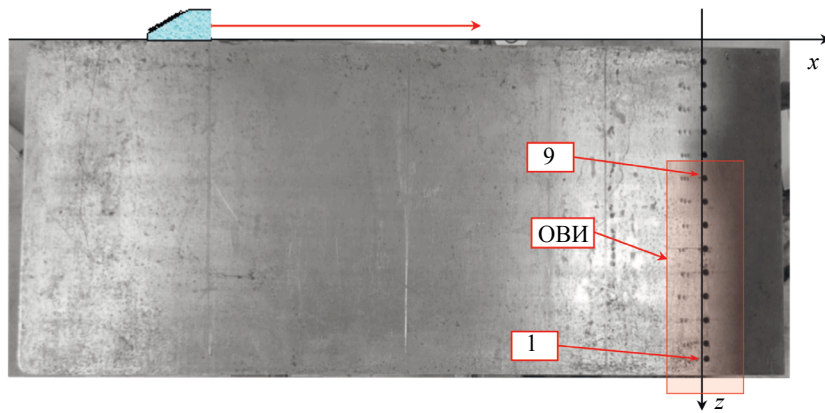


Рис. 9. Фотография образца толщиной 210 мм из стали 40. Стрелкой красного цвета схематически показана апертура сканирования.

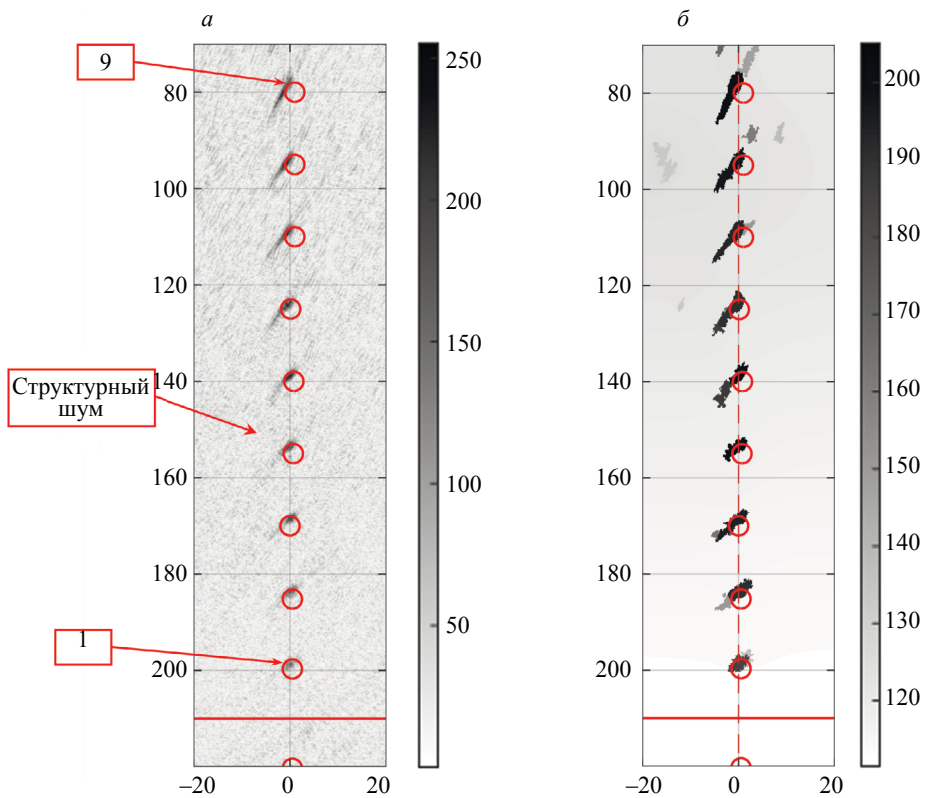


Рис. 10. ЦФА-Х-изображение девяти БЦО (а) и результат обработки его методом ААДФ в 2D-варианте (б).

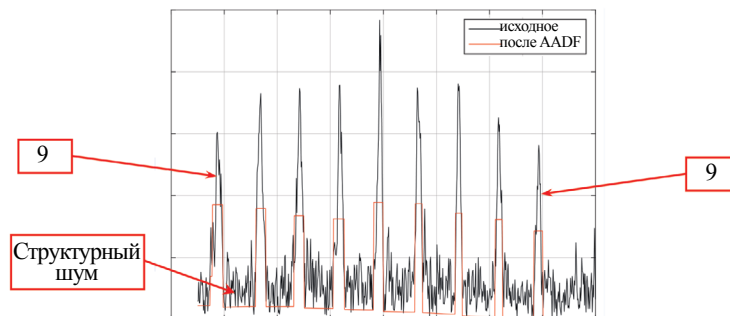


Рис. 11. Срез изображения вдоль пунктирной линии красного цвета на рис. 10б.

компактности. Интересно отметить, что на ЦФА-Х-изображении амплитуды бликов на разных глубинах отличаются примерно на 4,7 дБ, а на AADF-изображении — только на 1,5 дБ.

ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам исследований, изложенных в данной статье, можно сделать следующие выводы.

Адаптивный анизотропный диффузный фильтр (AADF), разработанный для обработки оптических изображений, можно использовать и для обработки изображений отражателей, восстановленных при проведении ультразвукового контроля. Его можно применять для повышения отношения сигнал/шум и для кластеризации изображения отражателей с целью его подготовки для процедуры распознавания (классификации).

Обработка методом AADF изображений отражателей, восстановленных в модельных экспериментах по эхосигналам методом ЦФА или ЦФА-Х, показало его эффективность. Интересный результат был получен при применении диффузного фильтра в 3D-варианте (см. рис. 7 и рис. 8в).

Определение K_{opt} по способу, проиллюстрированному на рис. 2, не позволило получить изображения с выделенными бликами отражателей. Поэтому K_{opt} полагался равным 0,5 и итерационные расчеты проводились до тех пор, пока не выполнялось условие. В этом случае число итераций N_{opt} достигало нескольких тысяч.

Автор благодарен главному конструктору научно-производственного центра «ЭХО+» А.Е. Базулину за замечания и предложения, высказанные в процессе подготовки статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. URL: <https://www.olympus-ims.com/en/resources/books/> (дата обращения: 19 декабря 2020 года).
2. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—75.
3. Базулин Е.Г. Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решетками // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 12—22.
4. Guo Z., Ye S., Wang Y., Lin C. Resistance Welding Spot Defect Detection with Convolutional Neural Networks / In: Liu M., Chen H., Vincze M. (eds) Computer Vision Systems. ICVS 2017. Lecture Notes in Computer Science. V. 10528. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68345-4_15
5. Broomhead D.S., Lowe D. Multivariable functional interpolation and adaptive networks // Complex Systems. 1988. V. 2. P. 321—355.
6. Perona P., Malik J. Scale space and edge detection using anisotropic diffusion // IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. 1990. V. 12. № 6. P. 629—639.
7. Bezdek James C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. 1981. ISBN 0-306-40671-3.
8. Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural Features for Image Classification // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1973. SMC-3 (6). P. 610—621. DOI:10.1109/TSMC.1973.4309314
9. Tizhoosh H.R. Type II Fuzzy Image Segmentation / In: Bustince H., Herrera F., Montero J. (eds) Fuzzy Sets and Their Extensions: Representation, Aggregation and Models. Studies in Fuzziness and Soft Computing, 2008. V. 220. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73723-0_31
10. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. V. 9. № 1. P. 62—66.
11. URL: <https://neurohive.io/ru/papers/deep-cluster/> (дата обращения: 19 декабря 2020 года).
12. Zuiderveld K. Contrast limited adaptive histogram equalization // Graphics gems IV, Academic Press Professional, Inc., 1994. P. 474—485. URL: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=180940> (дата обращения: 21 декабря 2020 года).
13. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: Учеб. пособие для вузов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 432 с.
14. Borroto-Fernández M., González-Hidalgo M., León-Mecías A. New estimation method of the contrast parameter for the Perona–Malik diffusion equation // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization. 2014. DOI: 10.1080/21681163.2014.974289
15. Ben Mhamed I., Abid S., Fnaiech F. Weld defect detection using a modified anisotropic diffusion model // EURASIP J. Adv. Signal Process. 2012. V. 46. <https://doi.org/10.1186/1687-6180-2012-46>
16. Artyukov I.A., Irtuganov N.N. Noise-Driven Anisotropic Diffusion Filtering For X-Ray Low Contrast Imaging // Journal of Russian Laser Research. 2019. № 3. P. 150—154. Doi: 10.1007/s10946-019-09782-8

17. Научно-производственный центр «ЭХО+»: официальный сайт фирмы. URL: <http://www.eshoplus.ru> (дата обращения: 03.01.2021).

18. *Базулин Е.Г.* Восстановление изображения отражателей методом C-SAFT с учетом анизотропии материала объекта контроля // Дефектоскопия. 2015. № 4. С. 42—52.

19. *Базулин Е.Г., Коколев С.А.* Повышение отношения сигнал/шум при проведении ультразвукового контроля ремонтных заварок с использованием технологии прореженных антенных решеток // Дефектоскопия. 2013. № 5. С. 45—58.
