

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
 Основан в феврале 1965 года
 Екатеринбург

№ 5
2021

СОДЕРЖАНИЕ**Акустические методы**

Е.Г. Базулин. Применение адаптивного анизотропного диффузного фильтра для повышения качества изображения отражателей при проведении ультразвукового неразрушающего контроля	3
Е.Г. Базулин. Обработка TOFD-эхосигналов с целью достижения сверхразрешения	13
Н.П. Алешин, Н.В. Крысько, А.Г. Кусый, С.В. Скрынников, Л. Ю. Могильнер. Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем.....	22
В.В. Ларионов, А.М. Лидер, Д.О. Долматов, Д.А. Седнев. Ультразвуковой контроль дефектов металлических изделий сложной формы	31
С.И. Буйло, Б.И. Буйло, М.И. Чебаков. Вероятностно-информационный подход к оценке достоверности результатов акустико-эмиссионного метода контроля и диагностики.....	37
А.А. Марков, Е.А. Максимова. Анализ параметров донных сигналов в зоне сварных стыков рельсов при высокоскоростном ультразвуковом контроле.....	45

Электромагнитные методы

Р.А. Саврай, Л.Х. Коган. Вихретоковый контроль усталостной деградации метастабильной аустенитной стали при гигацикловом контактно-усталостном нагружении.....	56
Аиша Халид, М. Газанфар Али, Тарик Майрадж Расул Хан, Мухаммад Имран, Салман Низар, Акил Шах, Абид Шах. Контроль и определение параметров сварной низкоуглеродистой стали E 6013 с помощью ультразвукового контроля и преобразования Гильберта—Хуанга	64

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-

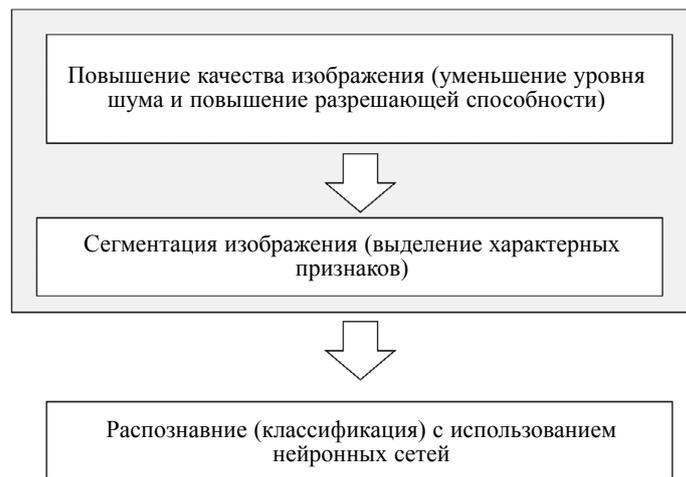


Рис. 1. Структурная схема системы распознавания образов.

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-CLAHE) [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]:

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

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 $[\nabla_{w}, \nabla_{\text{max}}]$.

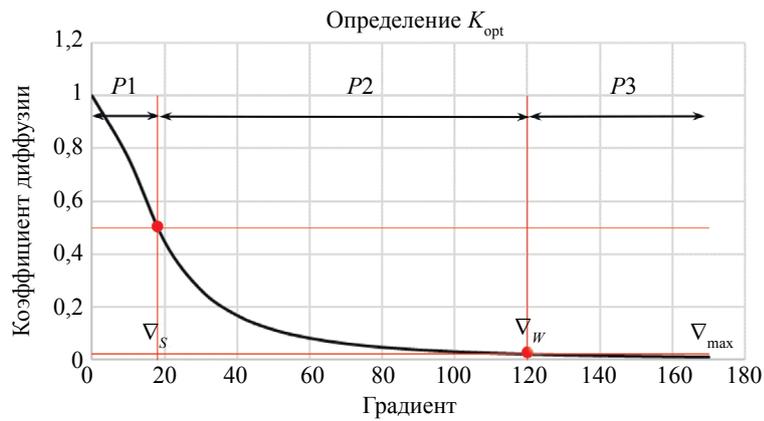
После определения перечисленных параметров выбирается K_{opt} , при котором график $D(u(x, z))$ пересекает точки, показанные на рис. 2 кругами красного цвета. К сожалению, в литературе не удалось обнаружить четких правил определения этих шести параметров, и в данной работе воспользоваться данным критерием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

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

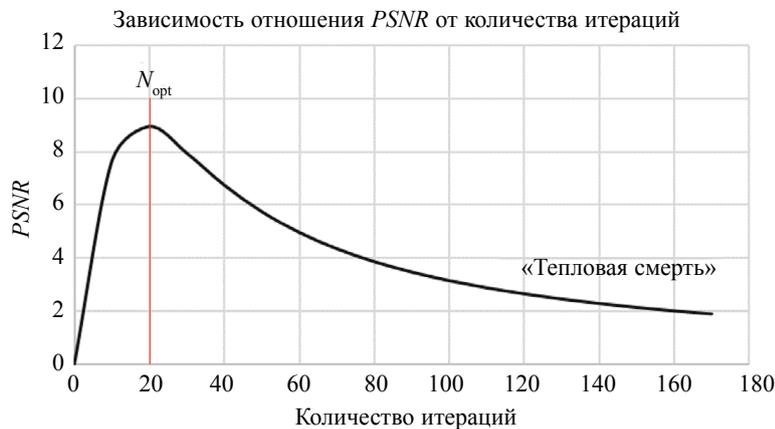
$$N_{\text{opt}} = \frac{PSNR}{\max(u(x, z, t_{\text{opt}}))}, \quad (3)$$

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 чашку 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

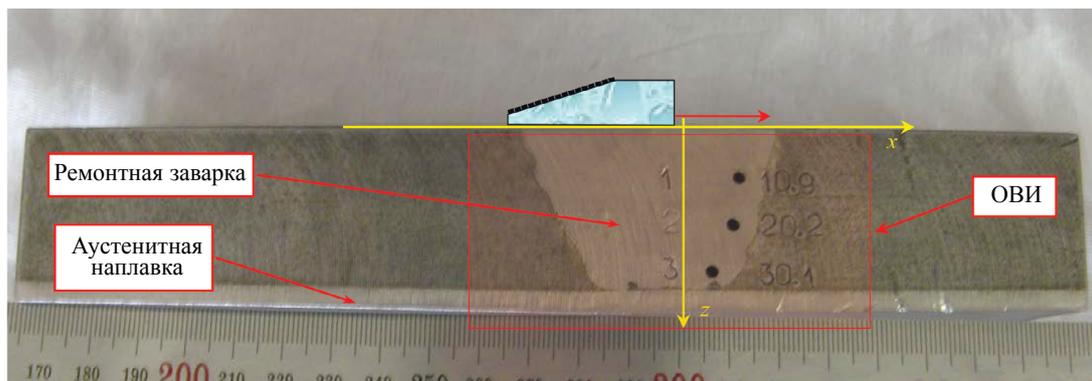


Рис. 4. Фотография образца трубопровода Ду800 с аустенитной ремонтной заваркой. Стрелкой красного цвета схематически показана апертура сканирования.

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.

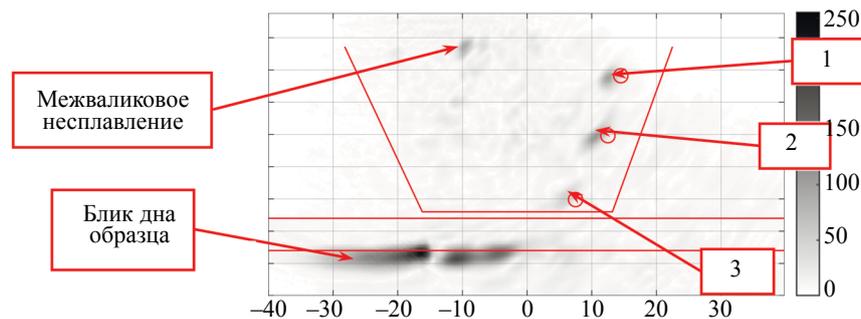


Рис. 5. ЦФА-Х-изображение ремонтной заварки и трех БЦО.

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.

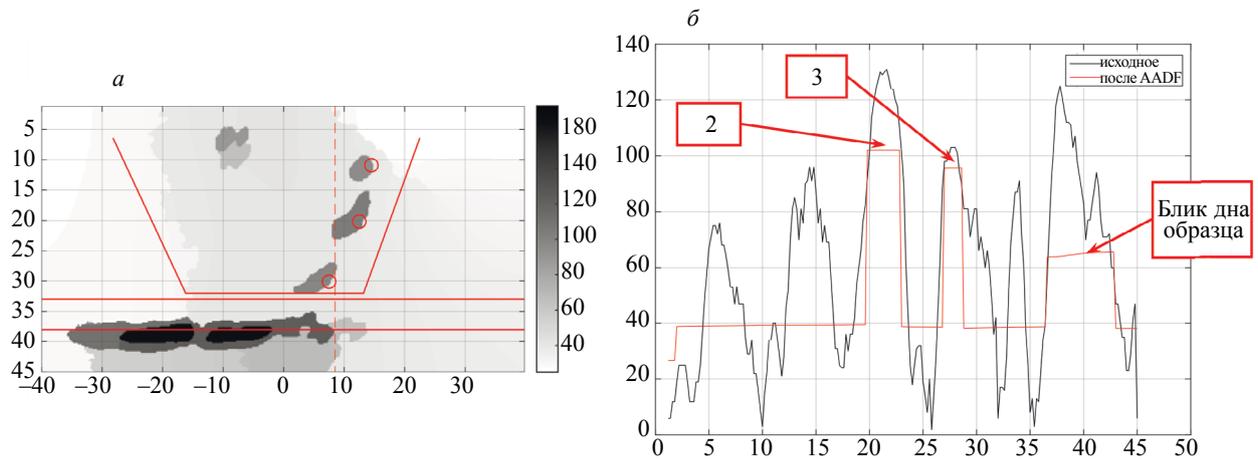


Рис. 6. Результат обработки ЦФА-Х-изображения методом AADF в 2D-варианте (а) и вертикальный срез обработанного изображения (б).

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.

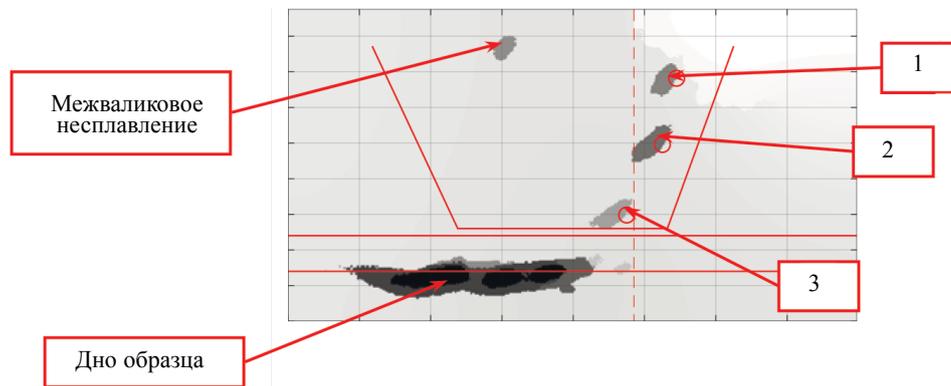


Рис. 7. Результат обработки ЦФА-Х-изображения методом AADF в 3D-варианте.

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.

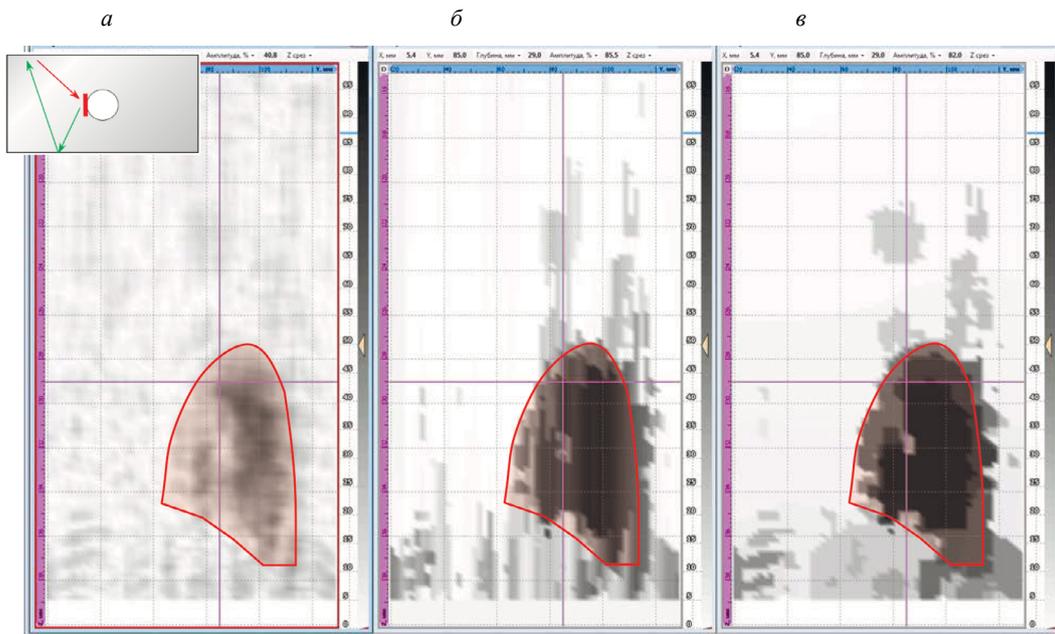


Рис. 8. Исходное ЦФА-изображение D-типа усталостной трещины (а), после обработки его методом AADF в 2D-варианте (б) и в 3D-варианте (в).

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

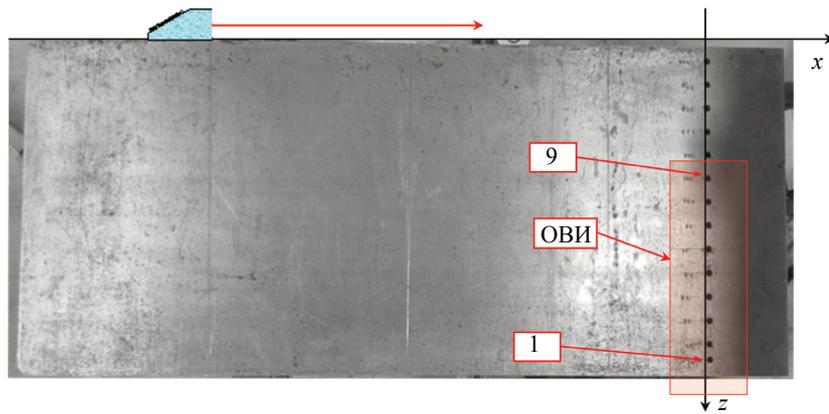


Рис. 9. Фотография образца толщиной 210 мм из стали 40. Стрелкой красного цвета схематически показана апертура сканирования.

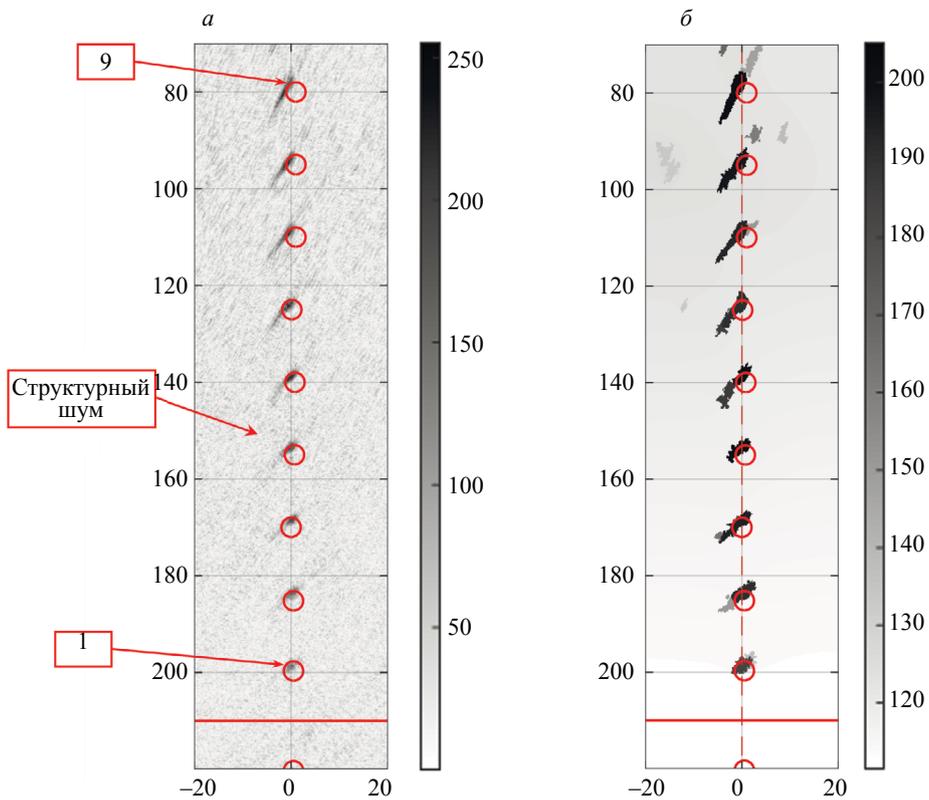


Рис. 10. ЦФА-Х-изображение девяти БЦО (а) и результат обработки его методом ААДФ в 2D-варианте (б).

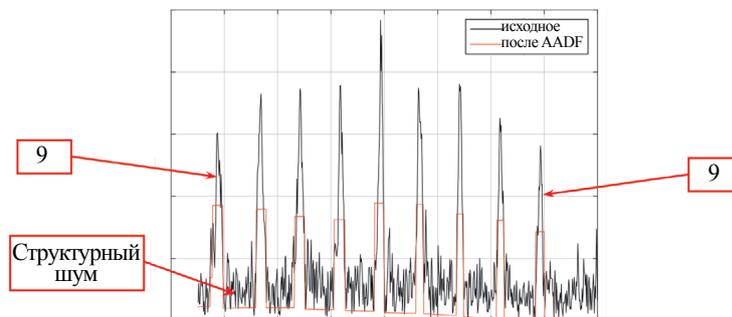


Рис. 11. Срез изображения вдоль пунктирной линии красного цвета на рис. 10б.

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.

ОБРАБОТКА TOFD-ЭХОСИГНАЛОВ С ЦЕЛЬЮ ДОСТИЖЕНИЯ СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ

© 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 20.01.2021; после доработки 19.02.2021
Принята к публикации 15.03.2021

Предложено использовать метод максимальной энтропии (МЭ) и метод построения AR-модели спектра TOFD-эхосигналов совместно с методом расщепления спектров для повышения разрешающей способности и, следовательно, его информативности. Модельные эксперименты показали эффективность предложенного подхода. В результате, разрешающая способность TOFD-эхосигналов повысилась не менее, чем в два раза, а уровень шума уменьшился на 6 дБ. Более высокая разрешающая способность TOFD-эхосигналов позволяет анализировать фазы эхосигналов и делать заключения о типе отражателя.

Ключевые слова: метод TOFD, метод максимальной энтропии, построение AR-модели спектра эхосигналов, расщепление спектра.

DOI: 10.31857/S013030822105002X

1. ВВЕДЕНИЕ

Благодаря высокой чувствительности и безопасности для персонала ультразвуковая дефектоскопия — один из самых распространенных методов неразрушающего контроля. В практике ультразвукового неразрушающего контроля (УЗК) для контроля сварных соединений широко применяется дифракционно-временной метод (Time Of Flight Diffraction) [1]. Он заключается в регистрации ультразвуковой продольной волны, рассеянной на верхнем и нижнем краях несплошности, двумя преобразователями, расположенными по разные стороны от сварного соединения. Измеренные эхосигналы позволяют довольно эффективно обнаруживать и идентифицировать трещины, так как импульсы, дифрагированные на их краях, находятся в противофазе [2]. Высота трещины определяется разницей между временами пробега дифрагированных сигналов от ее краев. Малый объем регистрируемых эхосигналов позволяет проводить контроль с очень высокой скоростью, поэтому метод TOFD представляется эффективным для УЗК кольцевых и продольных сварных соединений, особенно большой толщины.

Ширина спектра Δf эхосигнала определяется, главным образом, резонансными свойствами пьезопреобразователя (ПЭП). Длина простого сигнала τ , которую можно определять по уровню 0,7, обратно пропорциональна ширине его спектра. Математическая обработка, приводящая к дополнительному уменьшению длительности сигнала, позволяет получать эхосигналы со сверхразрешением. Отношение длины исходного импульса τ к длине импульса после обработки и будет характеризовать степень достигнутого сверхразрешения.

Эхосигналы от отражателей находятся между импульсом головной волны и импульсом продольной волны, отраженным от дна. Этот временной интервал составляет несколько микросекунд. Поэтому даже при использовании ПЭП с рабочей частотой 5 МГц недостаточно высокая разрешающая способность может привести к тому, что при проведении контроля не всегда удастся разрешить импульсы. Это, в свою очередь, не позволяет определить тип и размеры отражателя, например, убедиться: не превышает ли высота дефекта высоту одного прохода при автоматической сварке. Для повышения точности определения размеров отражателя можно использовать ПЭП с частотой 10 МГц, но при этом возрастает затухание акустических волн в материале объекта контроля, что приводит к увеличению уровня шума. Для повышения разрешающей способности эхосигналов при работе на 5 МГц можно использовать различные нелинейные методы обработки эхосигналов, в частности, метод максимальной энтропии (МЭ) [3] или методы построения AR-моделей [4]. При таком подходе разрешающую способность TOFD-эхосигналов можно повысить без увеличения уровня шума. В статье [5] было предложено использовать деконволюцию Ричардсона—Лаки для получения сверхразрешения TOFD-эхосигналов. Однако необходимо провести дополнительные исследования, так как деконволюция Ричардсона—Лаки работает с положительными функциями, а эхосигналы описываются знакопеременной функцией.

2. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЭХОСИГНАЛОВ

Предположим, что передаточная функция системы, регистрирующей эхосигналы, то есть ее реакция на импульсное воздействие в виде δ -функции, описывается импульсным откликом $s_e(t)$, спектр которого имеет ширину Δf . При наличии точечных отражателей идеальный измеренный эхосигнал $p(t)$ можно представить в виде суммы $\delta(t - t_{i,del})$, где $t_{i,del}$ — время задержки прихода импульса от отражателя с номером i , расположенного в точке (x_i, z_i) . В матричной форме прямую задачу можно записать стандартным образом:

$$\mathbf{p} = \mathbf{G}\mathbf{f} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

где $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ — измеренный эхосигнал из N отсчетов; \mathbf{f} — искомая функция, состоящая из суммы δ -функций со своими весами; \mathbf{G} — матрица, строки которой составлены из импульсного отклика системы $s_e(t)$ с циклическим сдвигом; \mathbf{n} — аддитивный шум. Задача заключается в том, чтобы в присутствии шума \mathbf{n} по измеренному полю \mathbf{p} и известной матрице \mathbf{G} восстановить \mathbf{f} . Для описания УЗК модель (1) является приближенной, так как импульсный отклик $s_e(t)$ будет являться функцией координат (x, z) и матрица \mathbf{G} будет иметь более сложный вид. Решение такой задачи представлено в статье [6].

2.1. Метод МЭ

Запись прямой задачи в виде (1) позволяет перейти к поиску оценки $\hat{\mathbf{f}}$ по измеренным эхосигналам \mathbf{p} методом наименьших квадратов, путем минимизации невязки:

$$\chi^2(\hat{\mathbf{f}}) = \|\mathbf{G}\hat{\mathbf{f}} - \mathbf{p}\|^2 \rightarrow \min. \quad (2)$$

Дальнейшее развитие данного подхода состоит в регуляризации процедуры обращения по А.Н. Тихонову [7] за счет добавления штрафного функционала, в качестве которого может выступать максимальная энтропия в виде так называемой кросс-энтропии [8]:

$$H(f_i) = -\sum_{i=1}^N f_i \ln \left(\frac{f_i}{e\mu} \right), \quad (3)$$

где μ — оценка среднего значения интенсивности фона изображения. Таким образом, решение задачи сводится к минимизации невязки следующего выражения:

$$\hat{\mathbf{f}} = \arg \min_{\hat{\mathbf{f}} \in R^N} \left(\|\mathbf{G}\hat{\mathbf{f}} - \mathbf{p}\|^2 - \alpha H(\hat{\mathbf{f}}) \right), \quad (4)$$

где α — параметр регуляризации (коэффициент Лагранжа), контролирующий вклад стабилизатора $H(\hat{\mathbf{f}})$ в минимизацию нормы невязки $\chi^2(\hat{\mathbf{f}})$. Так как метод МЭ не линеен, а штрафной функционал $H(\mathbf{f})$ достигает максимума для импульсов с максимальной скоростью изменения, то в результате применения процедуры (4) можно получить импульс со сверхразрешением, то есть тогда, когда его длина τ становится меньше чем $1/\Delta f$. Так как импульсы в общем случае могут менять фазу, следует воспользоваться модификацией метода МЭ для работы с комплексными сигналами [9].

2.2. Построение AR-модели спектра эхосигнала и расщепление спектра

Обозначим через $\mathbf{P} = \mathfrak{Z}(\mathbf{p})$ комплексный спектр эхосигнала \mathbf{p} в пределах рабочей полосы частот $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$. Значения верхней f_{\max} и нижней частоты f_{\min} можно определить по уровню 0,1 спектра импульсного отклика $s_e(t)$. Для получения оценки эхосигнала \mathbf{p} , состоящего из набора пиков (как это имеет место в УЗК), целесообразно построить AR-модель спектра эхосигнала. Экстраполяция спектра \mathbf{P} с интервала $[f_{\min}, f_{\max}]$ на интервал $[f_{\min}^e, f_{\max}^e]$ позволит уменьшить длительность импульсов в эхосигнале \mathbf{p} . В данной статье полагалось, что $f_{\min}^e = 0,1$ МГц, а $f_{\max}^e = 3f_{\max}$. Строго говоря, степень сверхразрешения определяется шумом [10]. Для экстраполяции вперед на интервал $[f_{\max}, f_{\max}^e]$ можно воспользоваться полюсной AR-моделью, которая описывается линейным дифференциальным уравнением порядка d [11]:

$$P_n^{AR} = -\sum_{m=1}^d a_m^d P_{n-m}, \quad (5)$$

где a_m^d — комплексные коэффициенты линейного предсказания вперед. Экстраполяцию спектра \mathbf{P} назад, то есть на интервал $[f_{\min}^e, f_{\min}]$, можно сделать по формуле:

$$P_n^{AR} = -\sum_{m=1}^d (a_m^d)^* P_{n+m}, \quad (6)$$

где знаком $*$ отмечена комплексно сопряженная величина. В пределах исходного частотного диапазона $[f_{\min}, f_{\max}]$ значение спектра сохраняется $P_n^{AR} = P_n$. После экстраполяции спектра эхосигнала его оценку можно получить с помощью обратного преобразования Фурье:

$$\mathbf{p}_{AR} = \mathfrak{F}^{-1}(\mathbf{P}_{AR}). \quad (7)$$

Для расчета коэффициентов a_m^d AR-модели можно использовать алгоритм Берга [11]. В силу того, что метод построения AR-модели наиболее эффективно работает с сигналами типа $\sin(x)/x$, эхосигналы перед обработкой необходимо пропустить через инверсный или винеровский фильтр с импульсным откликом $s_e(t)$.

Для повышения эффективности работы процедуры экстраполяции ее можно объединить с методом расщепления спектра, разработанного для уменьшения уровня структурного шума [12]. Для этого исходный спектр эхосигналов на интервале $[f_{\min}, f_{\max}]$ разбивается на M перекрывающихся диапазонов $\Delta f_m < \Delta f$, и с каждого поддиапазона его спектр \mathbf{P}_m экстраполируется на интервал $[f_{\min}^e, f_{\max}^e]$:

$$\mathbf{p}_{AR} = \sum_{m=1}^M \mathfrak{F}^{-1}(\mathbf{P}_{AR,m}). \quad (8)$$

Такой подход, за счет усреднения M вариантов экстраполяции спектров, позволяет уменьшить общую ошибку предсказания.

3. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные эксперименты проводились с использованием ЦФА-дефектоскопа «АВГУР ТФ», разработанного и изготавливаемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [13].

3.1. Образец с двумя БЦО и моделью трещины

В образце толщиной 24,5 мм из перлитной стали 20 было просверлено два боковых цилиндрических отверстия (БЦО) диаметром 2 мм с центрами на глубинах 12 и 16 мм. В том же образце электроэрозионным способом был сделан пропил шириной 0,2 мм с краями на глубинах 12 и 16 мм.

Для измерения использовали две пары ПЭП с номинальной частотой 5 и 10 МГц, установленные на рексолитовые призмы с углом наклона 17,5 град, стрелой 8 мм и путем в призме 6,7 мм. Расстояние между передними гранями призм было равно 45 мм.

В качестве импульсного отклика $s_e(t)$ при обработке эхосигналов использовался гауссоподобный импульс, который нужен для формирования матрицы \mathbf{G} или для проведения фильтрации Винера. На рис. 1 показан импульсный отклик, характерный для ПЭП с номинальной частотой 10 МГц, и его спектр. Максимум спектра у такого ПЭП обычно около 8 МГц, а для ПЭП с номинальной частотой 5 МГц — максимум находится около 4,2 МГц.

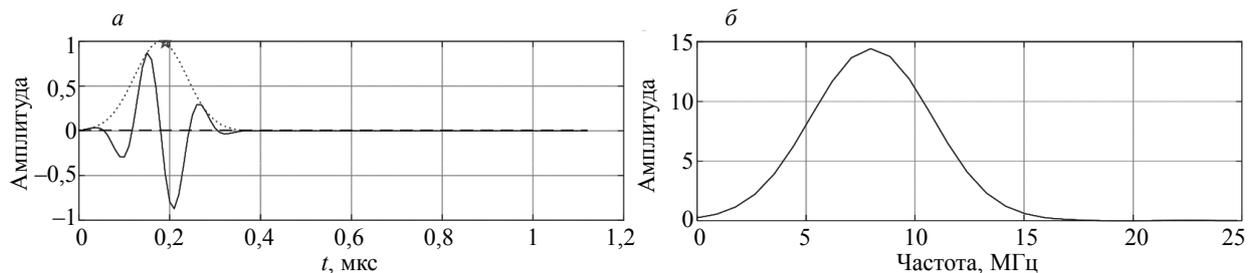


Рис. 1. Вид импульсного отклика (а) и его спектра (б) для ПЭП с номинальной частотой 10 МГц.

3.1.1. Два БЦО диаметром 2 мм

Для понимания результатов модельного эксперимента рассмотрим подробнее особенности рассеяния плоской продольной волны на БЦО с акустически мягкой границей. Аналитическое решение задачи рассеивания плоской гармонической ультразвуковой волны на цилиндре с акустически мягкой границей приведено в статье [14], а решение для произвольного граничного условия — в работе [15]. Просуммировав решения гармонической задачи для заданного частотного диапазона, можно перейти к анализу рассеяния в импульсном режиме. На рис. 2 показаны контуры БЦО, стрелкой отмечено направление падения ультразвукового зондирующего импульса, а пунктирной стрелкой — направление приема поля. Такая геометрия излучения—приема типична для TOFD-режима.

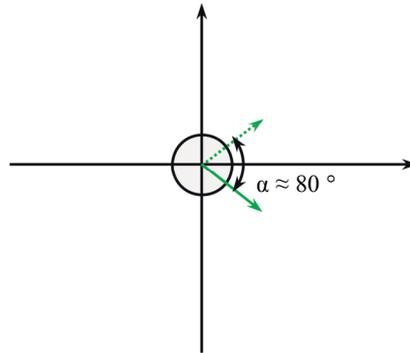


Рис. 2. БЦО и направления излучения и приема при работе в режиме TOFD.

На рис. 3а в растровом виде представлен результат расчета рассеянного сигнала продольной волны для $\alpha \in (0, 180)$ град при падении импульса продольной волны с центральной частотой 10 МГц на БЦО диаметром 2 мм. Хорошо виден импульс, зеркально отраженный от поверхности цилиндра, и импульс обегания—соскальзывания (далее для краткости импульс обегания). Фазы зеркально отраженного сигнала и импульса обегания различаются на 180 град. Задержка и амплитуда импульса обегания сильно зависят от направления приема — при обратном отражении ($\alpha = 180$ град) амплитуда импульса обегания равна примерно -30 дБ от амплитуды зеркального импульса. Полупрозрачным прямоугольником с границей черного цвета отмечена область, характерная для режима TOFD, в которой амплитуда импульса обегания соизмерима с зеркальным импульсом. На рис. 3б показан эхосигнал для $\alpha = 80$ град.

Если радиус БЦО меньше длины волны, то импульс обегания имеет пренебрежимо малую амплитуду для всех углов приема.

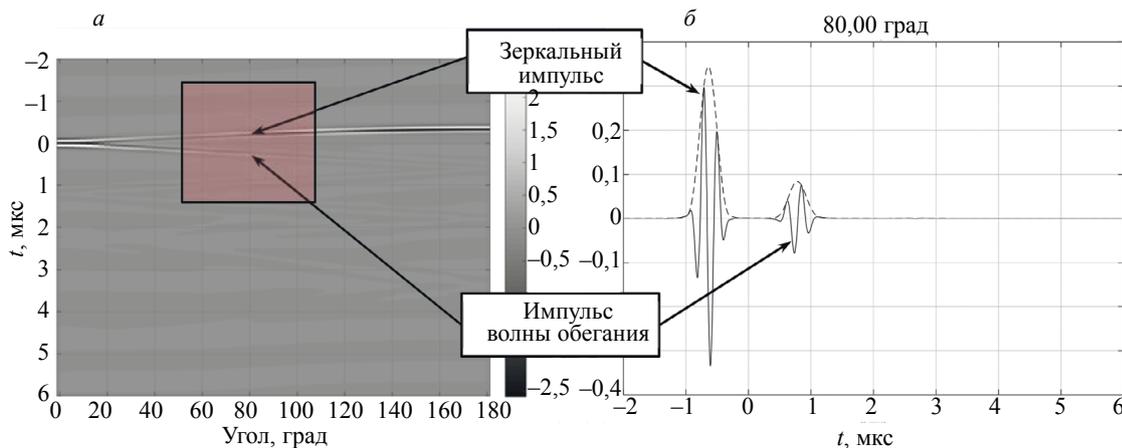


Рис. 3. Растровое изображение эхосигналов, рассеянных на БЦО диаметром 2 мм в диапазоне углов $\alpha \in (0, 180)$ град (а), вид эхосигнала, рассеянного под углом $\alpha = 80$ град (б).

3.1.1.1. Номинальная частота ПЭП 5 МГц

На рис. 4а показан измеренный эхосигнал (линия красного цвета) и сигнал, полученный после обработки методом МЭ (линия черного цвета) по формуле (4). Так как разрешающая способность возросла более чем в два раза, зеркальный импульс и импульс обегания разрешились для обеих отверстий. Зеркальные импульсы от БЦО совпадают по фазе друг с другом и, в соответствии с теорией (см. рис. 3), находятся в противофазе с головной волной и импульсами обегания. На рис. 4б показан измеренный эхосигнал (линия красного цвета) и сигнал, полученный после построения AR-модели спектра эхосигнала (линия черного цвета) по формуле (8). Разрешающая способность возросла примерно в два раза, и, в целом, результат подобен результату обработки, представленному на рис. 4а. В работе [4] при построении AR-модели спектра эхосигнала был получен подобный результат.

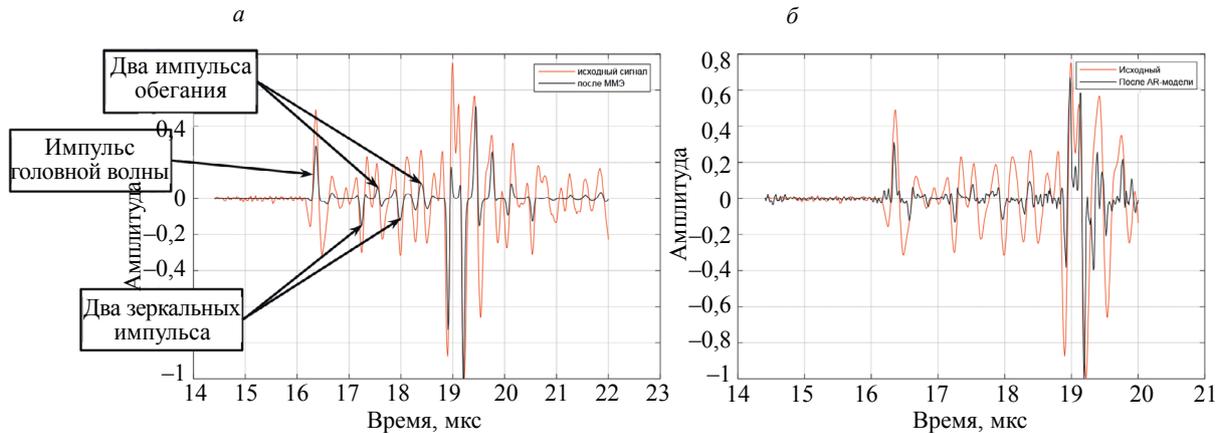


Рис. 4. Эхосигналы от двух БЦО при использовании ПЭП на 5 МГц: метод МЭ (а); построение AR-модели спектра (б).

3.1.1.2. Номинальная частота ПЭП 10 МГц

На рис. 5а показан измеренный эхосигнал (линия красного цвета) и сигнал, полученный после обработки методом МЭ (линия черного цвета) по формуле (4). Из-за увеличения в два раза рабочей частоты ПЭП уже на измеренном эхосигнале хорошо видны зеркальные импульсы и импульсы обегания при отражении от двух БЦО. Зеркальные импульсы от БЦО совпадают по фазе друг с другом и, как положено, находятся в противофазе с головной волной и импульсами обегания. После применения метода МЭ длина импульсов уменьшилась примерно от 200 до 70 нс, а уровень шума — более чем на 16 дБ. На рис. 5б показан измеренный эхосигнал (линия красного цвета) и сигнал, полученный после построения AR-модели спектра эхосигнала (линия черного цвета) по формуле (8). Разрешающая способность возросла более чем в три раза, но нарушилось соотношение фаз импульсов: импульсы, рассеянные на БЦО, поменяли фазу на 180 град, а фаза импульса головной волны перестала быть равной 0 град. По-видимому, это связано с тем, что импульсы обрабатываемого эхосигнала отличаются от используемого импульсно-го отклика, показанного на рис. 1.

3.1.2. Электроэрозионная модель трещины высотой 4 мм

3.1.2.1. Номинальная частота ПЭП 5 МГц

На рис. 6а показан измеренный эхосигнал (линия красного цвета) и сигнал, полученный после обработки методом МЭ (линия черного цвета) по формуле (4). Видно, что импульсы от верхнего и нижнего края модели трещины в противофазе как на исходном эхосигнале, так и после применения метода МЭ, а импульс головной волны и эхосигнал от вершины трещины в противофазе. То есть, на рис. 6а представлен классический результат, разве что «подкачал» эхосигнал, отраженный

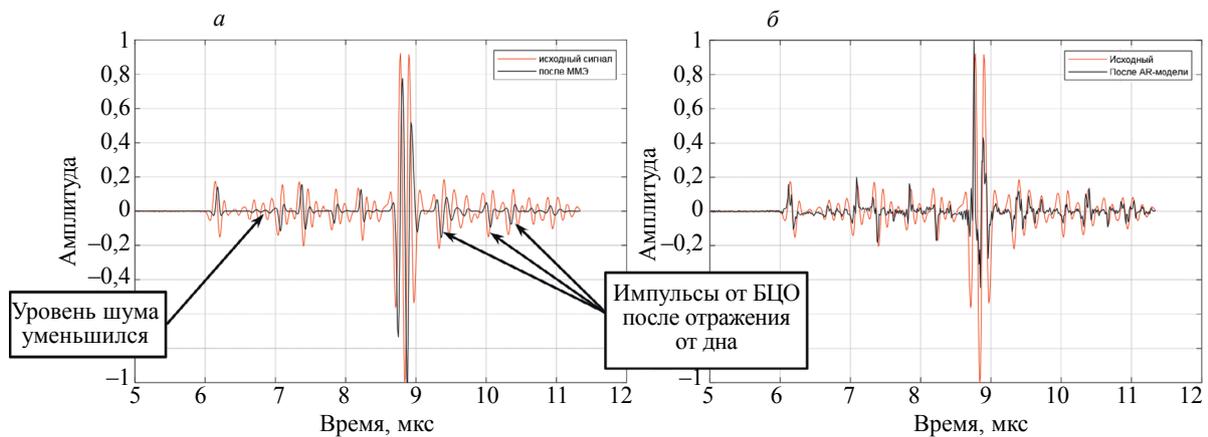


Рис. 5. Эхосигналы от двух БЦО при использовании ПЭП на 10 МГц: метод МЭ (а); построение AR-модели спектра (б).

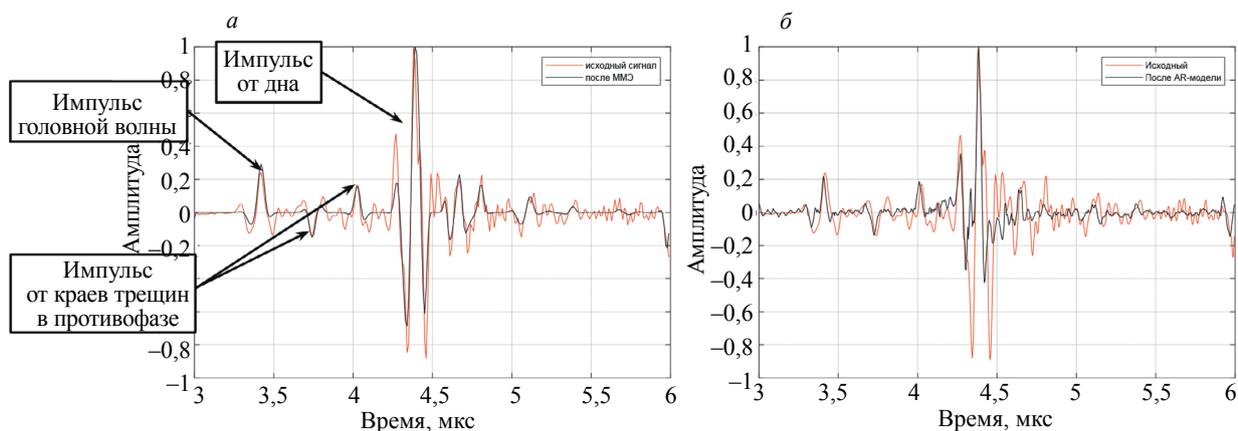


Рис. 6. Эхосигналы от модели трещины при использовании ПЭП на 5 МГц: метод МЭ (а); построение AR-модели спектра (б).

от дна, из-за того, что его форма сильно отличается от импульсного отклика, показанного на рис. 1. На рис. 6б показан измеренный эхосигнал (линия красного цвета) и сигнал, полученный после построения AR-модели спектра эхосигнала (линия черного цвета) по формуле (8). Разрешающая способность возросла примерно в два раза и в целом изображение подобно результату обработки, показанному на рис. 6а.

3.1.2.2. Номинальная частота ПЭП 10 МГц

На рис. 7а показан измеренный эхосигнал (линия красного цвета) и сигнал, полученный после обработки методом МЭ (линия черного цвета) по формуле (4). Из-за увеличения в два раза частоты ПЭП на измеренном эхосигнале импульсы, отраженные от краев трещины, уверенно разрешаются. После применения метода МЭ длина импульсов уменьшилась примерно от 200 до 70 нс, а уровень шума — более чем на 16 дБ. Однако импульсы, отраженные от краев трещин, поменяли фазу на 180 град по сравнению с изображением на рис. 6. По-видимому, это связано с тем, что импульсы реального эхосигнала отличаются от импульсного отклика $s_e(t)$, который показан на рис. 1. На рис. 7б показан измеренный эхосигнал (линия красного цвета) и сигнал, полученный после построения AR-модели спектра эхосигнала (линия черного цвета) по формуле (8). В целом, изображения на левой и правой панели рис. 7 достаточно близки друг другу.

3.2. Образец трубопровода с тремя БЦО, придонным и приповерхностным пазами

Образец был изготовлен из фрагмента трубы из стали ASTM A694 F70 толщиной 28,5 мм и радиусом внутренней поверхности равным 327 мм. В образце были просверлены три БЦО диа-

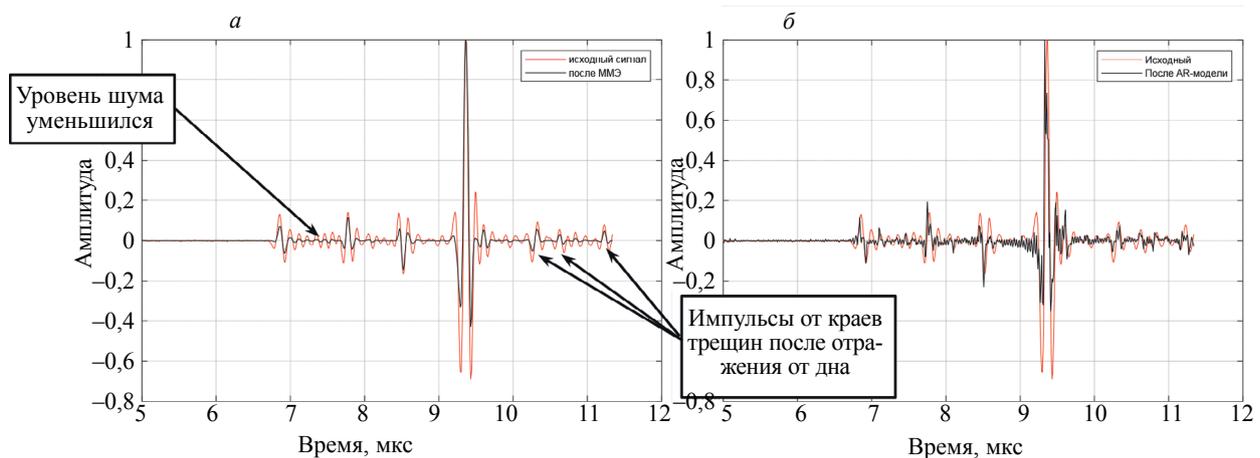


Рис. 7. Эхосигналы от модели трещины при использовании ПЭП на 10 МГц: метод МЭ (а); построение AR-модели спектра (б).

метром 3 мм с центрами на глубинах 6,7, 13,7 и 20,7 мм, отмеченные на рис. 8 выносками 1, 2 и 3. В той же плоскости образца были изготовлены придонный и приповерхностный вертикальные пазы высотой 1 мм и шириной 0,2 мм, отмеченные выносками 4 и 5. В отличие от предыдущих модельных экспериментов, пара ПЭП перемещалась вдоль линии окружности по внешней поверхности образца. Для измерения использовался ПЭП с номинальной частотой 5 МГц, установленный на рексолитовую призму с углом наклоном 17,5 град, стрелой 8 мм и путем в призме 6,7 мм. Расстояние между передними гранями призм было равно 125 мм.

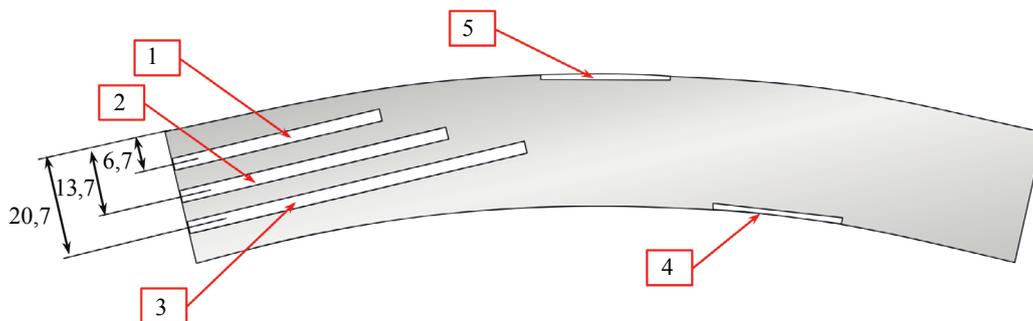


Рис. 8. Вертикальное сечение образца трубы с внутренним радиусом 327 мм.

На рис. 9 в растровом виде показаны измеренные TOFD-эхосигналы. Хорошо видно множество слабо разрешающихся между собой импульсов от трех БЦО, неплохо заметны эхосигналы от вершины придонного паза (отражатель 4), а эхосигналы от приповерхностного паза (отражатель 6) обнаружить не удастся. Следует отметить, что импульс головной волны довольно затянут и сильно отличается от того, что показан на рис. 1. Из-за своего удлинения он может маскировать эхосигналы маленькой амплитуды от отражателей, расположенных в верхней части образца. Анализ эхосигналов усложняет и то обстоятельство, что импульсы головной волны и донного сигнала при сканировании изменяют свое положение во времени. Это связано с тем, что из-за изменения усилия прижима призм приемника и излучателя расстояние между ними изменяется. Причин для этого может быть несколько: эллипсоидальность свариваемых труб, смещение осей труб относительно друг друга, неровность поверхностей труб.

В качестве импульсного отклика, необходимого для работы методов сверхразрешения, использовался импульс головной волны, который был выделен из измеренных эхосигналов. После применения метода МЭ по формуле (4) импульс головной волны «ужался» в импульс из

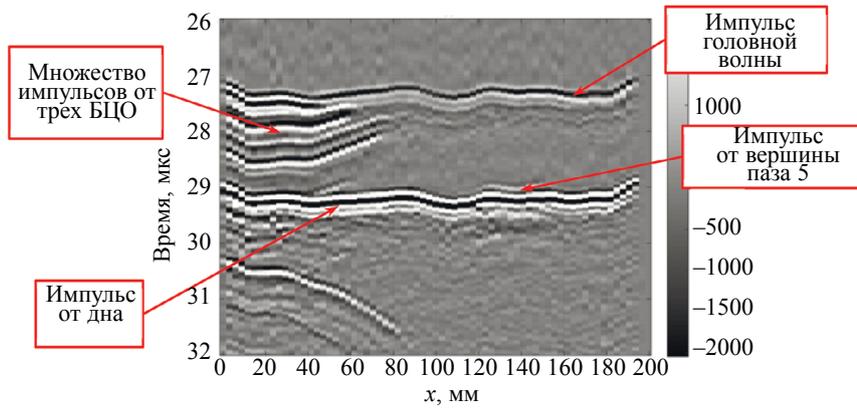


Рис. 9. TOFD-эхосигналы в образце.

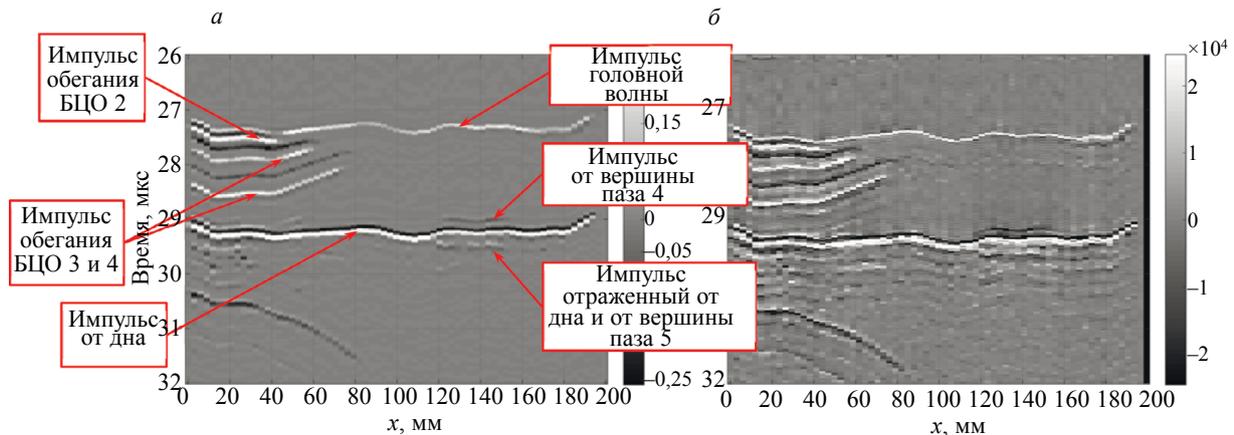


Рис. 10. Эхосигналы в образце после применения методов получения сверхразрешения: метод МЭ (а); построение AR-модели спектра (б).

одного положительного полупериода (рис. 10а), чего нельзя сказать о донном импульсе — у него и длительность уменьшилась не так как у головного, и фаза стала равна примерно 90 град. Этот эффект связан с тем, что форма эхосигнала меняется с глубиной [6]. Импульсы, отраженные от придонного паза, стали хорошо видны как на прямом луче, так и при отражении от дна. Зеркальные импульсы и импульсы обегания двух нижних БЦО с номерами 2 и 3 разрешились и стало видно, что они в противофазе. А от верхнего БЦО номер 1, скорее всего, виден только импульс обегания, фаза которого совпадает с фазой импульса головной волны. Приповерхностный пропил (отражатель 5) не виден даже после применения процедуры сверхразрешения. На рис. 10а показаны эхосигналы после построения AR-модели их спектров по формуле (8). Их уровень шума больше, чем для случая применения метода МЭ.

4. ВЫВОДЫ

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

1. Методы МЭ или построение AR-модели спектра эхосигнала повышают разрешающую способность TOFD-эхосигналов более чем в два раза, что позволяет более уверенно разделять импульсы и анализировать их фазу.

2. Метод TOFD, основываясь только на анализе фазы эхосигналов, не в состоянии отличить трещину от БЦО диаметром 2 мм, так как импульс обегания и зеркальный импульс находятся в противофазе, также как у импульсов, отраженных от краев трещины. Возможно, что дополнительный анализ амплитуд импульсов позволит уточнить тип отражателя (дифракционный амплитудно-временной метод [16]).

3. Для применения метода МЭ нужно задать значения двух параметров: коэффициента Лагранжа α и уровня фона μ . Уровень фона можно выбирать около 10^{-4} — 10^{-6} и он не критично влияет на качество изображения, а результат обработки сильно зависит от значения коэффициента Лагранжа α . Нужно обязательно испытывать несколько коэффициентов α и в соответствии с заданным критерием выбирать решение.

4. При построении AR-модели спектра нужно задать значения семи параметров: верхняя и нижняя частота интервала исходного спектра $[f_{\min}, f_{\max}]$, верхняя и нижняя частота интервала экстраполяции $[f_{\min}^e, f_{\max}^e]$, порядок модели d , число поддиапазонов M и размеры диапазона Δf_m при расщеплении спектра. По этой причине метод МЭ предпочтительнее.

5. Для обоих методов очень важно задать правильную форму импульсного отклика $s_e(t)$. Есть несколько вариантов его выбора: можно представить его аналитически (см. рис. 1), можно использовать сигнал, полученный при калибровке антенной решетки, можно выделить его из обрабатываемого эхосигнала, например, использовать импульс головной волны (см. раздел 3.2). Выбор способа определения импульсного отклика должен решаться на этапе разработки конкретной методики.

6. При отклонении от акустической оси форма эхосигнала меняется и эффективность работы рассмотренных методов получения сверхразрешения уменьшается. Для метода МЭ способ ее решения предложен в статье [6], а вот для метода построения AR-модели простые варианты не просматриваются — разве что делить апертуру на поддиапазоны.

Автор выражает благодарность сотруднику системного отдела «НПЦ «ЭХО+» М.С. Садыкову за проведение экспериментов и главному конструктору «НПЦ «ЭХО+» А.Е. Базулину за замечания и предложения, высказанные в процессе подготовки статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ISO 16828: Non-destructive testing. Ultrasonic testing. Time-of-flight diffraction technique as a method for detection and sizing of discontinuities, 2012.
2. Darmon M., Ferrand A., Dorval V., Chatillon S. Recent Modelling Advances for Ultrasonic TOFD Inspections // Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval. 2015. V. 559.
3. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода максимальной энтропии для получения изображения рассеивателей по набору эхосигналов // Акустический журнал. 2013. Т. 59. № 2. С. 235—254.
4. Honarvar F., Tabatabai S.A.M., Dusatko T., Sinclair A.N. A new signal processing technique for enhancement of ultrasonic testing signals / 16th World Conference on Nondestructive Testing, Montreal, Canada (August 2004).
5. Park Choon Su. A High Resolution Approach by Using Deconvolution for Phased Array Ultrasound Imaging // Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing. 2018. V. 38. № 3. P. 190—196. DOI: 10.7779/JKSNT.2018.38.3.190
6. Базулин Е.Г., Вовк А.С. Применение метода максимальной энтропии в ультразвуковой дефектоскопии с учётом переменной формы эхосигнала // Научные труды МЭИ. 2018. № 5. С. 111—119.
7. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач / Изд. 3-е, исправл. М.: Наука, 1986. 288 с.
8. Kullback S. Information Theory and Statistics. New York, 1968. 416 p.
9. Базулин А.Е., Базулин Е.Г. Деконволюция сложных эхосигналов методом максимальной энтропии в ультразвуковом неразрушающем контроле // Акустический журнал. 2009. Т. 55. № 6. С. 772—783.
10. Косарев Е.Л. О пределе сверхразрешения при восстановлении сигналов // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35. № 1. С. 68—87.
11. Марпл(мл.) С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 265 с.
12. Базулин Е.Г., Вовилкин А.Х., Тихонов Д.С. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Ч. 2. Повышение отношения сигнал/шум // Контроль. Диагностика. 2015. № 9. С. 10—27.
13. Официальный сайт фирмы «ЭХО+» URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 20.12.2020).
14. Голубев А.С. Отражение плоских волн от цилиндрического дефекта // Акустический журнал. 1961. Т. VII. № 2. С. 174—180.
15. Pao Y.H., Mow C.C. Diffraction of elastic waves and dynamic stress concentrations. New York: Crane Russak, 1973. 685 p.
16. Алёшин Н.П., Григорьев М.В., Козлов Д.М., Крысько Н.В., Кусый А.Г. Диагностический комплекс для оценки технического состояния изделий ответственного назначения // Сварка и диагностика. 2018. № 6. С. 49—51.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫЯВЛЯЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕМНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЛН РЕЛЕЯ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

© 2021 г. Н.П. Алешин^{1,2,*}, Н.В. Крысько^{1,2,**}, А.Г. Кусый^{1,2,***}, С.В. Скрынников^{3,****},
Л. Ю. Могильнер^{4,*****}

¹Федеральное государственное автономное учреждение «Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана», Россия 105005 Москва, Бауманская 2-я ул., 5, стр. 1

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Россия 105005 Москва, Бауманская 2-я ул., 5, стр. 1

³ПАО «Газпром», Россия 117997 Москва, ул. Наметкина, 16, ГСП-7

⁴Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта (ООО «НИИ Транснефть»), Россия 117186 Москва, Севастопольский проспект, 47а
E-mail: *aleshin@bmstu.ru; **kryskonv@bmstu.ru; ***andrei.k.166@mail.ru;
****S.Skrynnikov@adm.gazprom.ru; *****mogilnerLY@niitnn.transneft.ru

Поступила в редакцию 02.03.2021; после доработки 19.03.2021

Принята к публикации 19.03.2021

Представлены результаты исследования выявляемости поверхностных объемных дефектов ультразвуковым методом неразрушающего контроля. Рассмотрена возможность применения для этих целей поверхностных волн Релея, возбуждаемых электромагнитно-акустическим преобразователем (ЭМАП). В качестве искусственных дефектов для имитации данных дефектов в образцах из низкоуглеродистой стали использовались несквозные вертикальные сверления различного диаметра и глубины. По результатам измерений построены зависимости амплитуды принимаемых сигналов от параметров сверлений. При статистической обработке результатов учтено отношение сигнал/шум при возбуждении волны Релея с помощью ЭМАП на бездефектных участках образцов. Для построения кривых вероятности выявления дефектов (PoD) определены оптимальные модели распределения амплитуд сигналов. В условиях проведенных экспериментов по построенным PoD-кривым сделаны выводы о минимальных размерах поверхностных объемных дефектов, выявляемых с вероятностью 90 % с учетом доверительного интервала 95 %, и о возможности выполнения настройки параметров ультразвукового контроля по сигналам, отраженным от вертикальных сверлений.

Ключевые слова: поверхностные дефекты, коррозия, ультразвуковой контроль, вертикальные сверления, электромагнитно-акустический преобразователь, вероятность выявления дефектов.

DOI: 10.31857/S0130308221050031

ВВЕДЕНИЕ

В перечень основных развивающихся дефектов металла на объектах машиностроения, энергетики, в трубопроводном транспорте входят поверхностные коррозионные повреждения, возникающие под воздействием продукта или внешней среды (по ГОСТ 5272—68* с изм. 1, 2. Коррозия металлов. Термины). Такие дефекты могут составлять более 50 % от общего числа выявляемых дефектов металлоконструкций [1—4].

Среди локальных дефектов коррозионного происхождения выделяют плоскостные (например, стресс-коррозионные трещины) и объемные (сквозные и несквозные свищи, местная коррозия (язвы) и т.д. [5]). Для выявления таких дефектов и обеспечения эксплуатационной надежности оборудования, находящегося в эксплуатации длительные промежутки времени, в настоящее время актуальны вопросы обследования, диагностирования, мониторинга технического состояния, в том числе — с применением методов ультразвуковой дефектоскопии.

Ультразвуковые волны рассеиваются на объемных дефектах в значительно более широком диапазоне углов по сравнению с рассеянием на аналогичных по апертуре плоскостных мишенях. Соответственно, амплитуда сигнала от объемного дефекта, принимаемого в каждом данном направлении, чаще всего существенно меньше той, которая принималась бы в этом же направлении от плоскостного дефекта при его оптимальной ориентации. Поэтому чувствительность к объемным дефектам при ультразвуковом контроле обычно ниже, чем к плоскостным. В настоящей статье рассмотрим некоторые возможности повышения выявляемости и точности измерения размеров локальных объемных дефектов коррозионного происхождения.

В качестве модели объемного дефекта, выходящего на поверхность, используем вертикальное сверление конечной глубины и отметим, что для выявления таких дефектов можно использовать волну Релея [6]. Например, в работах [7—9] исследовали взаимодействие релеевских волн с плоскостными несовершенствами поверхности типа «щель», «полуцилиндрическая выемка», «клин». Были получены зависимости коэффициента отражения ультразвука от размеров дефекта. Однако для практического применения полученных решений ранее существовали существенные ограничения. Дело в том, что если волну Релея возбуждать пьезопреобразователем, то для обеспечения акустического контакта поверхность металла необходимо смачивать жидкостью. При сканировании эта жидкость неизбежно окружает контактную поверхность преобразователя со всех сторон, в том числе она присутствует между передней гранью преобразователя и выявляемым дефектом. Толщина такого слоя жидкости — переменная и неравномерная. В этих условиях ультразвук, не достигнув дефекта, частично проникает в жидкость, рассеивается на ее неоднородностях, и в результате на преобразователь приходят множественные шумы, которые могут полностью экранировать сигнал от дефекта. Это иллюстрируется на рис. 1.

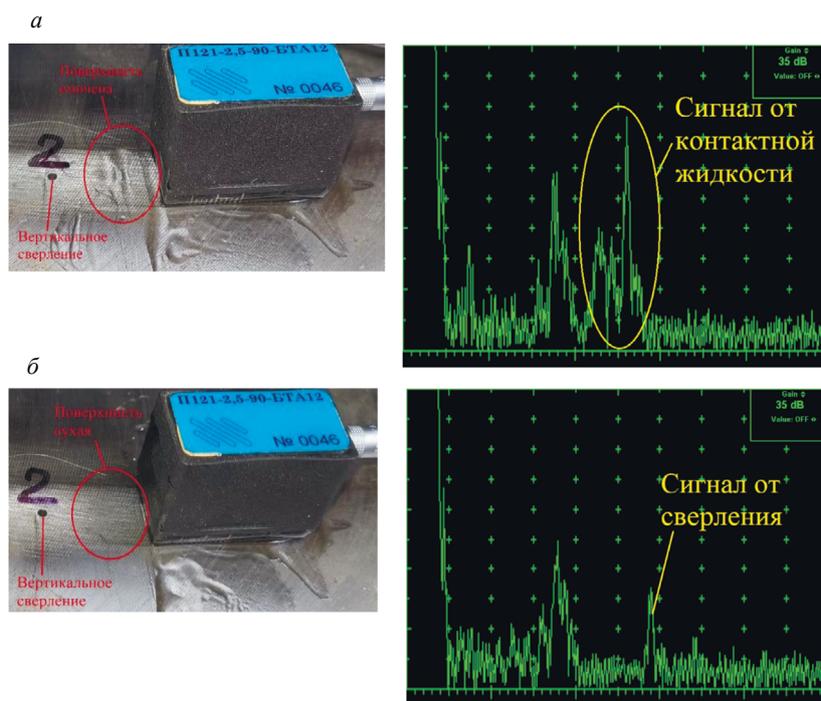


Рис. 1. Выявление поверхностного дефекта пьезопреобразователем, возбуждающим волну Релея: *а* — поверхность перед ПЭП смочена: на А-скане шумы экранируют сигнал от дефекта; *б* — поверхность перед ПЭП сухая: на А-скане индицируется сигнал от дефекта.

Известно, что от создающего шумы неоднородного слоя контактирующей жидкости можно избавиться, если для возбуждения ультразвука вместо пьезопреобразователей использовать электромагнитно-акустические преобразователи (ЭМАП). Например, применительно к толщиномерии, такой опыт описан в работах [10, 11]. Известен также опыт использования ЭМАП для наклонного ввода в металл объемных волн [12] и волн Релея [13, 14].

Для иллюстрации преимуществ возбуждения релеевских волн с помощью ЭМАП на рис. 2 показан А-скан при выявлении того же вертикального сверления, что и на рис. 1. Теперь от одного дефекта отражается один сигнал, который не экранируется шумами от реверберации ультразвука в контактирующей жидкости. Поэтому представляет интерес использовать релеевские волны, возбуждаемые ЭМАП, для выявления выходящих на поверхность металла объемных дефектов. Но этот вариант ультразвукового контроля требует дополнительных исследований, т.к. в литературных данных не удалось обнаружить достоверную информацию о зависимости параметров принимаемого сигнала от диаметра и глубины проникновения в металл локального объемного дефекта коррозийного происхождения.

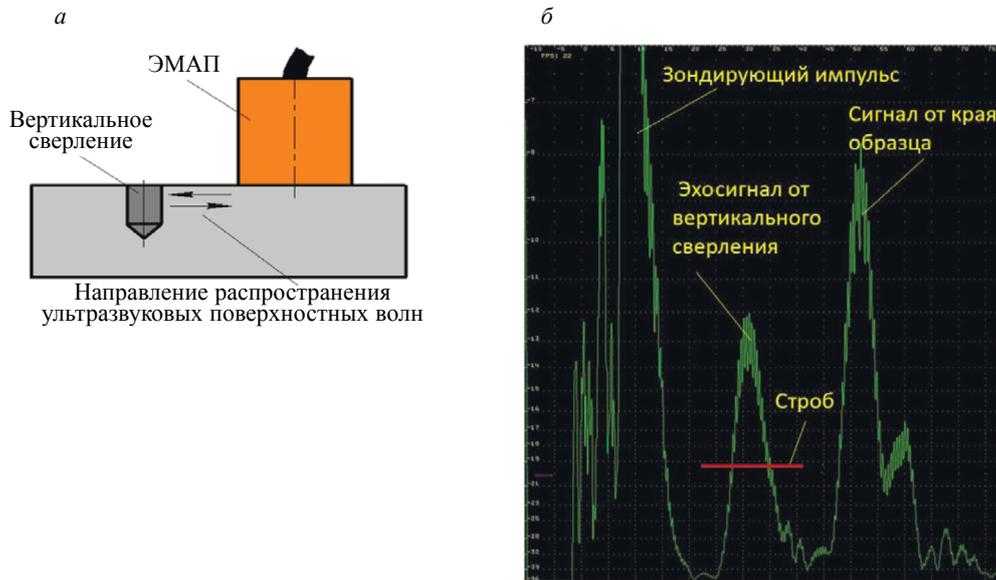


Рис. 2. Выявление вертикального сверления при использовании ЭМАП:
 а — схема измерений с использованием ЭМАП; б — А-скан с сигналом от вертикального сверления.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЭМАП применяется в оборудовании ряда производителей в России и за рубежом. Например, известны дефектоскопы типа *temate® PowerBox* (Испания—США) [15], *DIO-1000* (Чехия) [16], *Sonaflex* (Россия—Германия) [17], толщиномеры типа *A-1270* (Россия) [18] и другие устройства.

На рис. 3 показан внешний вид установки, использованной в нашем исследовании. Применялся конфигурируемый блок 1 дефектоскопической электроники *Sonaflex*, поверхностные волны генерировались ЭМАП 2, оснащенный меандровой катушкой. Установка позволяла излучать рэлеевские волны на центральной частоте 1 МГц. Преобразователь устанавливался в держатель 3 с возможностью вращения по поверхности образца 5 для выбора оптимального направления ввода волны Релея. Устройство позиционирования 4 позволяло смещать ЭМАП по трем осям и обеспечивать постоянный зазор между ЭМАП и испытательным образцом. На дисплее компьютера 6 отображались А-сканы сигналов, отраженных от сверлений 7. Материал образцов — низкоуглеродистая сталь. Поверхности образцов были отшлифованы до чистоты, не хуже *Rz 20* согласно ГОСТ 2789—73 (Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики (с Изменениями № 1, 2)).

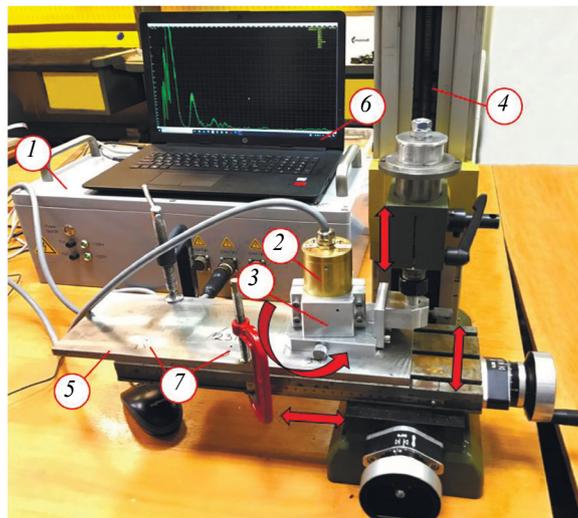


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования выявляемости поверхностных объемных дефектов ЭМАП на волну Релея.

Рассмотрим две группы образцов. Первая предназначалась для построения зависимости амплитуды ультразвукового эхосигнала от диаметра вертикального сверления. Использовались 12 сверлений глубиной 5 мм и диаметром 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 7; 8,5 и 10 мм. Образцы второй группы — для построения зависимости амплитуды сигнала от глубины сверления. В них были выполнены 14 сверлений диаметром 3 мм и глубиной 0,25; 0,4; 0,5; 0,75; 1; 1,2 мм и далее от 1,5 до 5 мм с шагом 0,5 мм.

Схема излучения—приема волны Релея с помощью ЭМАП показана на рис. 2а. С целью исключения влияния затухания на результаты измерений расстояние от передней грани ЭМАП до сверления вдоль поверхности образца выбирали постоянным, причем оно было минимальным настолько, чтобы отраженный от сверления сигнал уверенно разрешался на А-скане от зондирующего импульса (см. рис. 2б). С учетом изменения диаметра мишеней разница между временем прихода эхосигналов от различных вертикальных сверлений не превышала 1 мкс.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для учета влияния акустических шумов на результаты измерений предварительно было исследовано распределение амплитуд этих шумов в зоне приема сигнала от сверления. С этой целью ЭМАП предварительно устанавливался на бездефектные участки образцов и в застробированной зоне предполагаемой регистрации сигналов от сверлений было выполнено 50 измерений уровня акустических шумов из металла. Согласно [19, 20], при ультразвуковом контроле эхометодом амплитуда шумов в зоне контроля чаще всего распределена по одному из следующих законов: нормальному, логарифмическому нормальному (логнормальному), Вейбулла или экспоненциальному. Для оценки параметров распределений амплитуды шумов по выборке проведенных измерений, использован метод максимального правдоподобия. Для определения наилучшего распределения применялись информационные критерии: АICс по Акаике согласно формуле (1) из [21], ВIC по байесовскому критерию согласно формуле (2) из [21] и по критерию Колмогорова—Смирнова согласно [22]. Расчетные формулы для первых из перечисленных критериев имеют следующий вид:

$$AICc = 2k - 2\ln(L) + 2k \frac{k+1}{n-k-1}; \quad (1)$$

$$BIC = -2\ln(L) + k\ln(n), \quad (2)$$

где L — максимальное значение функции правдоподобия выборки с известным числом параметров; k — число параметров модели; n — объем выборки.

Расчеты выполнялись на языке программирования Python 3, оценка параметров распределений и вычисление критериев производилось с помощью библиотеки Reliability [22].

Что касается критерия Колмогорова—Смирнова, то он предназначен для проверки простых гипотез о принадлежности анализируемой выборки некоторому полностью известному закону распределения и в данном случае использовался качественно, без выполнения количественных оценок.

Полученные значения указанных критериев представлены в табл. 1.

Таблица 1

К определению распределения амплитуды шумов в зоне контроля волнами Релея

Распределение	AICc	BIC	Критерий Колмогорова—Смирнова
Нормальное	57,23	60,8	Принимается
Логнормальное	59,19	64,41	Принимается
Вейбулла	71,11	74,67	Отвергается
Экспоненциальное	473,22	475,05	Отвергается

Согласно [21], чем меньше значение критериев АICс и ВIC, тем лучше распределение подходит к выборке. Из табл. 1 видно, что наиболее подходящее распределение — нормальное. Оцененные

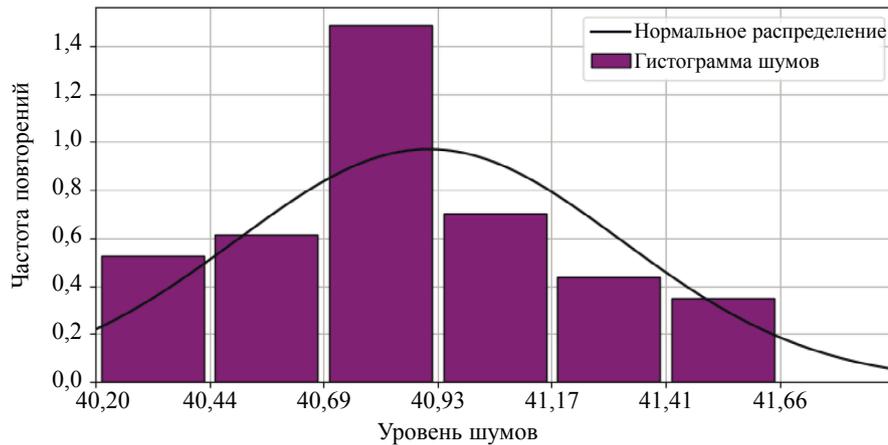


Рис. 4. Распределение амплитуды шумов в зоне контроля волнами Релея.

по выборке параметры амплитуд шумов для этого распределения составили: среднее значение $\mu = 40,91$, среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,41$. Гистограмма амплитуд шумов и плотность нормального распределения с оцененными параметрами μ и σ представлена на рис. 4.

За уровень шумов был принят 95 % квантиль нормального распределения, который равен $-41,6$ дБ. При этом вероятность ложного срабатывания не превышает 5 %.

Далее с учетом полученного результата можно было перейти к оценке параметров сигналов, отраженных от вертикальных сверлений. Зависимость отношения амплитуды эхосигнала, отраженного от вертикального сверления, к уровню шумов при изменении диаметра сверления показана на рис. 5. Здесь и далее на графиках под «полезным сигналом» понимается амплитуда сигнала от сверления.

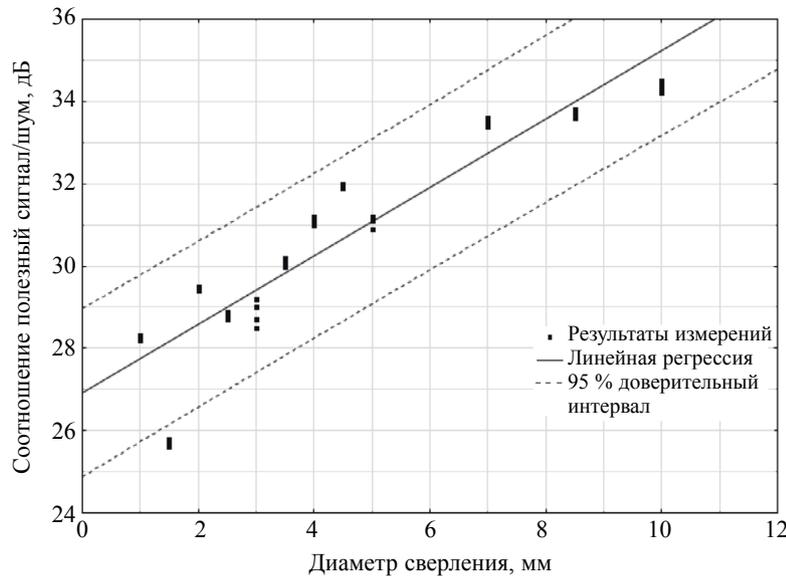


Рис. 5. Зависимость отношения полезного сигнала к уровню шумов от диаметра вертикального сверления.

Отметим, что при рассеянии упругой волны на бесконечном цилиндре амплитуда отраженного сигнала при росте диаметра сверления b , вообще говоря, должна расти пропорционально $b^{3/2}$. Однако из рис. 5 видно, что в рассматриваемом диапазоне диаметров эту зависимость можно считать линейной. Действительно, рассчитанный коэффициент корреляции r^2 составил в данном случае 0,84, что соответствует сильной линейной зависимости между отношением полезный сигнал/

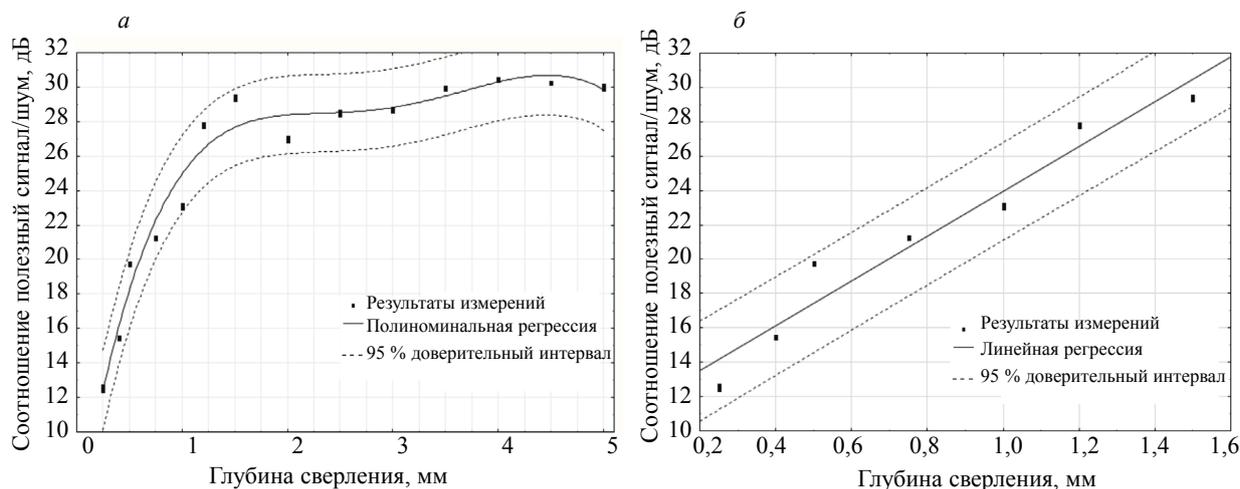


Рис. 6. Зависимость отношения полезного сигнала к уровню шумов от глубины вертикального сверления: *a* — полный диапазон глубин; *б* — диапазон глубин до 1,5 мм.

шум и диаметром сверления. Так сказалось влияние на эту зависимость поверхности материала и ограниченной глубины проникновения волны Релея в объем.

Зависимость отношения полезный сигнал/шум при изменении глубины сверления показана на рис. 6.

Из рис. 6а видно, что зависимость отношения полезный сигнал/шум от глубины вертикального сверления линейная, если глубина сверления не превышает ориентировочно 1,5 мм, что соответствует половине длины волны Релея на частоте 1 МГц. При дальнейшем увеличении глубины сверления амплитуда сигнала выходит в насыщение, поскольку глубина проникновения релеевской волны в металл обычно ограничена длиной волны. На рис. 6б представлена линейная зависимость отношения полезный сигнал/шум от глубины вертикального сверления для значений глубин, меньших 1,5 мм. Рассчитанный коэффициент корреляции r^2 составляет 0,94, что соответствует сильной линейной зависимости.

Для приведенных зависимостей амплитуд сигналов, отраженных от рассматриваемых имитаторов дефектов, можно построить кривые вероятности выявления дефектов, основываясь на линейных моделях — кривые PoD (Probability of Detection) [23]. Для этого, с учетом данных табл. 1 и графиков на рис. 5 и 6б, необходимо было выбрать наиболее подходящую из четырех моделей: \hat{a} vs. $\log(a)$, \hat{a} vs. $\log(\hat{a})$, $\log(\hat{a})$ vs. a или $\log(\hat{a})$ vs. $\log(a)$. Согласно [24], для выбора модели линейной регрессии можно воспользоваться критериями Акаике (AIC) и Байеса (BIC), которые для данного случая вычисляются по формулам:

$$AIC = n \cdot \ln\left(\frac{SSE}{n}\right) + 2k, \quad (3)$$

$$BIC = n \cdot \ln\left(\frac{SSE}{n}\right) + 2k \cdot \ln(n), \quad (4)$$

где $SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ — сумма квадратов ошибок; k — число параметров модели; n — объем выборки.

Рассчитанные значения критериев AIC и BIC для зависимостей амплитуды сигналов от диаметра и глубины сверлений для различных PoD-моделей приведены в табл. 2 и 3 соответственно.

Для обоих зависимостей наименьшие значения критериев AIC и BIC имеет модель « $\log(\hat{a})$ vs. $\log(a)$ », следовательно, именно ее целесообразно использовать для построения кривых вероятности выявления рассматриваемых дефектов (на примере вертикальных сверлений). Эти кривые рассчитаны с использованием программного обеспечения mh1823 согласно [25], разработанного на основании [23], и приведены на рис. 7а и б для вероятности выявления дефектов в зависимости от диаметра и от глубины соответственно.

Таблица 2

Определение наиболее подходящей модели для зависимости амплитуды сигнала от диаметра вертикального сверления

Модель PoD	AIC	BIC
\hat{a} vs. a	3,0	9,28
\hat{a} vs. $\log(a)$	4,13	10,41
$\log(\hat{a})$ vs. a	-395,73	-389,44
$\log(\hat{a})$ vs. $\log(a)$	-400,28	-394,00

Таблица 3

Определение наиболее подходящей модели для зависимости амплитуды сигнала от глубины вертикального сверления

Модель PoD	AIC	BIC
\hat{a} vs. a	26,17	30,84
\hat{a} vs. $\log(a)$	15,67	20,34
$\log(\hat{a})$ vs. a	-160,84	-156,17
$\log(\hat{a})$ vs. $\log(a)$	-200,51	-195,84

В качестве уровня принятия решений использовано значение отношения полезный сигнал/шум, при котором вероятность ложного срабатывания не превышает 1 %. Это отношение составило 25 дБ — для расчетов по диаметру сверления и 12 дБ — для расчетов по глубине сверления согласно рис. 5 и 6 соответственно.

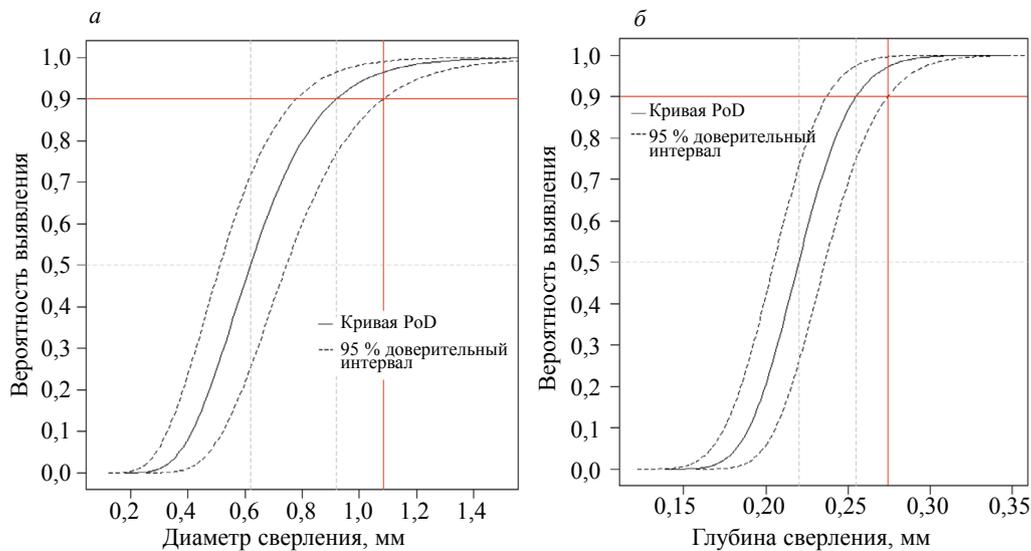


Рис. 7. Кривые вероятности выявления вертикального сверления в зависимости от диаметра (а) и глубины (б).

Из рис. 7 видно, что с вероятностью 90 % с учетом доверительного интервала 95 % размеры минимального вертикального сверления, имитирующего выходящий на поверхность локальный объемный дефект коррозионного происхождения, который выявляется ЭМАП, излучающим рэлеевские волны на частоте 1 МГц, равны: диаметр 1,1 мм и/или глубина 0,25 мм.

Имея в виду, что в данном случае скорость рэлеевской волны в стали составляет ориентировочно $3,0 \cdot 10^3$ м/с, то длина этой волны составляет $\lambda \approx 3$ мм. Тогда в условиях проведенного эксперимента получим, что с вероятностью не менее 90 % рэлеевская волна, излучаемая электромагнитно-акустическим преобразователем, позволяет уверенно выявлять выходящие на поверхность локальные объемные дефекты диаметром ориентировочно $0,3\lambda$ и/или глубиной $0,08\lambda$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью ЭМАП, излучающего рэлеевские волны, выполнено экспериментальное исследование выявляемости вертикальных цилиндрических сверлений, имитирующих выходящие на поверхность локальные объемные дефекты коррозионного происхождения. Измерения проведены на специально подготовленных образцах из низкоуглеродистой стали со сверлениями с переменной глубиной и диаметрами при чистоте поверхности образцов не хуже, чем Rz 20.

По выборке из 50 измерений уровня шумов на бездефектных участках образцов установлено, что в условиях эксперимента амплитуда шумов распределена по нормальному закону, и определен уровень шумов, при котором вероятность ложного срабатывания не превышает 5 %. С учетом этого уровня получены зависимости амплитуды эхосигнала, отраженного от пересечения вертикальных сверлений с поверхностью образца, от диаметра и глубины сверления. Установлено, что между амплитудой принятого сигнала и диаметром сверления имеет место сильная линейная зависимость с коэффициентом корреляции $r^2 = 0,84$, а между этой амплитудой и глубиной сверления сильная линейная зависимость присутствует только при ее представлении в логарифмической шкале.

По информационным критериям Акаике (AIC) и Байеса (BIC) определены оптимальные амплитудные модели для построения кривых вероятности (PoD) при выявлении рассматриваемых искусственных дефектов. Для обеих зависимостей такой моделью является $\log(\hat{a})$ vs. $\log(a)$. Из рассчитанных кривых вероятности выявления дефектов сделан вывод о том, что в условиях проведенных измерений с вероятностью 90 % с учетом доверительного интервала 95 % минимальный локальный объемный дефект коррозионного происхождения, который выявляется ЭМАП, излучающий рэлеевские волны, имеет ориентировочно диаметр 0,3 λ и/или глубину 0,08 λ . Например, на частоте 1 МГц это соответствует сверлениям диаметром 1,1 мм и/или глубиной 0,25 мм.

Приведенные результаты показывают, что электромагнитно-акустические преобразователи, создающие волну Релея, можно использовать для выявления объемных дефектов коррозионного происхождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдова Д.Г. Дефекты технологических трубопроводов: типология, оценка влияния на эксплуатацию // Промбезопасность-Приуралье. 2012. № 8. С. 24—28.
2. Ерехинский Б.А., Маслаков С.В., Шустов Н.И., Митрофанов А.В., Барышев С.Н., Заряев М.Ю., Кравцов А.В., Егоров С.В. Растрескивание металла задвижек фонтанной арматуры газодобывающих скважин северных месторождений // Территория Нефтегаз. 2014. № 2. С. 31—36.
3. Сафина И.С., Каузова П.А., Гуцин Д.А. Оценка технического состояния резервуаров вертикальных стальных // ТехНадзор. 2016. № 3 (112). С. 39—42.
4. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в машиностроении. С-Петербург: Изд-во Свен, 2007. 296 с.
5. Калининченко Н.П., Васильева М.А. Атлас дефектов сварных соединений и основного металла / Учебно-методическое пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. С. 55.
6. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 288 с.
7. Викторов И.А. О влиянии несовершенств поверхности на распространение рэлеевских волн // Докл. АН СССР. 1958. Т. 119. № 3. С. 463—465.
8. Дымкин Г.Я., Максимов А.В. Исследование отражения рэлеевских волн от подповерхностных дефектов // Дефектоскопия. 1988. № 3. С. 93—94.
9. Лохов В.П. Исследование дифракции волн Релея на ребре трещины // Дефектоскопия. 1989. № 3. С. 39—47.
10. Разыграев Н.П., Разыграев А.Н., Пономарев С.Н., Безлюдько Г.Я., Миховски М., Мирчев Й. Исследование технологии ультразвукового контроля толщины ЭМА методом // Дефектоскопия. 2010. № 6. С. 60—80.
11. Могильнер Л.Ю., Временко А.И., Скуридин Н.Н., Придеин О.А. Применение электромагнитно-акустических толщиномеров при диагностировании металлоконструкций и механо-технологического оборудования // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9. № 3. С. 315—325.
12. Луценко Г.Г. К вопросу о наклонном излучении объемных сдвиговых волн электромагнитно-акустическим преобразователем // Дефектоскопия. 2001. № 10. С. 36—47.
13. Алешин Н.П., Крысько Н.В., Щипаков Н.А., Могильнер Л.Ю. Оптимизация параметров механизированного ультразвукового контроля протяженных сварных швов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. № 3. С. 574—585.
14. Алешин Н.П., Сыркин М.М., Григорьев М.В., Козлов Д.М. Автоматизированный сканер-дефектоскоп «Автокон-ЭМА-МГГУ» // Сварка и диагностика. 2009. № 4. С. 28—31.

15. Thickness Measurement with EMAT — ternate@ PowerBox H. Innerspec Technologies Inc. [Электронный ресурс] Presentation // YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=jfseQEJgupM> (дата обращения 28.12.2018).
16. STARMANS electronics s.r.o. [Электронный ресурс] <http://starmansndt.ru/defektoskopi/dio-IOOO-ra.html> (дата обращения 28.12.2018).
17. Компания Nordinkraft [Электронный ресурс] <https://nordinkraft.de/sonaflex-ru> (дата обращения 26.01.2021).
18. Акустические контрольные системы: презентация «АКС-групп», [электронный ресурс] http://www.acsys.ru/upload/iblock/9bd/acsys-promo-booklet_web_curves.pdf (дата обращения 26.12.2018).
19. Волченко В.Н. Вероятность и достоверность оценки качества. М.: Металлургия, 1978. 80 с.
20. Wright Michael. Developing Qualified NDT Procedures & The Technical Justification Process. Waterloo, Ontario, Canada: Eclipse Scientific, 2016. 424 p.
21. Gourieroux C., Monfor A. Statistics and Econometric Models. V. 2. Testing, Confidence Regions, Model Selection and Asymptotic Theory. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1995. 526 p.
22. [Электронный ресурс] <https://reliability.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения 26.01.2021).
23. [Электронный ресурс] [https://www.statisticalengineering.com/mh1823/MIL-HDBK-1823A\(2009\).pdf](https://www.statisticalengineering.com/mh1823/MIL-HDBK-1823A(2009).pdf) (дата обращения 26.01.2021).
24. Gordon Rachel A. Applied statistics for the social and health sciences. New York. USA: Routledge, 2012. 742 p.
25. [Электронный ресурс] <http://statisticalengineering.com/mh1823/> (дата обращения 26.01.2021).

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

© 2021 г. В.В. Ларионов^{1,*} А.М. Лидер^{1,**}, Д.О. Долматов^{1,***}, Д.А. Седнев^{1,****}

¹Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: *lvv@tpu.ru; **lider@tpu.ru; ***dolmatovdo@tpu.ru; ****sednev@tpu.ru

Поступила в редакцию 18.01.2021; после доработки 24.03.2021

Принята к публикации 26.03.2021

Автоматизация является актуальным вопросом развития методов и аппаратуры ультразвукового неразрушающего контроля. Условия современного промышленного производства требуют разработки средств ультразвукового контроля, которые были бы гибкими к широкой и изменяющейся номенклатуре производимых изделий, которые, как правило, имеют сложную форму. В данной работе предложена технология ультразвуковой дефектоскопии объектов сложной формы. В рамках данной технологии предполагается использование шестиосевых роботизированных манипуляторов для обеспечения требуемого угла ввода ультразвуковых волн в объект контроля в каждой измерительной позиции. Корректная траектория движения робота в процессе сканирования обеспечивается восстановлением профиля поверхности объекта контроля методами оптической профилометрии и определением расположения объекта контроля относительно роботизированного манипулятора за счет использования электрического щупа. В рамках данной работы эффективность разработанной технологии верифицируется экспериментально.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, роботизированный манипулятор, объекты сложной формы.

DOI: 10.31857/S0130308221050043

1. ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковые методы контроля широко применяются в дефектоскопии различных материалов и изделий [1—6]. На сегодняшний день разработка автоматизированных средств ультразвуковой дефектоскопии является актуальной задачей, направленной на повышение производительности данного вида контроля. Очевидно, что разработка подобных средств не должна снижать вероятность выявления дефектов по сравнению с ручными методами контроля.

Вероятность обнаружения дефектов зависит от их типа, размера, формы и ориентации в объекте контроля. Кроме того, на данную вероятность могут также оказывать влияние такие факторы, как форма поверхности контролируемого изделия, ее состояние (шероховатость, наличие повреждений), условие обеспечения акустического контакта, а также угол ввода ультразвуковых волн в объект контроля. Современное промышленное производство включает в себя широкую номенклатуру изделий, которые имеют, как правило, сложную форму. Таким образом, актуальным вопросом повышения производительности ультразвукового контроля является разработка автоматизированных систем контроля, гибких к изменяющейся геометрии контролируемых объектов.

В рамках автоматизированного контроля пространственно-сложных объектов требуемый угол ввода ультразвуковых волн может быть обеспечен, во-первых, применением манипуляторов, обеспечивающих не только линейное, но и угловое перемещение преобразователя в процессе сканирования, а во-вторых, точным учетом поверхности объекта контроля. Исходя из этого, большой интерес представляют промышленные шестиосевые роботизированные манипуляторы, которые на сегодняшний день находят все большее применение в автоматизированных системах ультразвукового контроля нового поколения [7—11]. Получение профиля поверхности контролируемого изделия обеспечивает точное позиционирование преобразователя в каждой точке траектории сканирования. Данная задача может быть решена путем создания гибридных систем, включающих в себя методы акустического контроля и оптической профилометрии [12, 13].

Кроме того, в рамках разработки и применения автоматизированных систем акустического контроля для обеспечения стабильного акустического контакта широкое распространение получило размещение объекта контроля в иммерсионной ванне. Данный подход не может применен, например, при контроле крупногабаритных изделий и материалов, теряющих свои свойства под воздействием воды, что делает актуальной задачу поиска альтернативных способов обеспечения стабильного акустического контакта.

Таким образом, целью данной работы является разработка технологии автоматизированного ультразвукового контроля пространственно-сложных металлических изделий. Подобная технология подразумевает использование методов оптической профилометрии для точного определения профиля поверхности контролируемого изделия, использование шестиосевых роботизированных манипуляторов для точного позиционирования ультразвукового преобразователя во всех точках траектории сканирования, а также применение устройств обеспечения локальной иммерсии, исключающих необходимость размещения объекта контроля в иммерсионной ванне.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Технология автоматизированного ультразвукового контроля пространственно-сложных металлических изделий

Предложенная в рамках данной работы технология состоит из следующих этапов:

1. Определение расположения объекта контроля в базовой системе координат роботизированного манипулятора с помощью электрического калибровочного щупа.
2. Получение профиля поверхности объекта контроля и построение траектории сканирования изделия.
3. Сканирование объекта контроля, получение и анализ результатов.

Для проведения экспериментальной верификации разработанной технологии использовался шестиосевой промышленный манипулятор KUKA KR 10 R1100 sixx WP. В рамках апробации технологии на роботизированном манипуляторе последовательно располагались электрический калибровочный щуп SPU-40 (TORMACH), оптический сканер HP 3D STRUCTURED LIGHT SCANNER PRO S2, а также устройство для обеспечения локальной иммерсии, внутри которого располагался ультразвуковой преобразователь OLYMPUS A306S-SU (рабочая частота 2,25 МГц, диаметр пьезопластины 13 мм).

В рамках экспериментальной верификации в качестве объекта контроля рассматривалась стальная отливка цилиндрической формы, изготовленная из стали 20 ГЛ, содержащая искусственные дефекты в виде боковых цилиндрических отверстий диаметром 4 мм. Расположение дефектов представлено на рис. 1. Для проведения экспериментальной верификации на боковой поверхности цилиндрического образца была определена зона контроля, а на гранях выделены характерные точки, необходимые для определения расположения объекта контроля в базовой системе координат роботизированного манипулятора (рис. 2). Электрический щуп устанавливается на манипуляторе и перемещается до касания им характерных точек, что позволяет определить их координаты в базовой системе координат роботизированного манипулятора (см. рис. 2).

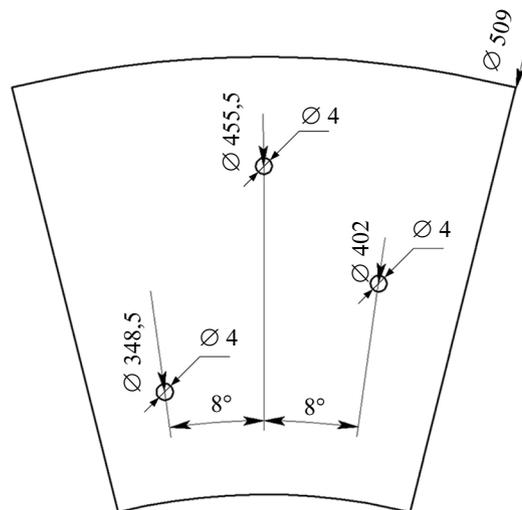


Рис. 1. Расположение дефектов в контролируемом изделии.

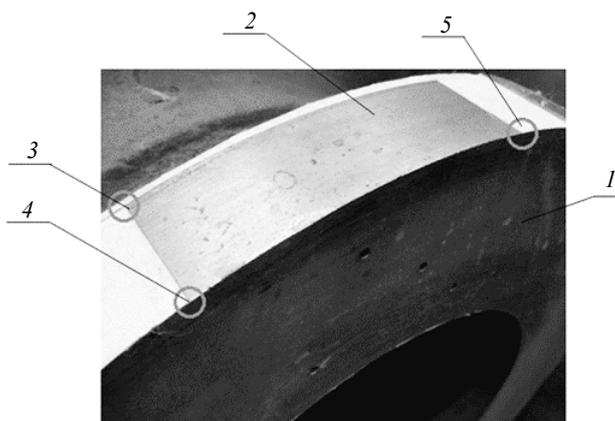


Рис. 2. Внешний вид изделия 1 с областью контроля 2 и с нанесенными на область контроля тремя характерными точками (3, 4, 5).

Для получения профиля контролируемого изделия оптический сканер располагается на роботизированном манипуляторе и на объект контроля проецируется регулярная сетка (рис. 3). По искажению регулярной сетки сканера определяются и фиксируются все возможные искажения формы поверхности изделия. Результатом многократного проецирования регулярной сетки на объект контроля и последующей обработки полученных данных является 3D-модель поверхности контролируемого изделия.

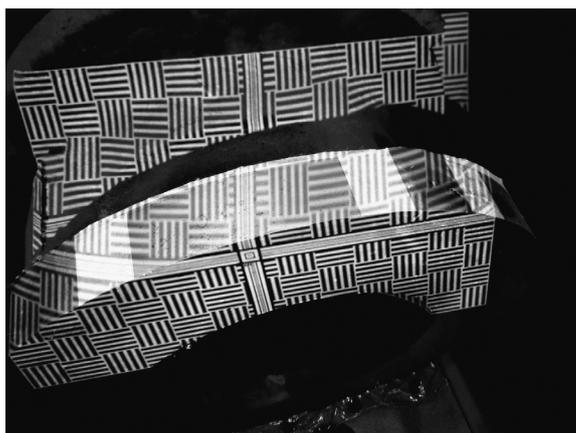


Рис. 3. Регулярная сетка изделия, полученная от оптического 3D-сканера.

После этого представляется возможным сгенерировать траекторию сканирования изделия с требуемым шагом перемещения ультразвукового преобразователя. На основании всех данных о геометрии изделия контроля и его калибровки, полученных от электрического шупа и оптического сканера, формируется траектория сканирования с заданным шагом перемещения (движения) манипулятора с устройством обеспечения локальной иммерсии по поверхности изделия.

2.2. Система обеспечения локальной иммерсии

Для обеспечения акустического контакта между ультразвуковым преобразователем и объектом контроля без необходимости использования ванны с водой, было разработано устройство обеспечения локальной иммерсии. Принципиальная схема данного устройства включает в себя:

- 1) держатель устройства;
- 2) ультразвуковой преобразователь;
- 3) иммерсионный слой;
- 4) согласующий слой.

В качестве иммерсионного материала использована силиконовая резина марки РТВ 12 12-AB-CN-RE-S (ABRO Industries) с удельным акустическим сопротивлением $Z_1 = 1,1$ МПа×с/м и скоростью продольных акустических волн, равной 1100 м/с. Толщина иммерсионного слоя $r_{им}$ была определена по формуле:

$$r_{им} = r_{ик} \frac{c_{им}}{c_{ик}}, \quad (1)$$

где $c_{им}$ — скорость звука в иммерсионном слое; $r_{ик}$ — толщина изделия контроля; $c_{ик}$ — скорость звука в изделии контроля [1, 14].

Применяя (1) и исходя из того, что объект контроля представлял собой стальную отливку, изготовленную из стали 20ГЛ (скорость продольных волн равна 5850 м/с) толщиной 104 мм, толщина иммерсионного слоя оказалась равной 19,55 мм.

Для акустического согласования иммерсионного слоя и объекта контроля материал согласующего слоя должен быть выбран на основании следующей формулы [14, 15]:

$$Z_c = \sqrt{Z_1 Z_2}, \quad (2)$$

где Z_1 — удельное акустическое сопротивление иммерсионного слоя; Z_2 — удельное акустическое сопротивление изделия.

Таким образом, используя в (2) акустические сопротивления силикона и стали марки 20ГЛ (1,1 и 45,6 МПа×с/м соответственно), требуемое акустическое сопротивление согласующего слоя составляет 7,1 МПа×с/м. Подобным акустическим сопротивлением обладает фторопласт Ф-4 К 20, который и был использован в качестве согласующего слоя. Толщина согласующего слоя выбиралась исходя из следующего соотношения:

$$h = \frac{\lambda_c}{4}, \quad (3)$$

где λ_c — длина волны в согласующем слое.

Таким образом, при рабочей частоте преобразователя, равной 2,25 МГц, и скорости продольных ультразвуковых волн во фторопласте, равной 1350 м/с, толщина согласующего слоя должна составлять 150 мкм.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для представления результатов в форме изображений требуется набор эхосигналов, полученных в каждой точке траектории сканирования, координаты данных точек, скорость ультразвуковых волн в объекте контроля, время прохождения ультразвуковых волн в устройстве обеспечения локальной иммерсии. Для повышения качества получаемых результатов проводилась пространственно-временная обработка зарегистрированных сигналов с использованием алгоритмов на основе метода синтезированной апертуры (Synthetic Aperture Focusing Technique). На рис. 4 представлен результат контроля в форме С-разверток для разных диапазонов глубины изделия, а на рис. 5 результаты представлены в форме В-развертки.

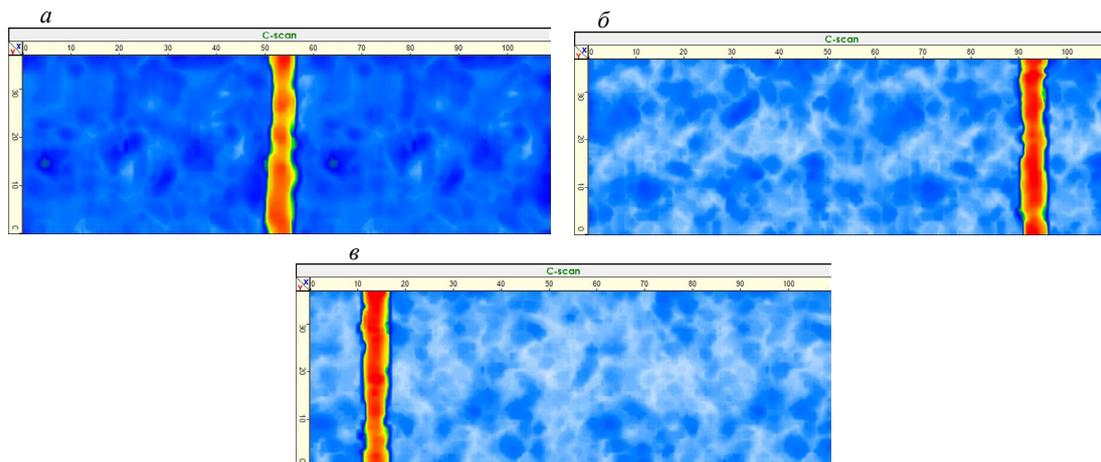


Рис. 4. Результаты контроля в форме С-разверток:
 а — глубина 22,5—27,5 мм; б — глубина 47,5—52,5 мм; в — глубина 72,5 — 77,5 мм.

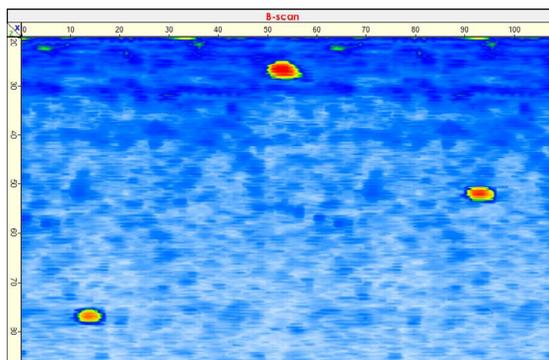


Рис. 5. Результаты контроля в форме В-развертки.

На В- и С-развертках амплитуда задана цветом в соответствии с выбранной цветовой палитрой. По двум осям С-разверток даны координаты точек изделия контроля, которые соответствуют длине и ширине области сканирования. По двум осям В-развертки задана длина области сканирования и глубина контроля. Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что с использованием разработанной технологии удалось вывить все дефекты в контролируемом образце.

Полученные результаты могут служить базисом для следующих исследований и разработок. Прежде всего, они должны быть направлены на повышение информативности результатов контроля. Например, важным вопросом является разработка подходов, обеспечивающих высокую эффективность задачи сопоставления реального изделия с результатами его контроля с целью локализации выявленных в нем несплошностей. Другим направлением в рамках задачи повышения информативности результатов контроля является внедрение передовых когерентных методов обработки сигналов, что позволит получать изображения дефектов в объектах контроля с высоким разрешением.

ВЫВОДЫ

В данной работе предложена технология ультразвукового контроля пространственно-сложных изделий. Данная технология является гибкой к изменяющейся форме и габаритам объекта контроля, что достигается за счет эксплуатации в качестве манипулятора шестиосевого промышленного робота, применения методов оптической профилометрии и использования устройства обеспечения локальной иммерсии. Разработанная технология ультразвукового контроля включает в себя определение расположения объекта контроля в базовой системе координат роботизированного манипулятора, восстановление профиля поверхности объекта контроля с применением оптической профилометрии и автоматизированного ультразвукового контроля изделия. Устройство обеспечения локальной иммерсии создает стабильный акустический контакт между преобразователем и объектом контроля. Полученные экспериментальные результаты демонстрируют способность разработанной технологии решать задачи ультразвуковой дефектоскопии.

Исследование выполнено с использованием научного оборудования Центра коллективного использования ТПУ и при финансовой поддержке Госзадания «Наука», проект № FSWW2020-0014, а также Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ермолов И.Н.* Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
2. *Ermolov I.N., Lange Yu. V.* Nerazrushayushchii control / Spravochnik. V. 7 t. T. 3. Ul'trazvukovoi kontrol. 2004. 864 с.
3. *Vatul'yan A.O., Belyak O.A.* Inverse Problem of Identifying a Small Defect Based on an Asymptotic Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 7. P. 549—555. [*Ватульян А.О., Беляк О.А.* Обратная задача идентификации малого дефекта на основе асимптотического метода // Дефектоскопия. 2020. № 7. С. 3—9. doi: 10.31857/S0130308220070015]
4. *Марусина М.Я., Федоров А.В., Прохорович В.Е., Беркутов И.В., Быченко В.А., Ткачева Н.В., Майоров А.Л.* Разработка акустических методов контроля напряженно-деформированного состояния резьбовых соединений // Измерительная техника. 2018. № 3. С. 60—64. doi:10.1007/s11018-018-1424-3

5. *Aleshin N.P., Mogilner L.Yu., Krysko N.V.* On Interaction of Elastic Waves with «Semitransparent» Defects // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 6. P. 469—478. [*Алешин Н.П., Могильнер Л.Ю., Крысько Н.В.* О взаимодействии упругих волн с «полупрозрачными» дефектами // Дефектоскопия. 2020. № 6. С. 3—13. doi: 10.31857/S0130308220060019]
6. *Dolmatov D. O., Abramets V.* Application of frequency-domain algorithms in ultrasound imaging of composite materials // MATEC Web of Conferences. V. 48. Space Engineering. Les Ulis, 2016. Article number: 3004. doi: 10.1051/mateconf/20164803004
7. *Xiao Z., Xu C., Xiao D., Liu F., Yin M.* An optimized robotic scanning scheme for ultrasonic NDT of complex structures // Experimental Techniques. 2017. V. 41. No. 4. P. 389—398. doi: 10.1007/s40799-017-0182-5
8. *Mineo C., Herbert D., Morozov M., Pierce S.G.* Robotic non-destructive inspection / 51st Annual Conference of the British Institute of Non-Destructive Testing. 2012. P. 345—352.
9. *Zhen X., Yong Y., Guang X.C., Guo X.D., Fang L.F., Liang L.X.* Profile tracking with ultrasonic alignment for automatic non-destructive testing of complex structures // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2018. T. 49. C. 134—142. doi: 10.1016/j.rcim.2017.06.007
10. *Hu H., Ye C., Wang X., Xu N.* Multi-angle spatial compound imaging in ultrasonic immersion testing using a single transducer // Journal of Instrumentation. 2018. V. 13. No. 7. P. P07004. doi: 10.1088/1748-0221/13/07/P07004
11. *Stetson J.T., de Odorico W.* Robotic inspection of fiber reinforced composites using phased array UT // AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2014. V. 1581. No. 1. P. 1889—1895. doi: 10.1063/1.4865054
12. *Dolmatov D., Zhvyrblyya V., Filippov G., Salchak Y., Sedanova E.* Advanced ultrasonic testing of complex shaped composite structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2016. V. 135. No. 1. C. 012010. doi: 10.1088/1757-899X/135/1/012010
13. *Zhvyrblyya V.Y., Filippov G.A., Sedanova E., Salchak Y.A.* Ultrasonic tomography of complex shaped carbon fiber composites // MATEC Web of Conferences. V. 48: Space Engineering. Les Ulis, 2016. T. 48. C. 3005. doi: 10.1051/confmatec/20164803005
14. *Truel R., Elbaum C., Chick B.* Ultrasonic Methods in Solid State Physics [Russian translation]. Moscow: Mir, 1978.
15. *Кретов Е.Ф.* Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. СПб.: СВЕН, 2014. 312 с.

ВЕРОЯТНОСТНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

© 2021 г. С.И. Буйло^{1,*}, Б.И. Буйло², М.И. Чебаков¹

¹Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича
Южного федерального университета (ЮФУ), Россия 344090 Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8А

²Российский университет транспорта (МИИТ), Россия 127055 Москва, Минаевский пер., 2

E-mail: *sibuilo@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.02.2021; после доработки 22.03.2021

Принято к публикации 26.03.2021

Рассмотрены особенности количественного определения достоверности результатов акустико-эмиссионного (АЭ) метода контроля и диагностики. Установлено, что традиционное определение достоверности через вероятность попадания контролируемого параметра в некоторый интервал иногда страдает информационной недоопределенностью. Показано, что учет вероятностно-информационных аспектов оценки достоверности позволяет однозначно связать понятие достоверности результатов контроля и диагностики с количеством информации, получаемой в ходе проведения самой операции контроля или диагностики. Приведены примеры практического определения информационной достоверности результатов метода АЭ.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, вероятность, диагностика, достоверность, контроль, коэффициент трения, плотность вероятности, теория информации К. Шеннона, трение, трибология.

DOI: 10.31857/S0130308221050055

Методы акустико-эмиссионного (АЭ) контроля и диагностики получили к настоящему времени уже такой уровень развития, который обеспечивает достаточно высокую степень надежности и достоверности получаемых результатов [1—8]. Вместе с тем анализ большого количества публикаций показывает, что представленные в них результаты в большинстве случаев получены без количественной оценки их достоверности. Это говорит о том, что вопросы количественной оценки достоверности проработаны еще явно недостаточно.

Существующие количественные методы оценки достоверности D обычно сводятся к оценке разности между единицей и так называемой «ошибкой контроля» ΔD , определяемой как сумма вероятностей отклонения правильной и принятия неверной гипотезы о результатах контроля [9]:

$$D = 1 - \Delta D; \quad \Delta D = \alpha + \beta, \quad (1)$$

где α и β — хорошо известные в математической статистике назначаемые вероятности (уровни значимости) ошибок 1-го и 2-го рода [3, 9—11].

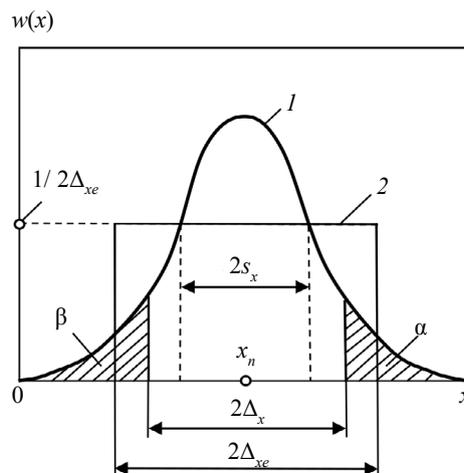


Рис. 1. Оценка доверительного интервала в процессе контроля: 1 — нормальный закон распределения; 2 — энтропийный интервал погрешности.

Таким образом, согласно (1), достоверность D в случае контроля какого-либо параметра (например, длины трещины) x_n есть вероятность $P = \int_{x_n - \Delta_x}^{x_n + \Delta_x} w(x) dx = 1 - (\alpha + \beta)$ того, что искомое значение x_n попадает в некоторый интервал $2\Delta_x$, определяемый $w(x)$ — плотностью распределения параметра и выбранными значениями вероятностей ошибок:

$$\alpha = \int_{x + \Delta_x}^{\infty} w(x) dx \text{ и } \beta = \int_{-\infty}^{x - \Delta_x} w(x) dx. \text{ Часто выбирают } \alpha = \beta = 0,05.$$

Графически эти вероятности соответствуют заштрихованным площадям на рис. 1. Определение достоверности, согласно соотношению (1), безупречно с точки зрения математической статистики, однако иногда страдает некоторой информационной недоопределенностью. Так, например, даже в случае очень большой погрешности (большая дисперсия s_x^2 с нормальным законом распределения все равно можно получить близкую к единице достоверность D оценки измеряемого параметра x , устремив к бесконечности длину интервала неопределенности $2\Delta_x$.

Таким образом, иногда получается как бы высокая достоверность результатов измерения контролируемого параметра, хотя фактически эти результаты имеют нулевую информативность.

ВВЕДЕНИЕ ПОНЯТИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ДОСТОВЕРНОСТИ

Для преодоления такой недоопределенности ранее нами предложен несколько иной подход к определению достоверности, в отличие от (1) связанный не с вероятностью, а с количеством информации q , получаемой в процессе оценки самого контролируемого параметра [3, 12]:

$$R = 1 - \exp(-q), \quad (2)$$

здесь R — некоторая «информационная достоверность» (т.е. определенная через количество полученной информации в ходе процедуры контроля).

Легко заметить, что информационная достоверность (2) ведет себя так же, как и традиционно определяемая согласно (1). Видно, что при малой информации, полученной в процессе контроля, она стремится к нулю, а при увеличении количества информации стремится к единице. Обоснуем возможность и правомерность такого подхода к оценке достоверности более подробно.

Согласно математической теории информации К. Шеннона, ее количество, получаемое в результате любого сообщения (естественно, в том числе и вследствие проведения процедуры контроля), равно убыли неопределенности, то есть разности энтропии до и после получения сообщения (в нашем случае проведения процедуры контроля) [13, 14]:

$$q = H(x) - H(x/x_n); \quad H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} w(x) \ln w(x) dx; \quad (3)$$

$$H(x/x_n) = - \int_{-\infty}^{\infty} w(x/x_n) \ln w(x/x_n) dx,$$

где q — количество информации; $H(x)$ и $H(x/x_n)$ — энтропия до и после процедуры контроля; x — контролируемая величина; $w(x)$ и $w(x/x_n)$ — плотности функций вероятностей значений контролируемой величины и погрешности ее определения.

Рассмотрим процесс убыли неопределенности в результате проведения операции контроля при равномерной плотности распределения $w(x) = 1/(x_2 - x_1)$ контролируемой величины и ее погрешности $w(x/x_n) = 1/2\Delta_x$. Здесь $(x_2 - x_1)$ — допустимые границы значений x . Подстановка в соотношения (3) значений плотностей вероятностей равномерного распределения показывает, что в этом случае после интегрирования имеем:

$$q = \ln(x_2 - x_1) - \ln 2\Delta_x = \ln[(x_2 - x_1)/2\Delta_x]. \quad (4)$$

Следовательно, в понятиях теории информации смысл контроля (или диагностики) состоит в сужении интервала неопределенности в ходе его (ее) проведения.

Для количественной оценки дезинформационного действия погрешности в расчетах достоверности при любом виде плотности распределения мы предлагаем воспользоваться понятием «энтропийного значения погрешности». По определению [15, 16], энтропийное значение по-

грешности Δ_{xe} — это погрешность с равномерным распределением, которая вносит такое же дезинформационное действие, что и погрешность с данным законом распределения.

Покажем практический расчет энтропийных значений погрешности на примерах равномерного и нормального распределений. Это легко сделать количественно аналогично оценкам дезинформационного действия помехи [13, 14] с использованием соотношений (3) для апостериорной энтропии.

Для случая равномерного закона распределения с плотностью $w(x)$:

$$w(x) = 1/2\Delta_x \text{ при } |x - x_n| \leq \Delta_x; w(x) = 0 \text{ при } |x - x_n| > \Delta_x,$$

оценим:

$$H(x/x_n) = - \int_{-\infty}^{\infty} w(x/x_n) \ln w(x/x_n) dx = - \int_{x_n - \Delta_x}^{x_n + \Delta_x} (1/2\Delta_x) \ln(1/2\Delta_x) dx = \ln 2\Delta_x; \quad (5)$$

$$s_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 w(x) dx = \int_{x_n - \Delta_x}^{x_n + \Delta_x} x^2 (1/2\Delta_x) dx = \Delta_x^2/3; \quad s_x = \Delta_x/\sqrt{3}; \quad 2\Delta_x = 2\sqrt{3}s_x. \quad (6)$$

Подставив (6) в (5), получим:

$$H(x/x_n) = \ln 2\sqrt{3}s_x. \quad (7)$$

Для случая нормального закона распределения с плотностью $w(x)$:

$$w(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s_x} e^{-\frac{x^2}{2s_x^2}}. \quad (8)$$

Учитывая, что $\int_{-\infty}^{+\infty} w(x) dx = 1$, $\int_{-\infty}^{+\infty} x^2 w(x) dx = s_x^2$, а $\ln \sqrt{e} = 1/2$, получим:

$$\begin{aligned} H(x/x_n) &= - \int_{-\infty}^{\infty} w(x/x_n) \ln w(x/x_n) dx = - \int_{-\infty}^{+\infty} w(x) [\ln \sqrt{2\pi}s_x + (x^2 / 2s_x^2)] dx = \\ &= \ln \sqrt{2\pi}s_x \int_{-\infty}^{+\infty} w(x) dx + (2s_x^2)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 w(x) dx = \ln \sqrt{2\pi}s_x + 1/2 = \ln(\sqrt{2\pi}e s_x). \end{aligned} \quad (9)$$

Приравнивая дезинформационные действия помехи (погрешности) с равномерным и нормальным распределением, то есть из равенства значений энтропий (5) и (9), получим:

$$\Delta_x = \Delta_{xe} = (\sqrt{2\pi}e / 2)s_x = \sqrt{\pi e / 2} s_x \approx 2,066s_x. \quad (10)$$

Аналогично расчету стандартного отклонения погрешности s_x по формуле (6) получим стандартное отклонение контролируемого параметра S_x :

$$S_x = (x_2 - x_1) / \sqrt{3}. \quad (11)$$

Таким образом, на основании (3), (4), (10) и (11), количество информации в случае произвольных законов распределения контролируемого параметра и его погрешности можно записать в виде следующего выражения:

$$q = \ln [(x_2 - x_1)_e / 2\Delta_{xe}] = \ln(S_x / ks_x), \quad (12)$$

где $(x_2 - x_1)_e$ — энтропийные границы значений контролируемого параметра x (интервал неопределенности до проведения операции контроля); S_x и s_x — стандартные отклонения контролируемого параметра и погрешности; k — некоторый коэффициент, зависящий от конкретных законов распределения контролируемого параметра и погрешности. В случае, если эти законы одинаковы, то $k = 1$. Если же погрешность имеет нормальный закон, а контролируемый параметр равномерный, то $k = 1,195$.

Получим это, подставив в (4) выраженный через стандартное отклонение согласно (6) интервал равномерного распределения контролируемой величины $x_2 - x_1$ и ее же энтропийное значение погрешности согласно (10):

$$q = \ln(2\sqrt{3}S_x/\sqrt{2\pi e} s_x) = \ln(S_x/1,195s_x), \quad (13)$$

откуда $k = 1,195$.

Эти два случая, соответствующие $k = 1$ и $k = 1,195$, наиболее часто реализуются при практических экспериментах.

Учитывая (10) и (12), нами и предлагается ввести по аналогии с (1) понятие так называемой «информационной достоверности» R , определив ее следующим образом [3, 12]:

$$R = 1 - dR, \quad (14)$$

где $dR = 2\Delta_{xe}/(x_2 - x_1)_e$ — некоторая информационная ошибка, откуда получим:

$$R = 1 - dR = 1 - 2\Delta_{xe}/(x_2 - x_1)_e = 1 - ks_x/S_x. \quad (15)$$

Сравнение (12) и (15) показывает, что

$$q = -\ln(1 - R),$$

откуда и получается обоснование правомерности введения нами ранее искомого соотношения (2), то есть определения информационной достоверности:

$$R = 1 - \exp(-q). \quad (16)$$

Следовательно, достоверность (2) оказалась однозначно связанной с количеством информации q , полученным в результате проведения операции контроля.

При использовании реальных методов неразрушающего контроля, требуемый параметр (например, размер дефекта, или длина трещины x_n) обычно не может быть проконтролирован непосредственно, а оценивается по параметрам какого-либо другого процесса, коррелирующего с контролируемым параметром (например, по амплитуде отраженного УЗ сигнала u_n или суммарного количества N_a актов акустической эмиссии (АЭ) и др.).

Пусть в результате экспериментов получено следующее уравнение регрессии:

$$\sigma_g = AN_a + B \text{ при } \rho < 1, \quad (17)$$

где σ_g — разрушающая нагрузка; N_a — суммарное количество актов АЭ до момента разрушения; ρ — коэффициент корреляции между σ_g и N_a ; A и B — некоторые константы.

Тогда, воспользовавшись (15) и известной формулой $s_x = S_x\sqrt{1-\rho^2}$ стандартного отклонения точек от линии регрессии при $s_x \ll S_x$ [11, 15, 17], нами получено следующее выражение для количественной оценки достоверности по коэффициенту корреляции при любых функциях распределения контролируемой величины и погрешности ее определения [3, 12]:

$$R = 1 - ks_x/S_x = 1 - k\sqrt{1-\rho^2}. \quad (18)$$

В случае, если погрешность имеет нормальный закон, а контролируемый параметр равномерный, то согласно (13) коэффициент $k = 1,195$.

Для наиболее распространенного случая одного и того же закона распределения контролируемого параметра и погрешности его определения $k = 1$, откуда формула оценки достоверности для этого случая приобретает наиболее простой вид:

$$R = 1 - \sqrt{1-\rho^2}. \quad (19)$$

Равномерное и нормальное распределения встречаются наиболее часто. Для других же видов распределений требуется дополнительный расчет k , аналогичный выводу соотношения (13).

Естественно, что коэффициент корреляции ρ (а, следовательно, и оценка достоверности R) зависят от точности подбора вида регрессионной кривой. При этом всегда следует подбирать наиболее простую функцию, обеспечивающую требуемую точность аппроксимации. Результаты наших экспериментов показывают, что во многих случаях для аппроксимации экспериментальных данных АЭ (например, по связи разрушающей нагрузки σ_g с суммарным количеством актов АЭ N_a) хорошо подходит самая простая линейная функция регрессии, обеспечивающая при этом достаточно высокие значения коэффициента корреляции ρ .

Следует также отметить, что оценка достоверности по коэффициенту корреляции – это всего лишь один из возможных способов вычисления достоверности. В общем случае оценка информационной достоверности должна проводиться по формуле (2) с подстановкой в нее количества информации, определяемого из соотношений (3) при подстановке в них конкретных значений плотностей функций вероятностей контролируемой величины и погрешности ее определения.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ДОСТОВЕРНОСТИ

Количественное определение информационной достоверности покажем на примере экспериментальных результатов АЭ диагностики прочности при статическом одноосном растяжении серии из 89 стандартных образцов стали 95X18 для внецентренного растяжения. Эта коррозионно-стойкая нержавеющая сталь широко используется в двигателестроении, а также в авиационной и ракетно-космической технике. Форма образцов и схема экспериментальной установки были аналогичны описанным в [3]. Испытывали плоские с надрезом образцы для внецентренного растяжения размерами $60 \times 60 \times 4$ мм. Затем по данным экспериментов рассчитывали выборочные функции распределения прочности σ_g , суммарного количества актов АЭ N_a и оценивали коэффициент корреляции между ними ρ (в экспериментах использовалось предложенное нами ранее восстановление потока актов АЭ по параметрам регистрируемых сигналов АЭ [1, 3]).

С помощью известного в статистике метода наименьших квадратов [10, 11, 17] было получено следующее уравнение регрессии:

$$\sigma_g = 382,23 N_a + 526,11 \quad \text{при } \rho = 0,9924, \quad (20)$$

где σ_g — разрушающее напряжение; N_a — суммарное количество восстановленных актов АЭ до момента разрушения; ρ — коэффициент корреляции между σ_g и N_a .

Подставив значение ρ из (20) в соотношение (19) получим, что достоверность результатов данного эксперимента равна 0,8769, то есть $R = 0,8769$.

Предложенный подход к оценке достоверности результатов перспективен и в задачах АЭ диагностики транспортных средств. Дело в том, что метод АЭ в последнее время находит все большее применение в решении задач диагностики изделий железнодорожного транспорта, однако пока, в основном, для контроля трещин и определения координат растущих дефектов в литых конструкциях [6, 18, 19]. Помимо решения аналогичных задач нами совместно с Ростовским государственным университетом путей сообщения на протяжении ряда лет проводятся исследования [20, 21] по новому перспективному направлению создания АЭ методов диагностики трения пары колесо—рельс со специальными покрытиями, повышающими его долговечность за счет значительного снижения трения [22]. Естественно, что создание метода АЭ диагностики трения требует и оценки достоверности результатов этой диагностики.

В настоящее время в пробной эксплуатации находится система лубрикации, основанная на создании на боковой поверхности рельса нового многослойного антифрикционного наномодифицированного покрытия. На рис. 2 приведены наши последние результаты по АЭ диагностике стадий разрушения этого принципиально нового антифрикционного покрытия. В ходе эксперимента исследовалась динамика изменения коэффициента трения и параметров сопутствующей АЭ в процессе испытания модельной трибосистемы «вращающийся ролик—неподвижная колодка» с многослойным наномодифицированным антифрикционным покрытием. Сигналы АЭ принимались и регистрировались с помощью цифрового АЭ диагностического комплекса A-Line 32D отечественной фирмы ИНТЕРЮНИС. Экспериментальная установка и методика подобных экспериментов подробно описаны нами в [20].

Метод АЭ диагностики трения имеет свои особенности. Известно, что процессы фрикционного взаимодействия сопровождаются настолько большим количеством излучаемых актов АЭ, что это приводит к почти полному перекрытию регистрируемых сигналов. Исследования показывают, что практически все отечественные и зарубежные АЭ диагностические комплексы, включая и такие

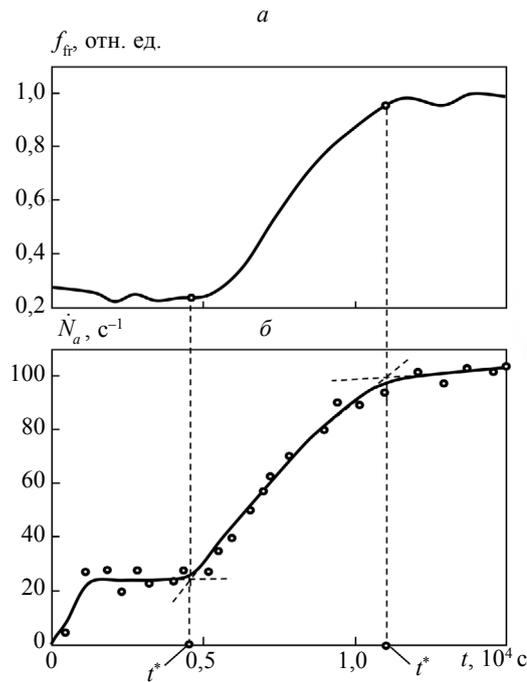


Рис. 2. Графики коэффициента трения (а) и восстановленной интенсивности потока актов АЭ (б).

известные системы, как Spartan и A-Line 32D, теряют из-за перекрытия более 90 % событий АЭ при высокой интенсивности источников АЭ внутри тела [1, 3]. Для решения этой проблемы в экспериментах использовалось предложенное нами ранее восстановление потока актов АЭ по параметрам регистрируемых сигналов АЭ [1, 3].

Анализ результатов рис. 2 показывает, что наблюдаются три стадии разрушения покрытия, и на всех стадиях отмечается сильная корреляция коэффициента трения с восстановленным потоком актов АЭ. Это позволяет предложить экспресс-оценку коэффициента трения по данным АЭ испытаний часто даже без прямого измерения этого коэффициента.

Статистическая обработка данных на рис. 2 методом наименьших квадратов дает следующее уравнение регрессии:

$$f_{\text{тр}} = 0,08025 \dot{N}_a + 0,05259 \quad \text{при} \quad \rho(f_{\text{тр}}, \dot{N}_a) = 0,9690, \quad (21)$$

где $\rho(f_{\text{тр}}, \dot{N}_a)$ — коэффициент корреляции между коэффициентом трения $f_{\text{тр}}$ и восстановленной интенсивностью потока актов АЭ \dot{N}_a .

Оценим достоверность определения $f_{\text{тр}}$ по формуле (21). Подставив в (19) определенное согласно (21) значение корреляции коэффициента трения с восстановленной интенсивностью потока актов АЭ, получим, что информационная достоверность R оценки коэффициента трения $f_{\text{тр}}$ по восстановленной интенсивности потока актов АЭ \dot{N}_a для данных на рис. 2 имеет величину порядка 73,5 %.

На рис. 3 показаны наши предварительные результаты по АЭ оценке коэффициента трения на стадии приработки материала подвижных шлицевых соединений вращающихся элементов самого грузоподъемного в мире транспортного вертолета Ми-26 [21]. Видно, что точки окончания времени приработки, определенные по стабилизации коэффициента трения (о) и по минимуму нормированной (выраженной в относительных единицах относительно максимальной) интенсивности потока актов АЭ (•), отличаются мало.

Оценим достоверность этих результатов. Методом наименьших квадратов был получен следующий вид зависимости коэффициента трения от восстановленной интенсивности потока актов АЭ:

$$f_{\text{тр}} = A\dot{N}_a + B = 0,0032 \dot{N}_a + 0,2854 \quad \text{при} \quad \rho(f_{\text{тр}}, \dot{N}_a) = 0,9292. \quad (22)$$

Подставив в (19) определенное согласно (22) значение корреляции коэффициента трения с восстановленной интенсивностью потока актов АЭ, получим, что достоверность R оценки коэффици-

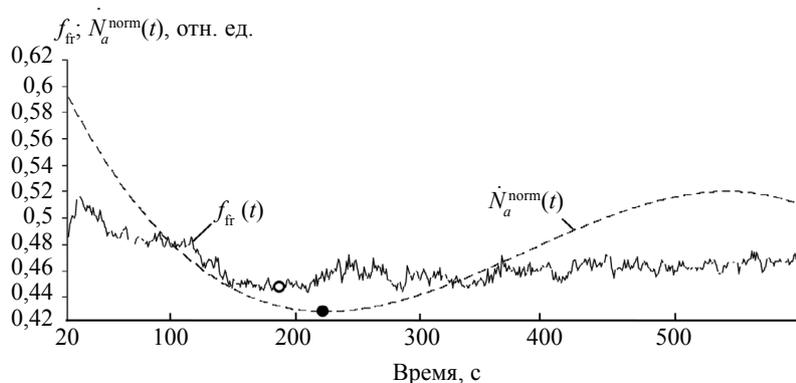


Рис. 3. Определение стадии приработки по коэффициенту трения и по минимуму нормированной интенсивности потока актов АЭ.

ента трения f_{fr} по восстановленной интенсивности потока актов АЭ \dot{N}_a в экспериментах, представленных на рис. 3, имеет величину порядка 63 %:

$$R = 1 - \sqrt{1 - \rho^2} = 1 - \sqrt{1 - 0,8634} = 0,6304.$$

Эти результаты показывают, что метод АЭ диагностики с количественным определением достоверности имеет хорошие перспективы применения в задачах неразрушающего контроля и диагностики прочности элементов различных видов транспортных средств.

ВЫВОДЫ

1. Информационная достоверность (определяемая через количество информации) качественно ведет себя так же, как и традиционная: так, она стремится к нулю при малом количестве информации, полученной в процессе контроля или диагностики, а при увеличении количества информации стремится к единице.

2. Учет вероятностно-информационных аспектов определения достоверности позволяет однозначно связать понятие достоверности результатов контроля и диагностики с количеством информации, получаемой в ходе проведения самой операции контроля или диагностики.

Исследования финансово поддержаны Южным федеральным университетом, грант № ВнГр-07/2020-04-ИМ (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буйло С.И. Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2017. 184 с.
2. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017. 368 с.
3. Буйло С.И. Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2008. 192 с.
4. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В., Комаров К.Л., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю., Кожемякин В.Л., Паньков А.Ф. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций. М.: Радио и связь, 2000. 280 с.
5. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Кареев А.Е., Лебедев Е.Ю., Кожемякин В.Л., Рамазанов И.С., Харламов Б.М. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций. М.: Машиностроение — Полет, 2008. 440 с.
6. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Ивлиев В.В., Кабанов С.И., Бехер С.А., Власов К.В., Бобров А.Л., Кареев А.Е., Лебедев Е.Ю., Канифадин К.В., Рамазанов И.С., Тенитилов Е.С., Кочетков А.С. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций. Новосибирск: Наука, 2011. 272 с.
7. Skalskyi V.R., Koval P.M. Some methodological aspects of application of acoustic emission. Lviv: Spolom, 2007. 336 p.
8. Буйло С.И. Связь амплитуды акустического излучения ансамбля микродефектов со скоростью деформации и восстановление количества актов АЭ при изменении динамического диапазона регистрируемых сигналов // Дефектоскопия. 2007. № 3. С. 69—77.
9. Волченко В. Н. Вероятность и достоверность оценки качества металлопродукции. М.: Металлургия, 1979. 88 с.

10. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1979. 496 с.
11. Лавренчик В. Н. Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 272 с.
12. Буйло С.И. Вероятностно-информационные аспекты оценки достоверности результатов неразрушающего контроля и диагностики прочности твердых тел // Дефектоскопия. № 5. 1996. С. 20—25.
13. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication // The Bell System Technical Journal. 1948. V. 27. July. October. P. 379—423, 623—656.
14. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: ИИЛ, 1963. 832 с.
15. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.
16. Рабинович В.И., Цапенко М.П. Информационные характеристики средств измерения и контроля. М.: Энергия, 1968. 202 с.
17. Щиголев Б.М. Математическая обработка наблюдений. М.: Наука, 1969. 344 с.
18. Степанова Л.Н., Грассман С.А., Кабанов С.И., Бобров А.Л., Бехер С.А., Большанов А.А. Акустико-эмиссионный контроль боковых рам коробчатого сечения // Дефектоскопия. 2011. № 3. С. 10—16.
19. Степанова Л.Н., Грассман С.А., Кабанов С.И., Бобров А.Л., Бехер С.А., Большанов А.А. Методика акустико-эмиссионного контроля колесных пар грузового вагона // Дефектоскопия. 2007. № 4. С. 67—75.
20. Буйло С.И., Ивановкин П.Г., Мясникова Н.А. Диагностика особых точек коэффициента трения многослойного наномодифицированного антифрикционного покрытия методом акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2013. № 6. С. 26—31.
21. Builo S.I., Builo B.I., Kolesnikov V.I., Vereskun V.D., Popov O.N. Application of the acoustic emission method in problems of vehicle diagnostics // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1636. № 1. 012006.
22. Колесников В.И., Мясникова Н.А., Мигаль Ю.Ф., Буря А.И., Мясников Ф.В., Чигвинцева О.П. Влияние адгезионного сцепления на границе раздела компонент на фрикционные характеристики полимерных композитов // Вестник РГУПС. 2011. № 4. С. 9—13.

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ДОННЫХ СИГНАЛОВ В ЗОНЕ СВАРНЫХ СТЫКОВ РЕЛЬСОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ

© 2021 г. А.А. Марков^{1,*}, Е.А. Максимова¹

¹ОАО «Радиоавионика», Россия 190005 Санкт-Петербург, Троицкий пр., 4Б

*E-mail: amarkovspb@gmail.com

Поступила в редакцию 05.03.2021; после доработки 09.04.2021

Принято к публикации 16.04.2021

Настоящие исследования являются продолжением работ, направленных на анализ параметров ультразвуковых сигналов при высокоскоростном контроле рельсов. Выполнен анализ в широком диапазоне скоростей контроля поведения амплитуд последовательностей донных сигналов в самой проблемной для бесстыкового пути зоне — зоне сварных стыков рельсов. Показано, что, начиная с определенных скоростей сканирования, в соответствии с действующей нормативно-технической документацией, многие зоны сварных стыков можно отнести к непроконтролируемым участкам. Результаты исследований могут быть использованы для оптимизации конструкций искательных систем высокоскоростных диагностических комплексов и при обосновании допустимых скоростей сканирования рельсового пути.

Ключевые слова: ультразвук, дефектоскопия, рельсы, высокоскоростной контроль, сварные стыки, донный сигнал, непроконтролируемые участки.

DOI: 10.31857/S0130308221050067

1. АКТУАЛЬНОСТЬ

Рельсовый путь, с точки зрения выполнения надежного ультразвукового контроля, можно разделить на следующие зоны: зона основного металла, болтовые стыки, стрелочные переводы и сварные стыки рельсов. Проблемы, возникающие при высокоскоростном ультразвуковом контроле болтовых стыков рельсов, рассмотрены в [1]. В то же время количество сварных стыков, ввиду принятой политики укладки на сети железных дорог ОАО «РЖД» бесстыкового пути, непрерывно увеличивается, одновременно сокращается число болтовых стыков [2].

Преимущества бесстыкового («бархатного») пути известны: уменьшенный расход металла (до 4 т на 1 км); снижение сопротивления движению поезда (на 12—15 %) и затрат на текущее содержание пути (на 25—30 %) по сравнению со звеньевым путем обеспечили этой конструкции широкое применение в большинстве стран мира [3—5].

К 2020 году протяженность бесстыкового рельсового пути на Российских ж/д достигла 79 % главных путей; количество сварных стыков рельсов достигло почти 9 млн шт., из них 8,5 млн стыков (95 %) выполнены электроконтактным способом преимущественно в стационарных условиях (на рельсосварочных предприятиях) [6].

Сварку рельсов контактным стыковым способом (КС) производят на стационарных или подвесных рельсосварочных машинах по утвержденным режимам (ГОСТ 34665—2020. Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом. Технические условия). С целью получения равномерности структуры металла в зоне стыка производят дифференцированную термическую обработку посредством нагрева всего сечения на индукционной установке с последующим принудительным охлаждением головки и нормализацией подошвы и шейки. Несмотря на эти меры, сварные стыки рельсов (рис. 1) во всем мире являются «слабыми» зонами рельсового пути по сравнению с зоной основного металла рельсов.

Известно, что в зоне сварки рельсов структура и механические свойства металла существенно отличаются от структуры основного металла. Согласно Классификатору дефектов сварных стыков рельсов 1.20.00-2008 (ОАО «ВНИИЖТ». Москва. 2008 г.), зона термического влияния сварного стыка суммарной шириной 80—160 мм (в обе стороны от шва) имеет 11 характерных зон с различной микроструктурой и с неравномерной твердостью металла. В процессе эксплуатации в пути вдоль сварного стыка появляются две зоны со снижением твердости на поверхности катания рельсов и с более высокой твердостью непосредственно в сварном шве [3]. Из-за допустимых местных неровностей по рабочим поверхностям (не более 0,2 мм по ГОСТ 34665—2020) и неравномерной твердости в зоне термического влияния, под воздействием колес под-

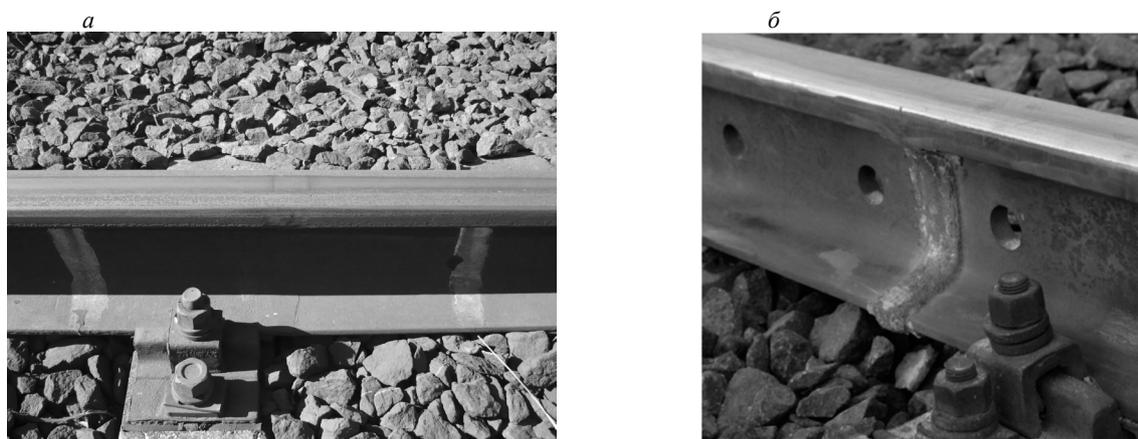


Рис. 1. Сварные стыки рельсов, выполненные:

a — электроконтактной сваркой с видимой зоной термического влияния (в центре между маркировкой стыка белой краской); *б* — алюминотермитной сваркой (с незачищаемым валиком усиления по всему периметру за исключением рабочих поверхностей).

вижного состава на головке рельсов образуется местный износ и смятие¹. В пределах ± 100 мм от середины сварного стыка появляются две седловины ассиметричной W-образной формы. После пропуска более 400 млн т глубина износа может составлять около 1,5 мм, смятия — 2,4 мм, а суммарная глубина неровности в зоне сварного стыка может достигать до 4,0 мм [7].

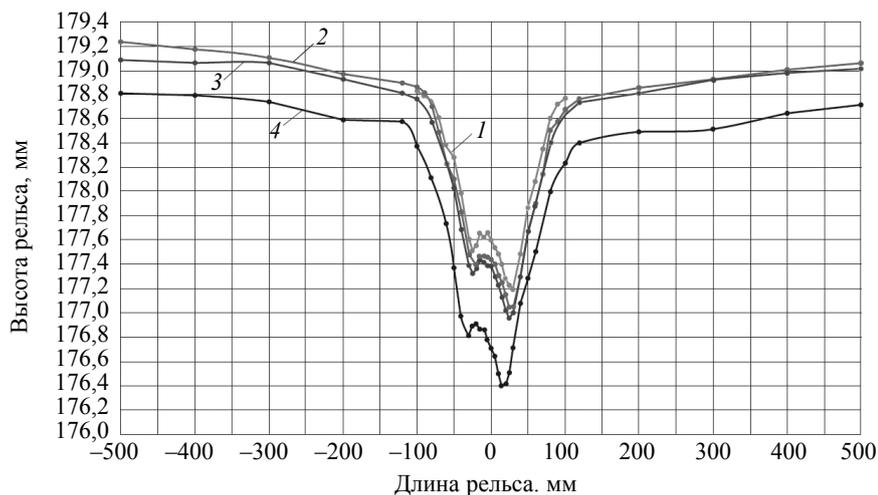


Рис. 2. Продольный профиль уровня головки рельса в зонах сварного стыка:

1 — при пропущенном тоннаже 210 млн т брутто; *2* — при 246 млн т брутто; *3* — при 268 млн т брутто; *4* — при 363 млн т брутто [7].

Наличие неровности приводит к повышению ударного воздействия на сварной стык при прохождении колес подвижного состава, причем большее влияние оказывается на зону, расположенную за швом. При этом форма смятия из W-образной стремится к V-образной с пиком в области второй седловины.

Рельсы, имеющие смятия в зоне сварных стыков глубиной более 1,0 мм, являются дефектными (ДР)² по коду 46.3-4 (здесь и далее кодовые обозначения рельсов приведены по Инструкции

¹Смятие — результат процесса поверхностной пластической деформации рельса при взаимодействии с колесами подвижного состава, проявляющийся в постепенном изменении формы и размеров рельса. Интенсивному развитию седловин в эксплуатации способствуют наличие начальной неровности в сварном стыке, образовавшейся при сварке рельсов с концевой искривленностью, отсутствие или нарушение упрочняющей термической обработки сварных стыков.

²Дефектные рельсы (ДР), в отличие от остродефектных (ОДР), не представляют непосредственную угрозу движению поездов и не требуют незамедлительного изъятия из пути.

«Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и острodefектных рельсов» Расп. ОАО «РЖД» № 2499р от 23.10.2014 г. М.: ОАО «РЖД», 2014). В зависимости от глубины смятия сварного стыка (от 1,0 до 4,0 мм) скорость движения поездов может быть ограничена до 25 км/ч. При глубине смятия более 4,0 мм рельсы заменяют или восстанавливают в первоочередном порядке.

Количество дефектов по коду 46.3-4 на сети ОАО «РЖД» ежегодно увеличивается, что представляет значительную проблему. За последние 6 лет количество таких смятий возросло более чем в 7 раз [8]. Вследствие повышенной динамической нагрузки даже незначительный по размеру внутренний дефект в зоне сварного стыка, быстро развиваясь, может привести к хрупкому излому рельса (ежегодно 30—40 % от всех изломов рельсов, допущенных на Российских ж/д, происходит из-за несвоевременного выявления дефектов сварки). Кроме того, вблизи смятий (на расстоянии 60—360 мм от сварного шва) часто (до 60 % от общего количества изломов) происходят разрушения рельсов по дефектам подошвы и головки рельсов [2].

Поэтому неразрушающему контролю зон сварных стыков рельсов должно уделяться повышенное внимание.

2. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

По действующей технологии качество ультразвукового (УЗ) контроля рельсового пути оценивают по косвенному признаку: по наличию на дефектограммах с представлением сигналов виде развертки типа В линии донных сигналов (д.с.) [9]. При перемещении ПЭП с углом ввода 0° (излучающего продольные УЗ колебания перпендикулярно поверхности катания) по поверхности катания рельсов на развертке типа В формируется непрерывная линия д.с., отраженных от донной поверхности рельса и отстоящих от зондирующих импульсов примерно на 60 мкс (высота наиболее распространенного на российских ж/д рельсов типа Р65 — 180 мм). Прерывание этой линии может происходить при наличии в рельсах конструктивных элементов (например, болтовых отверстий), внутренних дефектов, или, так называемых, помех зеркально-теневого метода (ЗТМ). К основным помехам ЗТМ, в соответствии с [10], относят: коррозию донной поверхности рельсов; нарушение параллельности поверхностей катания и подошвы рельсов; нарушение центровки искательной системы относительно продольной оси рельса; нарушения акустического контакта и изменения структуры металла в локальных зонах. Последние две причины часто проявляются в зоне сварных стыков, выполненных как электроконтактной, так и алюминотермитной сваркой. Так как именно в этих зонах, как показано выше, наблюдаются неровности (смятия) головки рельса из-за изменения структуры металла в зоне термического влияния, приводящие, в конечном счете, к нарушению акустического контакта.

В действующей нормативно-технической документации (НТД) «Положение о расшифровке результатов неразрушающего контроля рельсов» (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 09.01.2018 г. № ЦДИ-1/р с изменениями от 29.05.2018 №ЦДИ-558/р) сформулированы весьма жесткие требования относительно постоянного наличия линии донного сигналов на дефектограммах. Участки с прерыванием д.с. протяженностью 100 мм и более (для мобильных средств НК) признаются непроконтролируемыми и требуют проведения перепроверки ручными преобразователями с выходом операторов в путь в срок от 3 до 10 суток.

Как показывает обзорный анализ реальных дефектограмм контроля рельсов, вне болтовых стыков рельсов (в зоне основного металла и в зонах сварки) прерывания линий д.с., в основном, происходят именно в локальных зонах сварных стыков.

В последние годы на железных дорогах ОАО «РЖД» интенсивно внедряются мобильные средства дефектоскопии (вагоны-дефектоскопы и диагностические комплексы), декларирующие возможность контроля рельсов на скоростях до 80, 120 и даже 140 км/ч [11, 12].

При значительных скоростях сканирования наличие неровностей на сварных стыках (рис. 3а) вызывает снижение (нарушение) в этих зонах качества акустического контакта между УЗ преобразователями (УЗ ПЭП) и поверхностью катания рельсов. При уменьшении амплитуды д.с. ниже порогового уровня $U_{\text{пор}}$ линия донных сигналов прерывается (рис. 3б, поз. 1). Уровень $U_{\text{пор}}$ согласно действующему «Положению о системе неразрушающего контроля рельсов и эксплуатации средств рельсовой дефектоскопии в путевом хозяйстве железных дорог ОАО «РЖД» (утв. расп. ОАО «РЖД» от 26.07.2017 г. № 1471/р), устанавливается на уровне 0,2 от максимальной амплитуды д.с. U_0 на бездефектном участке рельса, что соответствует условной чувствительности $K_v = 14$ дБ каналов ЗТМ как для съемных, так и для мобильных средств контроля рельсов (рис. 3в). Развертка типа В на рис. 3 приведена в режиме «Перевернутый рельс», принятом во всех отечественных средствах дефектоскопии рельсов [9].

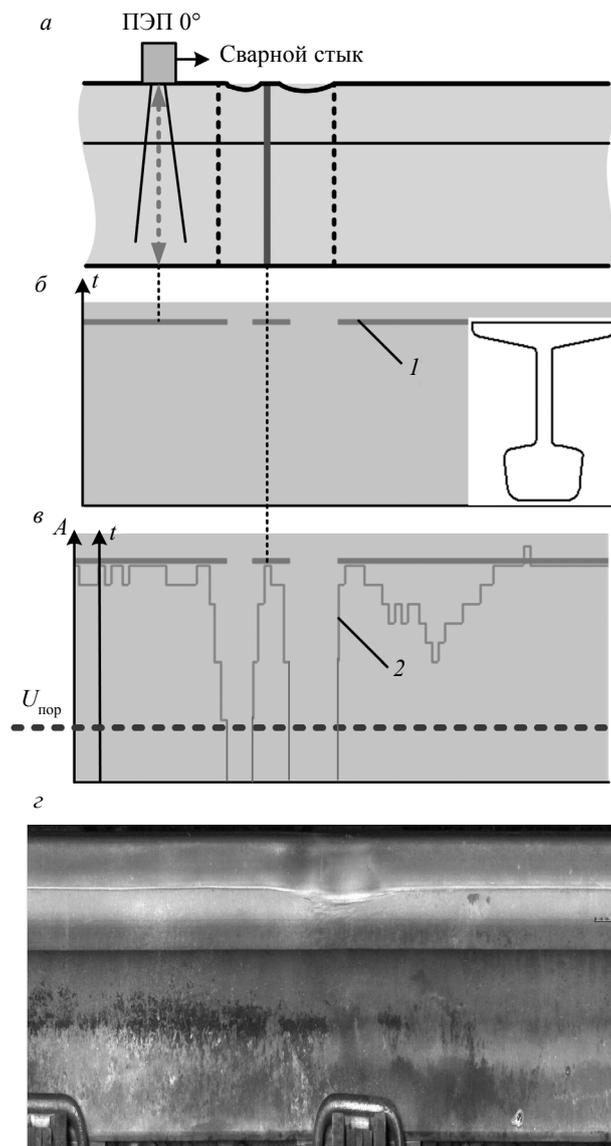


Рис. 3. Отображение на дефектограммах (б и в) линии донных сигналов (1), амплитудной огибающей донных импульсов (2), ослабляющихся в зоне сварного стыка с неровностью и изображение стыковой зоны на кадре, полученном с бортовой камеры дефектоскопического комплекса (г).

Таким образом, основной задачей исследований является оценка поведения донных сигналов при нормальном вводе УЗ колебаний в зоне сварных стыков в реальных условиях высокоскоростного контроля рельсов. На основе полученных результатов можно определить оптимальные диапазоны скоростей контроля с помощью диагностических комплексов с конкретной конструкцией искательной системы для получения требуемой достоверности контроля сварных стыков.

Результаты исследований могут быть использованы для дальнейшего улучшения технологии контроля рельсов и совершенствования средств скоростной дефектоскопии.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводили по результатам текущего контроля рельсов в зимний период на двухпутных участках пути с организацией скоростного пассажирского движения поездов и удовлетворительным качеством рельсов. Анализировали участки пути вне болтовых стыков и стрелочных переводов. В диагностическом комплексе была установлена типовая искательная система с подогревом конструкции и принудительной подачей контактирующей жидкости под УЗ преобразователи.

Необходимо отметить, что при традиционном сплошном УЗ контроле локализация зон сварных стыков рельсов, выполненных электроконтактной сваркой, не представляется возможной. Как наклонные УЗ каналы (с углами ввода УЗ колебаний $40\text{--}70^\circ$) с излучением поперечных колебаний, так и прямые преобразователи (0°) с излучением продольных колебаний, при сканировании зоны качественно обработанного сварного стыка на дефектограммах не формируют какие-либо эхосигналы. Поэтому анализ параметров сигналов в указанной зоне, особенно при высокоскоростном контроле, является нетривиальной задачей.

Отображение амплитудной огибающей последовательностей д.с. (рис. 3в, поз. 2) в большинстве случаев позволяет решить эту проблему. На дефектограммах, как правило, четко видны характерные для сварных стыков уменьшения амплитуд д.с., регулярно, через каждые 25 м (или 100 м), появляющиеся на обеих нитках пути (рис. 4а).

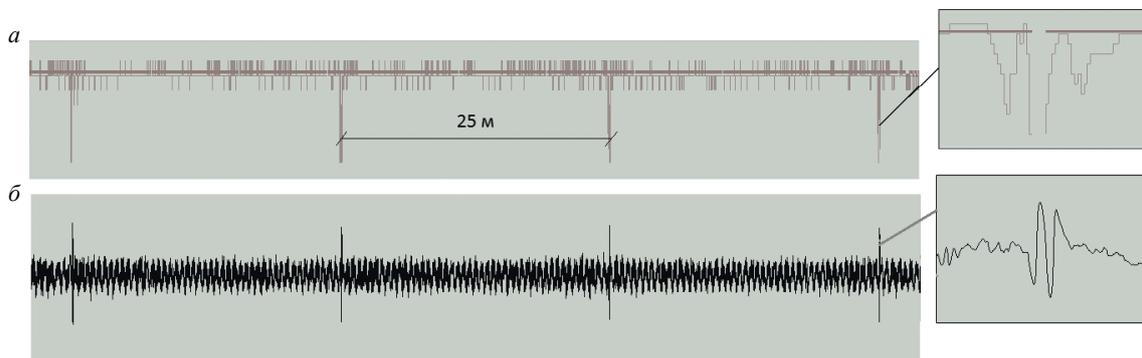


Рис. 4. Фиксация сварных стыков на дефектограммах вагона-дефектоскопа: по периодическим ослаблениям амплитудной огибающей д.с. (а); по сигналам магнитного канала (б).

В вагонах-дефектоскопах с системой активного намагничивания рельсов с помощью электромагнитов, размещенных на осях колесных пар специальной (индукторной) тележки [13], сварные стыки регулярно фиксируются и магнитным каналом (рис. 4б). Однако, как показано в [14], процесс автоматического выделения сигналов от сварных стыков является весьма сложной задачей по сравнению с выделением сигналов от других конструктивных элементов (например, болтовых стыков). И только совершенствование алгоритмов в вагонах-дефектоскопах (Патент на изобретение № RU 2671368 «Способ магнитного обнаружения регулярных объектов рельсов») позволил довести вероятность правильного распознавания сварных стыков до 85 %. При изменении способов фиксации магнитной информации в зоне сварного стыка (Патент на изобретение № RU 2696066 «Способ обнаружения и оценки сварных стыков рельсов») имеется возможность дополнительного повышения данного показателя. К сожалению, в настоящее время в высокоскоростных средствах дефектоскопии (из соображения безопасности) специальные индукторные тележки не используются, а на ходовых тележках реализация полноценного магнитного метода затруднительна.

На всех современных диагностических комплексах одновременно с дефектоскопией осуществляется и непрерывная видеорегистрация рельсового пути с нескольких ракурсов с жесткой синхронизацией получаемых данных всех методов неразрушающего контроля. Анализ видеоданных с бортовых камер также помогает распознать зону сварного стыка, проследить состояние поверхности катания и характер неровностей (рис. 3г).

Таким образом, локализацию зон сварных стыков на дефектограммах контроля в процессе исследований осуществляли всеми возможными способами: по ослаблению огибающей д.с., по сигналам магнитного канала и/или по видеокадрам.

Участки пути со сварными стыками анализировали на разных скоростях контроля, разделив их на 10 км/ч поддиапазоны (40—50 км/ч, 50—60 км/ч и т.д.). В каждом поддиапазоне выполнен анализ не менее 30 стыков (от 30 до 130 стыков), имеющих определенные аномалии, приводящие к прерыванию линии д.с. Всего на скоростях от 40 до 120 км/ч проанализировано около 13 500 м пути и около 500 сварных стыков рельсов, что является вполне репрезентативным количеством для статистического анализа.

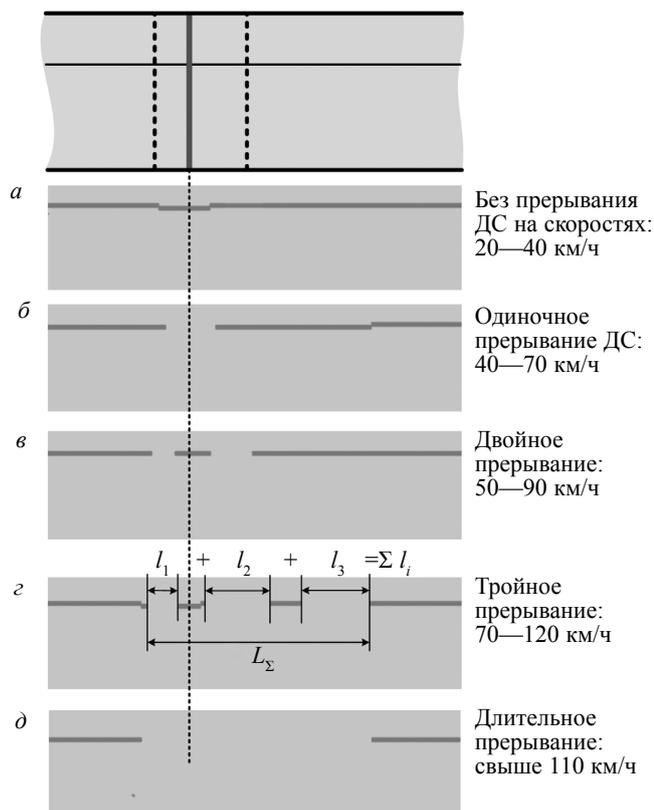


Рис. 5. Варианты прерываний линии донных сигналов в зоне сварных стыков в зависимости от скорости сканирования.

Характерные дефектограммы вагона-дефектоскопа для канала с прямым ПЭП (угол ввода УЗ колебаний 0°) при озвучивании зоны сварки приведены на рис. 5. Как видно, возможны пять вариантов состояния линии д.с. над сварным стыком.

При нормальной геометрии поверхности катания и скоростях сканирования, не превышающих 40 км/ч, как правило, линия д.с. не прерывается (рис. 5а). По мере увеличения скоростей или при наличии смятия головки рельса в зоне сварки наблюдаются одиночные, двойные и даже тройные (рис. 5б—г) прерывания линии д.с., которые, как будет показано ниже, на больших скоростях могут сливаться в одну большую зону (рис. 5д).

Последовательность анализа реальных дефектограмм во всем диапазоне реализуемых скоростей состояла из следующих операций:

просмотр всего проконтролированного участка рельсового пути и деление участка на поддиапазоны реализованных скоростей (по 10 км/ч);

локализация зон сварных стыков всеми доступными способами (по огибающей донного сигнала, реакции магнитного канала, видеокадрам);

определение общего количества сварных стыков в данном диапазоне скоростей и доли аномальных сварок, на которых линия донного сигнала прерывается на протяжении более 100 мм (по НТД «Положение по расшифровке дефектограмм» утв. расп. ОАО «РЖД» от 09.01.2018. № ЦДИ-1/р»);

измерение протяженности l_i отдельных прерываний линии донного сигнала; их суммы $\Sigma l_i (l_1 + l_2 + l_3)$ и общей протяженности L_Σ зоны нестабильного контакта (см. рис. 5г) на каждом сварном стыке;

получение усредненных данных измеряемых параметров для каждого поддиапазона скоростей сканирования;

построение по полученным данным, соответствующих зависимостей количества или протяженностей прерываний донных сигналов от скорости сканирования;

определение значений критических скоростей сканирования, при превышении которых наблюдается заметный рост анализируемых величин;

формулировка рекомендаций по результатам исследований.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученная по приведенной выше методике зависимость фиксируемых в широком диапазоне скоростей сканирования прерываний линии д.с. над зонами электроконтактных сварных стыков рельсов иллюстрируется рис. 6 (линия 1). Видно, что скорости сканирования 110—120 км/ч практически становятся предельными для контроля зон сварки, т.к. при этом в зоне почти всех сварных стыков наблюдаются прерывания линии д.с., протяженностью более 100 мм, недопустимой по действующей НТД. В то же время, до скоростей 70 км/ч количество «аномальных» сварных стыков (где $l_i > 100$ мм) составляет всего 1—2 % от общего количества проанализированных стыков. Можно предположить, что на этих участках имеются смятия головки рельса (дефект кода 46.3) в зоне термического влияния выше определенной величины.

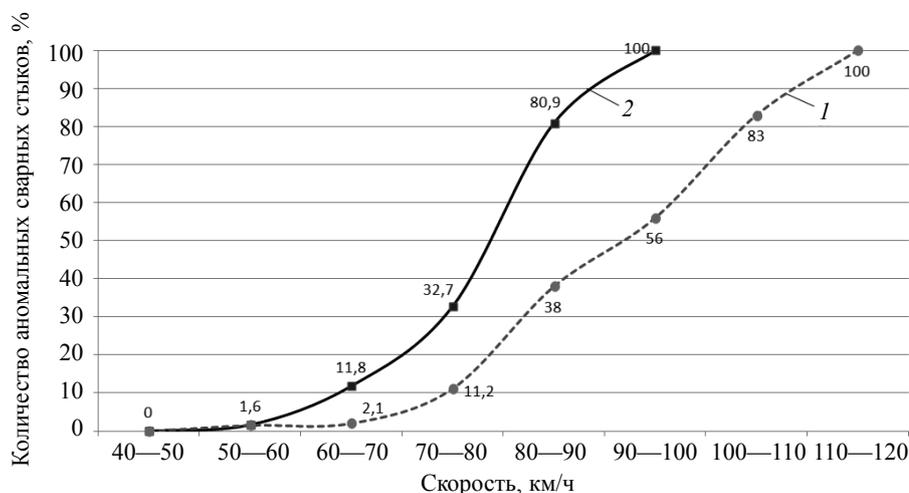


Рис. 6. Зависимость доли сварных стыков с зонами прерывания линий донных сигналов от скорости сканирования: 1 — с единичным прерыванием линии донного сигнала l_i (l_1 или l_2 , или l_3) > 100 мм; 2 — с суммарным прерыванием донного сигнала Σl_i ($l_1 + l_2 + l_3$) > 100 мм.

Если рассматривать не отдельные прерывания донных сигналов над сварными стыками, а суммировать их протяженности Σl_i (что более корректно), то количество участков в зоне сварных стыков, требующих повторного ручного контроля с выходом оператора в путь, значительно увеличивается (линия 2 на рис. 6). Видно, что, начиная с некоторых значений скоростей контроля, которые можно назвать критическими V_{lim} для конкретной системы УЗ контроля ($V_{lim} \approx 70—80$ км/ч), количество участков со значительным суммарным прерыванием линии донного сигнала Σl_i возрастает намного быстрее, чем при анализе прерываний l_i по отдельности.

С точки зрения дальнейшего совершенствования схем прозвучивания и оптимизации конструкции искательной системы дефектоскопического комплекса важно получить числовые значения протяженностей прерываний линии донных сигналов (рис. 7).

Видно, что до скоростей 70—80 км/ч протяженность всех пропаданий д.с. Σl_i (линия 2 на рис. 7) является приемлемой и не превышает допустимое значение 100 мм. Но уже при превышении скорости больше 80 км/ч эта зона заметно возрастает, достигая недопустимых для сплошного контроля рельсов значений.

Естественно, общая зона нестабильности донного сигнала L_{Σ} , включая кратковременные появления линии д.с. (линия 1 на рис. 7), существенно шире суммы отдельных прерываний. При анализе поведения искательной системы целесообразно рассматривать именно эту зависимость.

Одновременно, для дальнейшего анализа (в рамках будущей работы) причин и предложений по совершенствованию искательной системы комплекса, целесообразно оценить вклад каждого разрыва донного сигнала в суммарное значение. На рис. 7 также приведены значения размеров прерываний донных сигналов для каждого последовательного разрыва: l_1 — из-за смятия перед сварным стыком (по ходу движения комплекса); l_2 и l_3 — неровности за сварным стыком. Увеличение размеров l_2 и l_3 на скоростях выше 90 км/ч (рис. 7) свидетельствует о том, что основной вклад в удлинение зоны нестабильного контакта L_{Σ} вносится после проезда искательной системой зоны сварного шва, при этом прерывания l_2 и l_3 часто сливаются в единую зону.

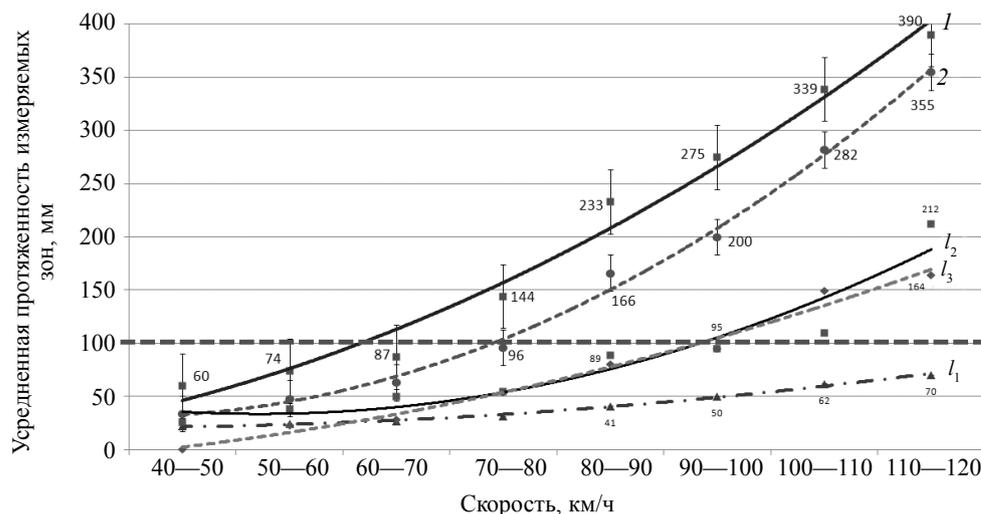


Рис. 7. Зависимости усредненных протяженностей зон (по рис. 5з) в области сварных стыков на разных скоростях сканирования:

1 — общая длина нестабильного контакта L_{Σ} ; 2 — сумма всех прерываний донного сигнала Σl_i и протяженности отдельных прерываний l_1, l_2, l_3 .

Возможно, это связано гидродинамическими (недостаточная смачиваемость поверхности катания контактирующей жидкостью) и механическими причинами взаимодействия акустического блока с неровностью в зоне смятия головки рельса, влияние которых заметно возрастает при увеличении скоростей сканирования.

При дальнейшем повышении скорости (более 110 км/ч) все три рассмотренные выше прерывания донных сигналов сливаются в один большой (до 350 — 400 мм) разрыв (см. рис. 5д). При этом очевидно, что опасные (с точки зрения образования внутренних дефектов) зоны сварных стыков при высокоскоростном контроле полноценно не проверяются. Вторичный контроль этих зон съемными или ручными дефектоскопами приведет к существенному увеличению необоснованных трудозатрат.

С учетом массового применения на линиях российских ж/д сварных стыков, выполненных электроконтактным способом (около 95 %), выше рассмотрено качество УЗ контроля именно в этих зонах. Однако в последние годы на линиях железных дорог активно внедряются и стыки, сваренные алюминотермитным способом. Как видно на рис. 8, в зонах термитной сварки (ТС) уже при скоростях 50—60 км/ч длительность зоны нестабильности УЗ контроля L_{Σ} превышает нормированную величину 100 мм. При скоростях 90—100 км/ч зона нестабильности достигает более 430 мм, что намного (на 35 %) хуже по сравнению с качеством контроля зон электроконтактной сварки (КС).

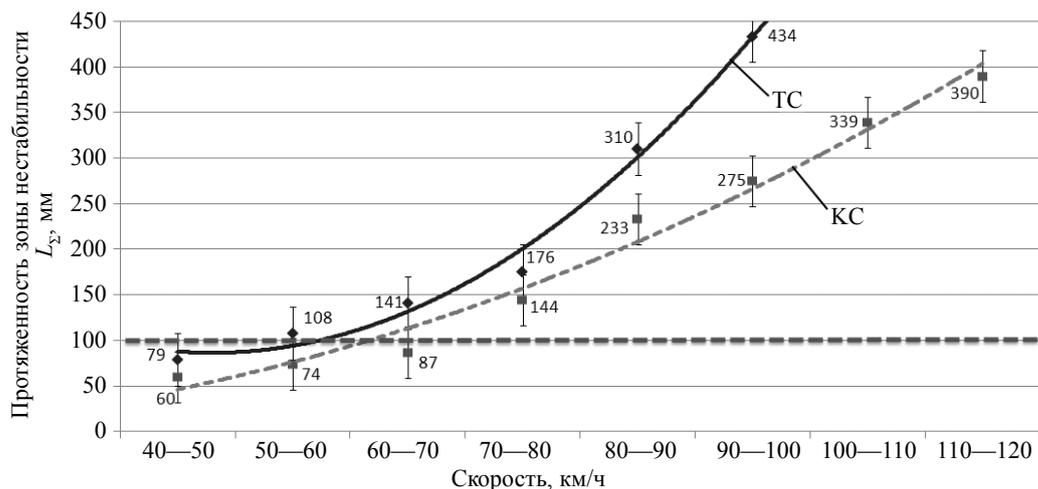


Рис. 8. Изменение протяженности участков L_{Σ} с нестабильным донным сигналом: в зоне алюминотермитных (ТС) и электроконтактных (КС) сварных стыков.

Очевидно, это объясняется сложностью обеспечения в полевых условиях прямолинейности свариваемых термитных стыков и низким качеством послесварочной шлифовки. Это дополнительно подтверждает актуальность дальнейшего совершенствования конструкций искательных систем и необходимость обоснованного выбора скоростей контроля в зависимости от состояния рельсового пути.

При моделировании процесса взаимодействия искательной системы дефектоскопического комплекса с неровностями в зоне сварного стыка важно знать временные параметры прохождения системы над аномальной зоной. Для этого по цифровым значениям усредненных протяженностей прерывания д.с. (в мм) в каждом поддиапазоне известных скоростей сканирования v определены времена прохождения неровностей ($t_{\Sigma} = \Sigma l_i / v$). Полученные значения отображены на рис. 9, где с увеличением скорости сканирования наблюдается увеличение времени взаимодействия искательной системы с неровностями сварки (КС) по закону:

$$t = 0,12v^2 - 0,09v + 2,4.$$

Видно, что при скоростях контроля выше 80 км/ч время «отрыва» искательной системы (над зоной пропадания д.с.) в 3-4 раз длительнее, чем при меньших скоростях (30—60 км/ч).

Зависимость времени $t_{\Delta L}$ нахождения преобразователя в зоне локации сигналов от болтовых отверстий, построенная по данным [1, рис. 10], с возрастанием скорости v сканирования уменьшается.

Совместный анализ зависимостей размеров участков прерывания д.с. в зоне сварки, где, безусловно, наблюдаются неровности поверхности катания рельса, и зон локации потенциальных дефектов в зоне основного металла, где неровности поверхности маловероятны, показывает, что с увеличением скоростей контроля действуют два противоположных фактора, отрицательно влияющих на качество контроля (см. рис. 9).

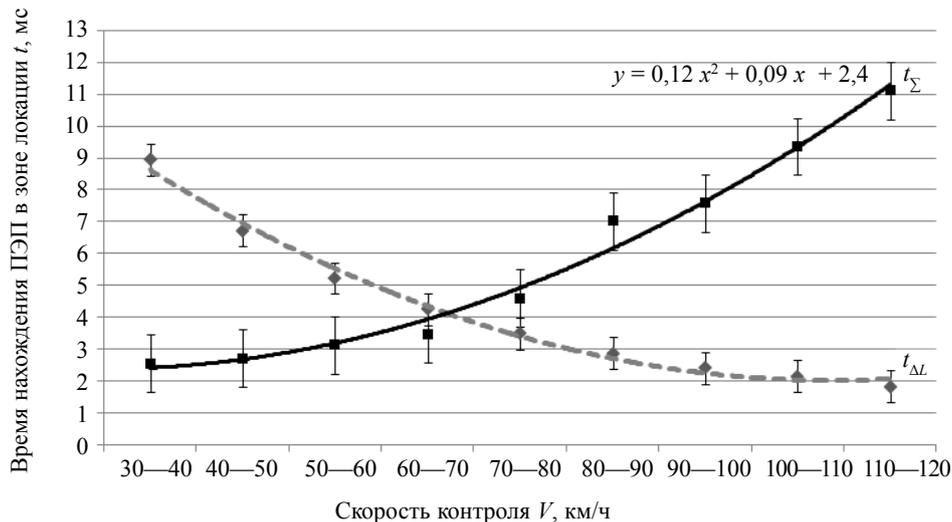


Рис. 9. Зависимости времени нахождения $t_{\Delta L}$ преобразователя в зоне локации дефекта и времени прохождения t_{Σ} участка нестабильного контакта в зоне сварного стыка от скорости контроля.

С одной стороны, заметно уменьшается зона локации дефекта, которую, как показано в [1], можно несколько увеличить путем расширения апертуры излучения/приема УЗ колебаний. С другой стороны, даже небольшие неровности на поверхности катания на больших скоростях сканирования приводят к значительным увеличениям непроконтролируемых участков рельсов.

Отметим, что данные исследования проведены по результатам контроля конкретного участка рельсового пути с помощью искательной системы определенной конструкции в зимний период. Возможно, при изменении первоначальных условий цифровые значения зон нестабильности акустического контакта могут отличаться. Особенно это касается количества образования седловин в зоне сварки, появление которых зависит от соблюдения режимов индукционной закалки на рельсосварочных предприятиях. Однако общие закономерности, выявленные в процессе исследований, безусловно, сохраняются и могут быть использованы как при совершенствовании

конструкции искательной системы и способов подачи контактирующей жидкости, так и при выборе оптимальных диапазонов скоростей контроля рельсов.

Без решения указанных проблем корректная реализация высокоскоростного контроля не эффективна. Повышение производительности контроля за счет увеличения скорости сканирования приводит к появлению участков с нестабильным акустическим контактом в зоне многих сварных стыков. Причем именно участки рельсов с потенциально опасными, с точки зрения образования дефектов (зоны сварных и болтовых стыков), при больших (выше 80 км/ч) скоростях сканирования УЗ методами озвучиваются некачественно. Это резко снижает вероятность выявления дефектов в этих зонах. По действующей технологии они должны быть перепроверены переносными дефектоскопами, что приводит к заметному увеличению суммарных трудозатрат на контроль. Поэтому выбор максимальных скоростей контроля надо проводить взвешенно, исходя из компромиссных решений.

Можно надеяться, что результаты данных исследований помогут при оптимизации конструкции искательной системы и технологии подачи контактирующей жидкости для уменьшения протяженности зон нестабильности акустического контакта.

ВЫВОДЫ

1. Как показывает выполненный анализ, с увеличением скорости сканирования количество и суммарная протяженность непроконтролированных участков (определенных по действующей НТД) в зоне сварных стыков рельсов растут, становясь значительными при скоростях более 80 км/ч. Выше этих скоростей ожидаемое повышение производительности высокоскоростного контроля нивелируется необходимостью проведения вторичного ручного контроля многочисленных и разнесенных по длине пути непроконтролированных при скоростном сканировании участков.

2. Хотя в зоне сварных стыков в процессе эксплуатации развиваются одиночные или двойные смятия (седловины) головки, при превышении скорости контроля выше определенной величины на дефектограммах начинают наблюдаться до трех прерываний линии донного сигнала, которые при высоких (выше 110 км/ч) скоростях часто сливаются в одно большое прерывание.

3. С ростом скоростей контроля изменения длительности прерываний линии донных сигналов над сварными стыками и зоны локации ΔL от ожидаемых дефектов в зоне основного металла происходят в противоположных направлениях, что свидетельствует о разной физической природе этих процессов.

4. Нормативные требования по качеству ультразвукового контроля рельсового пути (в части указаний допустимых протяженностей прерываний линии донных сигналов) для высоких скоростей сканирования должны быть скорректированы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков А.А., Максимова Е.А. Анализ параметров ультразвуковых сигналов при высокоскоростном контроле рельсов // Дефектоскопия. 2021. № 3. С. 3—16.
2. Шур Е.А., Федин В.М., Борц А.И., Ронжина Ю.В., Фимкин А.И. Пути устранения повышенной повреждаемости рельсов в зоне сварных стыков // Вестник ВНИИЖТ. 2019. Т. 78. № 4. С. 210—217.
3. Гудков А.В., Берзин М.М., Лозинский В.Н. Основные направления и результаты разработок отделения сварки за 60 лет / В сб. Сварочные и наплавочные технологии на железнодорожном транспорте. Труды ОАО «НИИ железнодорожного транспорта». Москва. 2008. С. 3—29.
4. Saita K., Karimine K., Ueda M., Iwano K., Yamamoto T., Hiroguchi K.. Trends in rail welding technologies and our future approach // Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report. 2013. No. 105. P. 84—92.
5. Степанова Л.Н., Кабанов К.В., Канифадин К.В., Лебедев Е.Ю., Бугров А.В. Исследования процесса сварки рельсов акустико-эмиссионным методом // Контроль. Диагностика. 2011. № 12. С. 12—15.
6. Калашиников Е.А., Королев Ю.А. Технологии сварки рельсов: тенденции в России и за рубежом // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 8. С. 2—6.
7. Коссов В.С., Краснов О.Г., Акашев М.Г. Влияние смятия в зоне сварных стыков на силовое воздействие подвижного состава на путь // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2020. Т. 79. № 1. С. 9—16.
8. Горьканова Т.Н. На заседании комиссии по рельсовому хозяйству // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 11. С. 19—20.
9. Марков А.А., Кузнецова Е.А. Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Книга 2. Расшифровка дефектограмм. С-Пб.: Ультра Принт, 2014. 332 с.

10. Гурвич А.К. Зеркально-теневой метод ультразвуковой дефектоскопии. М.: Машиностроение, 1970. 36 с.
 11. Тарабрин В.Ф. Сопоставление характеристик искательных систем мобильных средств дефектоскопии рельсов // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 10. С. 40—48.
 12. Князев Д.А. Скоростной контроль сварных рельсовых стыков железнодорожного пути эхолокационным методом ультразвукового контроля рельсов / В сб. Наука России: Цели и задачи. Сборник научных трудов по материалам V международной научной конференции. 2017. С. 16—21.
 13. Antipov A.G., Markov A.A. Detectability of rail defects by magnetic flux leakage method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. Т. 55. № 4. P. 277—285. [Антипов А.Г., Марков А.А. Выявляемость дефектов в рельсах магнитным методом // Дефектоскопия. 2019. № 4. С. 21—29.]
 14. Марков А.А., Антипов А.Г., Карелин М.В. Оценка достоверности автоматического распознавания сигналов от конструктивных элементов рельсового пути МД методом // Контроль. Диагностика. 2018. № 3. С. 16—27.
-

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ УСТАЛОСТНОЙ ДЕГРАДАЦИИ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПРИ ГИГАЦИКЛОВОМ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2021 г. Р.А. Саврай^{1,*}, Л.Х. Коган^{2,**}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, Россия 620049 Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
E-mail: *ras@imach.uran.ru; **lhkogan@e1.ru

Поступила в редакцию 25.01.2021; после переработки 20.02.2021

Принять к публикации 19.03.2021

В процессе эксплуатации поверхности деталей из аустенитных хромоникелевых сталей подвергаются интенсивным циклически повторяющимся контактными, в том числе ударным нагрузкам. Поэтому актуальной задачей является изучение контактной выносливости и разработка способов неразрушающего контроля усталостной деградации таких сталей. Целью работы явилось исследование возможности проведения вихретокового контроля усталостной деградации при контактном нагружении аустенитной стали AISI 321. Механические испытания на контактную гигацикловую усталость проводили по схеме пульсирующего ударного контакта «плоскость—плоскость» с ультразвуковой частотой нагружения. Показано, что проведение вихретокового контроля усталостной деградации при контактном нагружении стали AISI 321 возможно, однако имеет определенные ограничения вследствие немонотонного изменения показаний вихретокового прибора α от числа циклов нагружения. При этом по восходящей ветви можно контролировать степень разрушения поверхностного слоя, учитывая в методике контроля неоднозначный характер зависимостей показаний вихретокового прибора от числа циклов нагружения. Контроль может проводиться путем измерений показаний вихретокового прибора на частоте возбуждения вихретокового преобразователя $f = 124$ кГц. В этом случае в большей степени анализируются поверхностные слои, в которых интенсивно развиваются процессы усталостной деградации, оказывающие влияние на физические характеристики стали. Наибольшее влияние на величину α оказывает количественное соотношение аустенита и мартенсита деформации в зоне контроля.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, коррозионно-стойкая аустенитная сталь, структура, мартенсит деформации, контактная усталость, усталостное выкрашивание.

DOI: 10.31857/S0130308221050079

ВВЕДЕНИЕ

Аустенитные нержавеющие стали, в том числе сталь AISI 321, широко используются для изготовления различных элементов конструкций, которые в процессе эксплуатации подвергаются механическим нагрузкам. Это может приводить к изменению структурного состояния стали и снижению долговечности изделий. Поэтому большое внимание уделяется исследованию возможности неразрушающего контроля (НК) структурного состояния таких сталей и его изменения в различных условиях нагружения [1—15]. При этом отмечается эффективность использования методов вихретокового НК. В частности, вихретоковый контроль может быть применен для оценки объемной доли мартенсита деформации в стали AISI 321 при холодной прокатке [1—3], квазистатическом растяжении [4], малоцикловом [4, 5] и многоцикловом [4] усталостном нагружении, а также для обнаружения различных дефектов, возникающих в процессе эксплуатации изделий и этой стали [6, 7]. Полученные результаты неразрушающего контроля также используют для оценки остаточного ресурса контролируемых изделий.

В процессе эксплуатации поверхности деталей из аустенитных хромоникелевых сталей также подвергаются воздействию циклических напряжений и температур [16], интенсивным циклически повторяющимся контактными, в том числе ударными [17], нагрузкам. Поэтому актуальной задачей является изучение контактной выносливости и разработка способов неразрушающего контроля усталостной деградации таких сталей. При этом также целесообразно использование вихретокового контроля. Возможность использования амплитудного метода вихретокового НК для контроля усталостной деградации материала при контактном нагружении была продемонстрирована применительно к хромоникелевым и кобальтхромоникелевому покрытиям, полученным методом газопорошковой лазерной наплавки [18—21]. Отметим, что данные металлические покрытия, как и аустенитные стали, относятся к материалам с низкой магнитной проницаемостью, для контроля

свойств которых может быть рекомендовано использование методов вихретокового НК [22, 23]. В литературе отсутствуют работы, посвященные исследованию возможности неразрушающего контроля усталостной деградации аустенитной стали AISI 321 при контактном нагружении.

Цель настоящей работы — исследование возможности проведения вихретокового контроля усталостной деградации при контактном нагружении аустенитной стали AISI 321. Механические испытания на контактную гигацикловую усталость проводили по схеме пульсирующего ударного контакта «плоскость—плоскость» с ультразвуковой частотой нагружения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве материала исследования использовали коррозионно-стойкую аустенитную сталь AISI 321 промышленной плавки, химический состав которой представлен в табл. 1. Образцы для механических испытаний на контактную усталость изготавливали из исходного прокатанного листа толщиной 10 мм в виде пластин размерами 70 на 40 мм. Поверхность образцов готовили с помощью механической шлифовки на абразивных шкурках и последующей полировки на алмазных пастах до достижения зеркальной поверхности. Подробное описание методики подготовки поверхности образцов представлено в [24].

Таблица 1

Химический состав стали AISI 321, мас. %

C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	Mo	Co	Nb	Cu	P	S	Fe
0,05	16,80	8,44	0,33	1,15	0,67	0,26	0,13	0,03	0,31	0,036	0,005	Основа

Механические испытания на контактную гигацикловую усталость с ультразвуковой частотой нагружения по схеме пульсирующего ударного контакта «плоскость—плоскость» (рис. 1) проводили с использованием ультразвуковой установки и специальной оснастки оригинальной конструкции [25] при частоте колебаний индентора $f = 21$ кГц, амплитуде колебаний индентора $A = 10$ мкм, постоянной нагрузке на индентор $P = 170$ Н на базе $N = 10^9$ циклов нагружения. Индентор цилиндрической формы диаметром 8 мм с плоской торцевой поверхностью изготавливали из твердого сплава марки ВК8 (в мас. %: 92 WC, 8 Co). Подробное описание испытательной установки представлено в [24]. В результате контактно-усталостных испытаний с различным числом циклов нагружения на поверхности образца были сформированы пятна контакта. Дополнительную подготовку поверхности пятен контакта перед последующими исследованиями и измерениями не проводили.

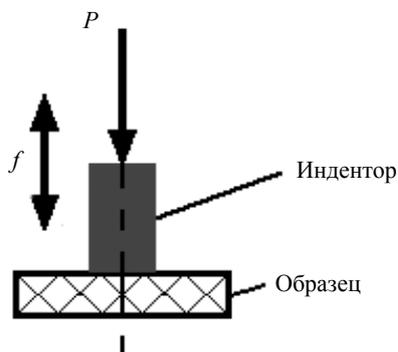


Рис. 1. Схема механических испытаний на контактную гигацикловую усталость.

Поверхности пятен контакта после контактно-усталостных испытаний изучали с применением сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA II XMU. Глубину контактных повреждений определяли с помощью оптического профилометра Wyko NT-1100. Рентгеноструктурный фазовый

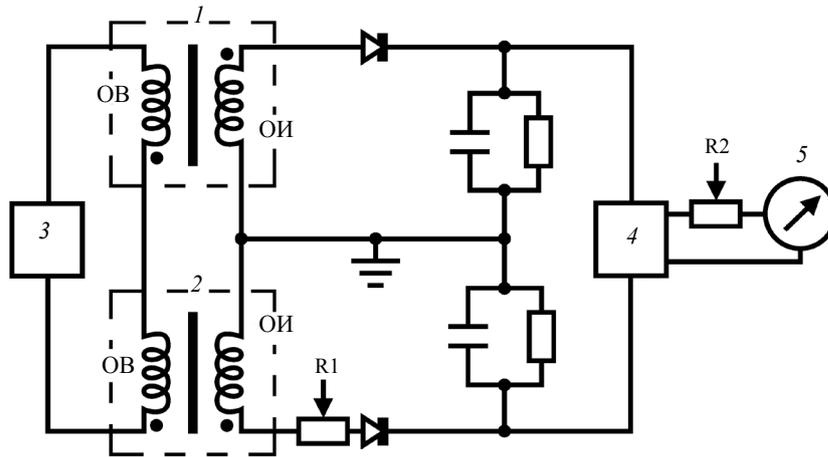


Рис. 2. Схема вихретокового прибора:

1 — рабочий преобразователь; 2 — компенсационный преобразователь; 3 — генератор сигналов ГЗ-33; 4 — усилитель постоянного тока У7-1; 5 — стрелочный индикатор М265М; ОИ — измерительная обмотка; ОВ — обмотка возбуждения; R1 — регулятор установки нуля; R2 — регулятор настройки чувствительности.

анализ выполняли на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 в CrK_α -излучении до и после контактно-усталостных испытаний.

Измерение электромагнитных параметров выполняли на лабораторном макете вихретокового прибора (рис. 2) с использованием дифференциально включенных накладных трансформаторных вихретоковых преобразователей с плоской торцевой поверхностью (рис. 3). Как показано на рис. 2, обмотки возбуждения (ОВ) рабочего (1) и компенсационного (2) преобразователей, включенные согласно, подключены к генератору ГЗ-33 (3). Сигнал с измерительных (ОИ), включенных встречно, обмоток преобразователей поступает на вход усилителя постоянного тока У7-1 (4), с выхода которого разностный сигнал поступает на стрелочный индикатор М265М (5). При таком способе включения преобразователей была обеспечена независимость показаний прибора от изменения условий окружающей среды. Локальность контроля использованного вихретокового преобразователя составляет около 6 мм в диаметре. Определяли показания вихретокового прибора α при частотах возбуждения преобразователя $f = 24, 36, 72, 96, 112$ и 124 кГц. Величину показаний вихретокового прибора α находили как среднее арифметическое из 5-6 измерений. Абсолютная погрешность измерений величины α составила $\Delta\alpha = \pm 3$ дел.

Для балансировки схемы измерений и настройки чувствительности использовали два стандартных образца с однородной структурой (образец № 1 и образец № 2), изготовленных из стали

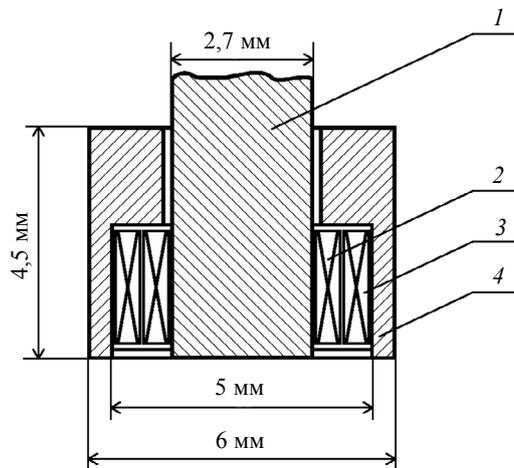


Рис. 3. Схематическое изображение накладного трансформаторного вихретокового преобразователя:

1 — стержневой ферритовый сердечник; 2 — измерительная обмотка; 3 — обмотка возбуждения; 4 — сердечник броневое типа.

одной марки, но несколько отличающиеся друг от друга по физическим свойствам за счет различных режимов термической обработки. Балансировка схемы измерений осуществлялась для каждой из использованных частот возбуждения вихретокового преобразователя следующим образом. При нахождении компенсационного преобразователя на воздухе, рабочий преобразователь помещали на стандартный образец № 1, после чего показания стрелочного индикатора устанавливали на значение 0 дел. с помощью регулятора R1 (см. рис. 2). Для настройки чувствительности, рабочий преобразователь помещали на стандартный образец № 2, после чего показания стрелочного индикатора устанавливали на значение 40 дел. с помощью регулятора R2 (см. рис. 2). После данной настройки проводили измерения на исследуемых образцах, компенсационный преобразователь при этом оставляли на воздухе. При данной схеме измерений величина $\alpha = 0$ дел. соответствует стандартному образцу, положительные значения α свидетельствуют о росте, а отрицательные значения α свидетельствуют об уменьшении сигнала вихретокового преобразователя.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Микроструктура стали AISI 321 в состоянии поставки состоит из деформированных аустенитных зерен (γ -фазы), мартенситных кристаллов (α' -фазы) и включений карбида титана TiC (рис. 4). Участки мартенсита в аустенитных сталях представляют собой параллельные пластинки, расположенные в деформированных зернах аустенита, что характерно для α' -фазы [26]. По данным рентгеноструктурного анализа содержание мартенсита деформации в стали составило 8 об. % (рис. 5). Это может быть обусловлено деформацией при производстве листа, поскольку стали данного класса характеризуются деформационной нестабильностью. Шероховатость поверхности стали перед контактно-усталостными испытаниями составила $Ra = 0,03$ мкм.

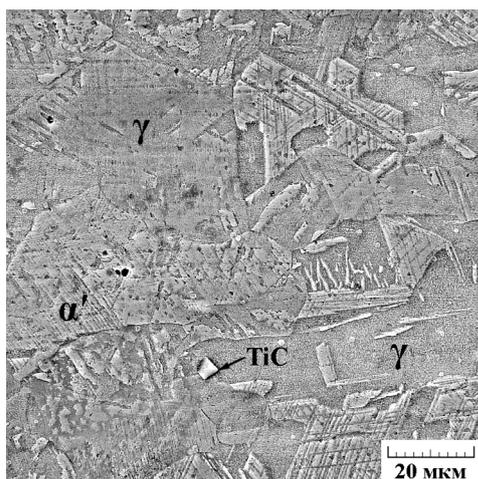


Рис. 4. Микроструктура стали AISI 321.

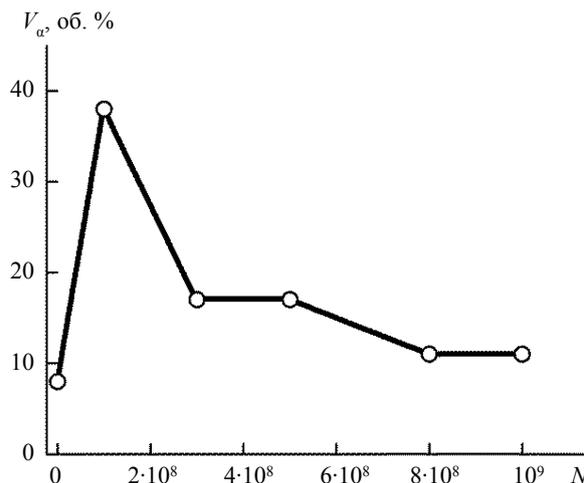


Рис. 5. Влияние числа циклов нагружения N на объемную долю α' -фазы $V_{\alpha'}$ в стали AISI 321 после контактно-усталостных испытаний.

Исследование пятен контакта методами сканирующей электронной микроскопии (рис. 6) показало, что в зоне воздействия плоской торцевой поверхности индентора (центральная зона) при числе циклов нагружения 10^8 на поверхности стали отчетливо видны следы поверхностного деформирования (обозначены стрелкой 1 на рис. 6а), которых не наблюдалось на поверхности образца перед испытаниями. На данной стадии нагружения еще не происходит разрушения поверхностного слоя стали. С увеличением числа циклов контактного нагружения до $3 \cdot 10^8$ — $5 \cdot 10^8$ наблюдается равномерное выкрашивание поверхностного слоя стали (обозначены стрелками 2 на рис. 6б, в), свидетельствующее о начавшемся разрушении поверхностного слоя в результате механического воздействия индентора. Нагружение до $8 \cdot 10^8$ — $1 \cdot 10^9$ циклов приводит к появлению глубоких и протяженных локализованных выкрошенных участков (обозначены стрелками 3 на рис. 6г), глубина которых составляет около 20 мкм [24].

В зоне воздействия на образец края индентора (периферийная зона) при числе циклов нагружения 10^8 на поверхности стали виден кольцеобразный (по форме индентора) след пластического

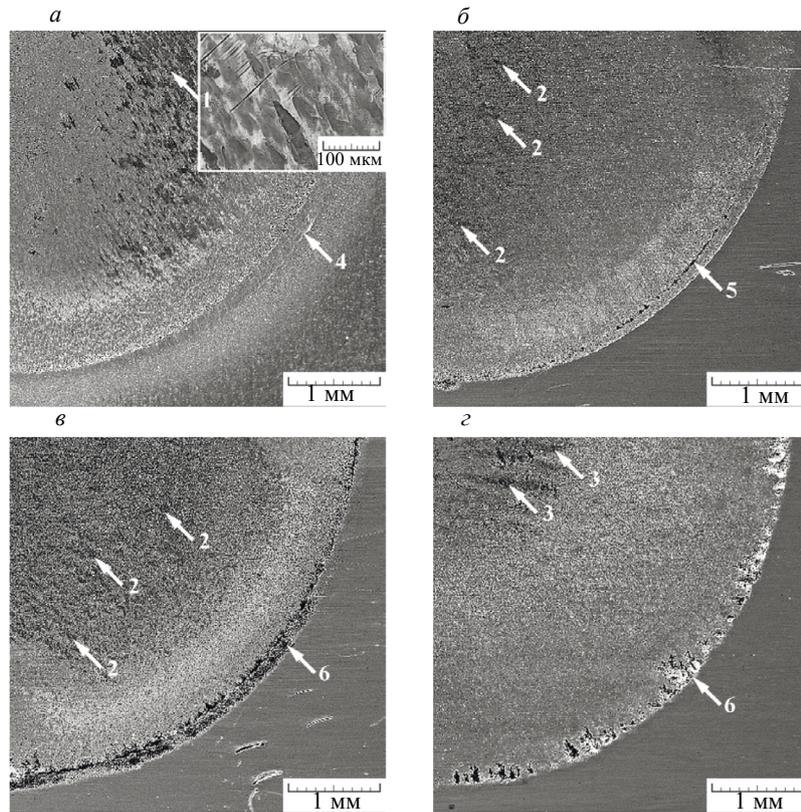


Рис. 6. Пятна контакта (электронная сканирующая микроскопия) после контактно-усталостных испытаний стали AISI 321 с числом циклов нагружения $N = 10^8$ (а), 3×10^8 (б), 5×10^8 (в) и 10^9 (г). Стрелками 1 обозначены следы поверхностного пластического деформирования, 2 — участки равномерного выкрашивания, 3 — глубокие и протяженные локализованные выкрошенные участки, 4 — кольцеобразный след пластического деформирования, 5 — частично соединенные между собой разрушенные участки, 6 — кольцеобразная зона разрушения.

деформирования (обозначен стрелкой 4 на рис. 6а). С увеличением числа циклов контактного нагружения до 3×10^8 на поверхности стали в периферийной зоне уже образовались разрушенные участки, которые частично соединены между собой (обозначены стрелкой 5 на рис. 6б). При числе циклов нагружения 5×10^8 эти участки сливаются и образуют на поверхности кольцеобразную зону разрушения (обозначена стрелками 6 на рис. 6в, г). Дальнейшее нагружение до 8×10^8 — 1×10^9 циклов сопровождается продолжающимся разрушением поверхности в зоне воздействия периферийной части индентора, о чем свидетельствует, в частности, увеличение глубины и протяженности контактных повреждений (см. рис. 6г). При этом глубина контактных повреждений в периферийной зоне превышает 40 мкм [24].

На рис. 7 представлены зависимости показаний вихретокового прибора от числа циклов нагружения, измеренные на пятнах контакта после контактно-усталостных испытаний стали AISI 321. Видно, что у стали AISI 321 для всех частот возбуждения вихретокового преобразователя зависимости показаний вихретокового прибора от числа циклов нагружения носят качественно одинаковый характер, при котором показания вихретокового прибора α сначала резко снижаются до 10^8 циклов нагружения. С увеличением числа циклов нагружения до 3×10^8 наблюдается достаточно интенсивный рост величины α , который сменяется ее менее интенсивным ростом при дальнейшем нагружении вплоть до 10^9 циклов. При этом, на максимальной использованной частоте $f = 124$ кГц рассматриваемая зависимость является наиболее выраженной (см. рис. 7е). Это свидетельствует о том, что в поверхностных слоях более интенсивно развиваются процессы усталостной деградации, влияющие на физические характеристики стали, поскольку глубина проникновения электромагнитного поля δ зависит от частоты (чем больше f , тем меньше δ) [27].

Наблюдаемое резкое снижение показаний вихретокового прибора α у стали AISI 321 при увеличении числа циклов нагружения до 10^8 (см. рис. 7) обусловлено значительным ростом доли мартенсита деформации в поверхностном слое от 8 до 38 об. % (см. рис. 5). Образование ферро-

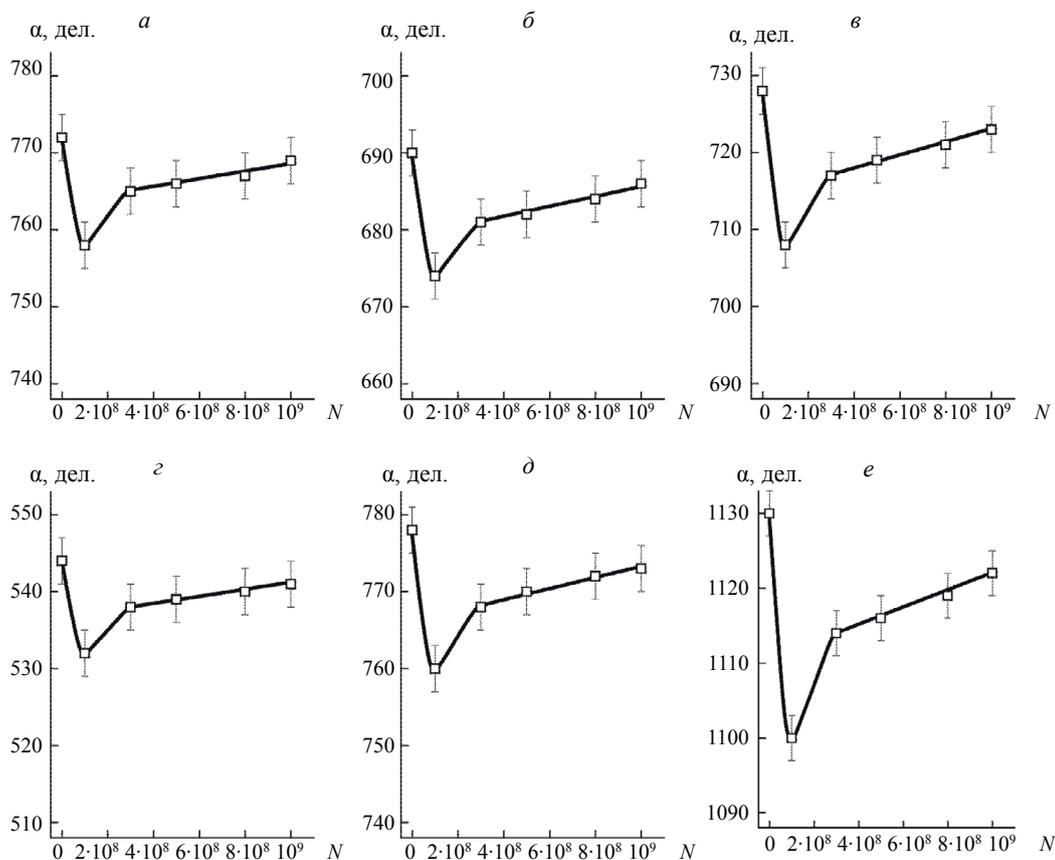


Рис. 7. Зависимости показаний вихретокового прибора α на частоте $f = 24$ (а), 36 (б), 72 (в), 96 (г), 112 (д) и 124 кГц (е) от числа циклов нагружения N , измеренные на пятнах контакта после контактно-усталостных испытаний стали AISI 321.

магнитной α' -фазы повышает магнитную проницаемость стали. Показания вихретокового прибора α прямо пропорциональны ЭДС, наведенной в измерительной обмотке вихретокового преобразователя, являются комплексным параметром и определяются значениями начальной магнитной проницаемости μ_i и удельного электрического сопротивления ρ объекта измерения $\alpha \sim \sqrt{1/(\mu_i \cdot \rho)}$ [28]. Поэтому рост магнитной проницаемости должен приводить к снижению величины α . При увеличении количества циклов до 3×10^8 наблюдаемый рост величины α у стали AISI 321 может быть обусловлен достаточно резким снижением доли мартенсита деформации в поверхностном слое до 17 об. % (см. рис. 5) в результате начавшегося его разрушения (см. рис. 6б). Дальнейшее нагружение до 10^9 циклов сопровождается менее интенсивным ростом показаний вихретокового прибора α , что обусловлено продолжающимся снижением доли мартенсита деформации в поверхностном слое до 11 об. % (см. рис. 5). Однако в диапазоне числа циклов нагружения 3×10^8 — 5×10^8 и 8×10^8 — 1×10^9 доля ферромагнитной α' -фазы по данным рентгеноструктурного анализа существенно не изменяется и соответственно составляет 17 и 11 об. %, а величина α продолжает расти (см. рис. 7). Это может быть обусловлено большей чувствительностью амплитудного метода вихретокового НК по сравнению с рентгеноструктурным фазовым анализом, причем наибольшая чувствительность была достигнута при измерениях на максимальной использованной частоте $f = 124$ кГц (см. рис. 7е). Следует подчеркнуть, что пластическая деформация и разрушение поверхности стали также должны оказывать влияние на показания вихретокового прибора [18—21]. Однако в рассматриваемом случае выделить вклад этих факторов в величину α достаточно сложно, поскольку магнитные свойства аустенита (парамагнетик) и мартенсита деформации (ферромагнетик) резко отличаются, и показания вихретокового прибора будут определяться главным образом количественным соотношением этих двух фаз в зоне контроля.

Следовательно, используя амплитудный метод вихретокового НК, можно контролировать процесс усталостной деградации при гигацикловой контактной усталости стали AISI 321. Однако зависимости показаний вихретокового прибора имеют нисходящую и восходящую ветви, граница

между которыми при данных условиях нагружения составила 10^8 циклов (см. рис. 7). По восходящей ветви можно контролировать степень разрушения поверхностного слоя, учитывая в методике контроля неоднозначный характер зависимостей показаний вихретокового прибора от числа циклов нагружения. Контроль может проводиться путем измерений показаний вихретокового прибора на частоте возбуждения вихретокового преобразователя $f = 124$ кГц. В этом случае в большей степени анализируются поверхностные слои, в которых интенсивно развиваются процессы усталостной деградации, оказывающие влияние на физические характеристики стали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована возможность проведения вихретокового контроля усталостной деградации при контактном нагружении аустенитной стали AISI 321. Механические испытания на контактную гигацикловую усталость проводили по схеме пульсирующего ударного контакта «плоскость—плоскость» с ультразвуковой частотой нагружения. Показано, что проведение вихретокового контроля усталостной деградации при контактном нагружении стали AISI 321 возможно, однако имеет определенные ограничения вследствие немонотонного изменения показаний вихретокового прибора α от числа циклов нагружения. Зависимости показаний вихретокового прибора имеют нисходящую и восходящую ветви, граница между которыми при данных условиях нагружения составила 10^8 циклов. При этом по восходящей ветви можно контролировать степень разрушения поверхностного слоя, учитывая в методике контроля неоднозначный характер зависимостей показаний вихретокового прибора от числа циклов нагружения. Контроль может проводиться путем измерений показаний вихретокового прибора на частоте возбуждения вихретокового преобразователя $f = 124$ кГц. В этом случае в большей степени анализируются поверхностные слои, в которых интенсивно развиваются процессы усталостной деградации, оказывающие влияние на физические характеристики стали. Наибольшее влияние на величину α оказывает количественное соотношение аустенита (парамагнетик) и мартенсита деформации (ферромагнетик) в зоне контроля. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методик оценки степени усталостной деградации и остаточного ресурса изделий из аустенитных сталей, подвергающихся в процессе эксплуатации контактно-усталостному нагружению.

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4 и ИФМ УрО РАН по теме «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3. Электронная сканирующая микроскопия и механические испытания выполнены в ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН. Авторы выражают благодарность А.Л. Осинцевой за участие в экспериментальных исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Silva V.M.A., Camerini C.G., Pardal J.M., de Blás J.C.G., Pereira G.R.* Eddy current characterization of cold-worked AISI 321 stainless steel // *Journal of Materials Research and Technology*. 2018. V. 7. Is. 3. P. 395—401.
2. *Liu K., Zhao Z., Zhang Z.* Eddy current assessment of the cold rolled deformation behavior of AISI 321 stainless steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2012. V. 21. Is. 8. P. 1772—1776.
3. *Khan S.H., Ali F., Nusair Khan A., Iqbal M.A.* Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reduction // *Computational Materials Science*. 2008. V. 43. Is. 4. P. 623—628.
4. *De Backer F., Schoss V., Maussner G.* Investigations on the evaluation of the residual fatigue life-time in austenitic stainless steels // *Nuclear Engineering and Design*. 2001. V. 206. Is. 2—3. P. 201—219.
5. *Mishakin V., Gonchar A., Kurashkin K., Kachanov M.* Prediction of fatigue life of metastable austenitic steel by a combination of acoustic and eddy current data // *International Journal of Fatigue*. 2020. V. 141. 105846. P. 1—6.
6. *Corte J.S., Rebello J.M.A., Areiza M.C.L., Tavares S.S.M., Araujo M.D.* Failure analysis of AISI 321 tubes of heat exchanger // *Engineering Failure Analysis*. 2015. V. 56. P. 170—176.
7. *Wilam M., Čermáková I.* Integrity of VVER steam generator tubes // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 1995. V. 23. Is. 2. P. 151—153.
8. *Klyushnikov V.A.* Influence of plastic deformation temperature on ultrasonic and electromagnetic properties of austenitic steel // *Materials Today: Proceedings*. 2019. V. 19. P. 2320—2322.
9. *Walther F., Eifler D.* Cyclic deformation behavior of steels and light-metal alloys // *Materials Science and Engineering A*. 2007. V. 468—470. P. 259—266.

10. *Niffenegger M., Leber H.J.* Sensitivity of the magnetization curves of different austenitic stainless tube and pipe steels to mechanical fatigue // *Journal of Nuclear Materials*. 2008. V. 377. Is. 2. P. 325—330.
11. *Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Gonchar A.V., Kachanov M.* On assessing damage in austenitic steel based on combination of the acoustic and eddy current monitoring // *International Journal of Engineering Science*. 2019. V. 135. P. 17—22.
12. *Lang M., Johnson J., Schreiber J., Dobmann G., Bassler H.-J., Eifler D., Ehrlich R., Gampe U.* Cyclic deformation behaviour of AISI 321 austenitic steel and its characterization by means of HTC-SQUID // *Nuclear Engineering and Design*. 2000. V. 198. Is. 1—2. P. 185—191.
13. *Das A.* Magnetic properties of cyclically deformed austenite // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2014. V. 361. P. 232—242.
14. *Dobmann G.* Fatigue monitoring by NDT of austenitic stainless steel at ambient temperature and 300°C and new attempts to monitor a fracture mechanics test // *Procedia Engineering*. 2014. V. 86. P. 384—394.
15. *Novotný P., Sajdl P., Macháč P.* A magneto-optic imager for NDT applications // *NDT & E International*. 2004. V. 37. Is. 8. P. 645—649.
16. *Замараев Л.М., Смирнов С.В., Матафонов П.П.* Исследование термоциклической долговечности стали 12Х18Н10Т в водородной и воздушной средах // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2008. № 2. С. 46—49.
17. *Dobromyslov A.V., Taluts N.I.* An electron-microscopic study of the deformation structure of the 12KH18N10T steel after explosive loading in spherical systems // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2015. Is. 5. P. 109—117. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2015.5.109-117>
18. *Саврай Р.А., Макаров А.В., Горкунов Э.С., Коган Л.Х., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л.* Вихретоковый контроль усталостной деградации при контактном нагружении NiCrBSi покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки // *Дефектоскопия*. 2015. № 11. С. 43—58.
19. *Savrai R.A., Makarov A.V., Gorkunov E.S., Soboleva N.N., Kogan L.Kh., Malygina I.Yu., Osintseva A.L., Davydova N.A.* Eddy-current testing of the fatigue degradation of a gas powder laser clad NiCrBSi—Cr₃C₂ composite coating under contact fatigue loading // *AIP Conference Proceedings*. 2017. V. 1915. 040049. P. 1—4. <https://doi.org/10.1063/1.5017397>
20. *Savrai R.A., Makarov A.V., Gorkunov E.S., Soboleva N.N., Kogan L.Kh., Malygina I.Yu., Osintseva A.L.* Eddy-current testing of fatigue degradation in additionally heat-treated gas powder laser clad NiCrBSi coating under contact fatigue loading // *AIP Conference Proceedings*. 2018. V. 2053. 040088. P. 1—4. <https://doi.org/10.1063/1.5084526>
21. *Саврай Р.А., Коган Л.Х., Макаров А.В., Соболева Н.Н.* Особенности вихретокового контроля усталостной деградации наплавленного лазером кобальтхромоникелевого покрытия при контактном нагружении // *Письма о материалах*. 2020. Т. 10. № 3. С. 315—321.
22. *Бакунов А.С., Мужижкий В.Ф., Шубочкин С.Е.* Современное решение задач вихретоковой структуроскопии // *Дефектоскопия*. 2004. № 5. С. 79—84.
23. *Savrai R.A., Malygina I.Yu., Kolobylin Yu.M.* An approach to eddy-current evaluation of the structural state in a cast aluminum–silicon alloy subjected to surface laser heat treatment // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2019. V. 38. Is. 3. 81. P. 1—7.
24. *Savrai R.A., Makarov A.V., Osintseva A.L., Malygina I.Yu.* Estimating the contact endurance of the AISI 321 stainless steel under contact gigacycle fatigue tests // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2018. V. 27. Is. 2. P. 601—611.
25. Патент РФ № 162959. Устройство для контактно-усталостных испытаний образцов материалов / Р.А. Саврай, А.В. Макаров // *БИМП*. 2016. № 19.
26. *Ozgowicz W., Kurc A.* The effect of the cold rolling on the structure and mechanical properties in austenitic stainless steels type 18-8 // *Archives in Materials Science and Engineering*. 2009. V. 38. Is. 1. P. 26—33.
27. *Дорофеев А.Л.* Индукционная структуроскопия. М.: Энергия, 1973. 176 с.
28. *Дякин В.В., Сандовский В.А.* Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. М.: Наука, 1981. 136 с.

КОНТРОЛЬ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВАРНОЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ E 6013 С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА—ХУАНГА

© 2021 г. Аиша Халид¹, М. Газанфар Али^{1,2,*}, Тарик Майрадж Расул Хан^{1,**}, Мухаммад Имран¹, Салман Низар¹, Акил Шах¹, Абид Шах¹

¹Национальный университет науки и технологий, Карачи, Пакистан

²Комплекс лабораторий Пакистанского совета научных и промышленных исследований, Карачи, Пакистан

E-mail: *ghazanfar.ali@pnec.nust.edu.pk; **khan.tariq.msu@gmail.com

Поступила в редакцию 13.12.2020; после доработки 13.01.2021

Принята к публикации 22.01.2021

Все сварные детали при эксплуатации при повышенных температурах подвергаются старению. Воздействие на конструкцию повышенных температур отрицательно сказывается на характеристиках материала и ухудшает ударную вязкость всей конструкции. Сварная деталь также имеет предрасположенность к хрупкому разрушению. Чтобы определить вязкость разрушения, не всегда можно вывести образец из эксплуатации. Поэтому желательно разработать неразрушающий контроль *in situ* (НК), основанный на методе ультразвукового контроля (УЗК) наряду с перспективными методами обработки сигналов. Ультразвуковой контроль (УЗК) — широко используемый метод неразрушающего контроля, который хорошо показывает себя при контроле дефектов. Цель исследования — выявить количественную связь между сигналами УЗК и механическими свойствами термообработанных образцов сварных соединений. Данные были получены при контроле образцов сварных швов при различных значениях температуры с помощью УЗК. Наблюдается тенденция между изменением характеристик УЗ-сигнала, т.е. затуханием и изменением механических свойств. Распределение УЗ-сигналов с точки зрения различных уровней термического старения также было исследовано с использованием преобразования Гильберта—Хуанга (ПГХ) на полученных УЗ-сигналах. Экспериментальные зависимости позволяют прогнозировать ударную вязкость сварного образца исключительно посредством УЗК *in situ*, пока образец будет оставаться в эксплуатации.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, преобразование Гильберта—Хуанга, ультразвуковой контроль, ударные испытания.

DOI: 10.31857/S0130308221050080

1. ВВЕДЕНИЕ

Методы неразрушающего контроля (НК) — это экономичные и вполне реализуемые методы, которые используются для обнаружения дефектов без разрушения детали [4, 5]. Основная цель неразрушающего контроля — удостовериться, что контролируемый объект пригоден для эксплуатации. Помимо дефектоскопии, с помощью неразрушающего контроля также можно определять и свойства материала [6]. Эхометод УЗК является наиболее предпочтительным методом неразрушающего контроля для определения свойств материалов. Этот метод требует небольших капиталовложений, в то время как чувствительность контроля гарантирует определение характеристик материала с разумным уровнем достоверности. Для исследования образца этот метод не требует подготовки обеих боковых поверхностей [7]. Эхометод используется для контроля эрозии, дефектов, химического контакта, подтверждения качества шва с внутренней и внешней стороны, определения характеристик материала, измерения глубины и т. д. Контроль конструкций в процессе эксплуатации с эхометодом позволяет спрогнозировать оставшийся эксплуатационный ресурс. Благодаря своевременно проведенной процедуре контроля возможно продлить срок службы, приняв конкретные действия для предотвращения аварии [8]. Микроструктурные свойства материала определяют такие механические свойства, как предел текучести, твердость, ударную вязкость и т.д. [9], а также по-разному влияют на коэффициент затухания ультразвука [10, 11]. Следовательно, параметры полученных ультразвуковых сигналов содержат неявную информацию о микроструктурных свойствах контролируемого образца.

Значительная работа была проведена по исследованию термической обработки сварного образца [12]. Литература показывает, что существует линейная зависимость между затуханием УЗ-сигнала и температурой, до которой нагреваются образцы. Термообработка при повышенных температурах приводит к увеличению размера зерен с линейным увеличением ударной вязкости. Однако меньшее количество работ связаны с исследованием зависимости между затуханием УЗ-сигнала и ударной вязкостью свариваемого материала с помощью метода неразрушающего контроля.

Эта исследовательская лакуна восполняется за счет использования перспективного метода частотно-временного анализа энергии, называемого преобразованием Гильберта Хуанга. Этот метод имеет потенциал для прогнозирования остаточного срока службы объекта путем анализа данных нелинейных и нестационарных сигналов [13]. Объединение методов разложения на эмпирические моды и спектрального анализа Гильберта называется преобразованием Гильберта—Хуанга (ПГХ) [14]. ПГХ обычно используется в радиолокационных системах мониторинга состояния и анализа изменений в окружающей среде [15]. В данном исследовании ПГХ используется для описания обратно отраженных и поглощенных эхосигналов, и была произведена оценка его эффективности.

Методология исследования, представленная в следующем разделе, заключается непосредственно в экспериментальной работе. Результаты эксперимента показывают текущее состояние образца, а также методики неразрушающего контроля (измерение затухания ультразвука) и разрушающего контроля (измерение ударной вязкости). ПГХ используется для определения характеристик отраженных и поглощенных эхосигналов в образцах сварных соединений. Установлено эмпирическое соотношение между составляющей ультразвукового сигнала и ударной вязкостью по отношению к температуре, при которой образцы подвергаются термообработке.

1.1. Методология исследования

Целью данной работы является исследование механических свойств сварного участка низкоуглеродистой стали (E-6013) методом неразрушающего контроля с использованием перспективных методов обработки сигналов. Установлена взаимосвязь между механическими свойствами (ударной вязкостью) и параметрами УЗ-сигналов (затухание). Данные были получены при контроле термообработанных при различных температурах сварных образцов посредством УЗК. Механические свойства (ударная вязкость) определяют с помощью испытания на удар по Шарпи. Исследование также включает применение такой перспективной методики обработки сигналов, как ПГХ.

2. ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Подготовка образцов

В качестве сварочного электрода использовалась низкоуглеродистая сталь(НС) (E-6013). Дуговая сварка осуществляется на двух прямоугольных частях основного материала (низкоуглеродистой стали) электродом 10 SWG в виде стыковой сварки. Основной металл выполнен в виде прямоугольного параллелепипеда, имеющего размеры $10 \times 10 \times 5,5$ мм согласно ASTM E23. Процесс сварки непосредственно оказывает влияние на основной металл, в результате чего в нем возникают три зоны нагрева. Область сварного шва, образованная после охлаждения сварочной ванны, известна как зона сплавления. Область, прилегающая к области сварного шва, известна как зона термического влияния. После сварки изменяются и свойства зоны термического влияния в то время, как материал основы остается неизменным. В данном исследовании зона сплавления подвергается разрушающему и ультразвуковому контролю.

2.2. Подготовка поверхности

Гладкая и чистая поверхность без заусенцев идеально подходит для ультразвукового контроля. Гладкая и чистая поверхность позволяет получить ультразвуковой сигнал с меньшим шумом и погрешностями. Для получения гладкой поверхности у всех образцов использовались шлифовальный и полировальный станок. Кроме того, для шлифования и полирования использовалась наждачная бумага из карбида кремния с зернистостью 400, 600 и 1000 мкм и вода в качестве смазки.

2.3. Процедура термообработки

Десять (10) образцов были подвергнуты термообработке в печи при температурах от 100 до 1000 °C с шагом 100 °C. Поскольку воздушное охлаждение помогает остановить процесс старения, каждый образец охлаждали на воздухе с постоянным временем выдержки в один час.

2.4. Фрезерный станок

После термообработки был использован фрезерный станок для создания V-образного паза глубиной 2 мм под углом 45 град в области сварного шва в соответствии со стандартом ASTM E23.

2.5. Ультразвуковой контроль

Для измерения ультразвуковых сигналов использовался цифровой ультразвуковой дефектоскоп Sona Test Master Scan model-350. В данной работе применялся эхоимпульс, поскольку он сводит к минимуму подготовку поверхности и позволяет использовать для ультразвукового контроля только одну сторону детали. Ультразвуковые эхоимпульсы передавались преобразователем, эти импульсы проходили через материал образца, а принятые УЗ-сигналы передавались тем же преобразователем.

Затухание ультразвука измеряли с помощью преобразователя продольной волны 5 МГц контактного типа. Он годится как для отправки, так и для приема ультразвуковых импульсов. Преобразователь продольной волны также называют прямым датчиком, поскольку звуковая волна, генерируемая преобразователем, направлена перпендикулярно поверхности.

Значение скорости для низкоуглеродистой стали было установлено на 5920 м/с. Данные были в режиме полноволновой развертки при нулевом градусе. Чтобы уменьшить погрешности, один и тот же оператор прикладывал постоянное давление к УЗ-датчику для всех образцов в одинаковых окружающих условиях.

Запись результатов сканирования проводилась в виде А-сканов. А-скан — это одномерное графическое представление, показывающее изменение амплитуды сигнала во времени. По вертикальной и горизонтальной оси отложены соответственно амплитуда и время прихода УЗ-сигнала. Полученный сигнал, отображаемый на экране, показан на рис. 1. Ультразвуковые А-сканы были получены с использованием программного обеспечения SDMS (программное обеспечение для Master Scan 350). MATLAB® применяли для построения УЗ-сигналов с использованием перспективной методики обработки сигналов.

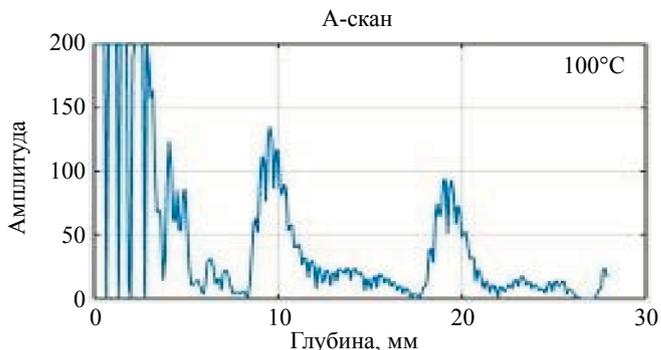


Рис. 1. А-скан для 100°C.

2.6. Испытание на удар

Испытание на удар (метод разрушающего контроля, РазК) задействовали для измерения ударной вязкости материала, а, особенно, способности поглощать энергию удара. Оборудование состоит из маятника и шкалы. Молоток весил 300 кг, был опущен с известной высоты. Нагрузка была приложена к образцу с V-образным надрезом, подготовленному по стандарту ISO 179-1: 2020 [16]. Ударными испытаниями определено его сопротивление разрушению. Энергия, поглощенная образцом до разрушения, может быть рассчитана непосредственно на шкале. Шкала показывает предел прочности образца при определенных условиях, таких как надрез.

2.7. Преобразование Гильберта—Хуанга

Метод ПГХ была разработан для оценки нелинейных искаженных волн, а также вариаций измеренных сигналов в нелинейных и нестационарных процессах. ПХГ включает в себя две

основных методики обработки сигналов: разложение по эмпирическим модам (РЭМ) и анализ спектра Гильберта. В этой работе ПГХ применялось к УЗ А-сканам, которые были получены на образце сварного шва из низкоуглеродистой стали. На первом этапе необходимо применить РЭМ, который раскладывает полученные сигналы на эмпирические моды (ЭМ), которые удовлетворяют основным условиям:

количество переходов через ноль и крайние значения сигналов в данных измерений должны быть равны или отличаться не более чем на единицу;

среднее значение огибающей сигнала, определяемой локальными максимумами и минимумами, равно нулю.

Процесс просеивания использовали для получения ЭМ. Реальный сигнал во временной области $X(t)$ выражается уравнением:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t). \quad (1)$$

На следующем этапе к каждой рассчитанной ЭМ применяется преобразование Гильберта (ПГ) для анализа амплитуды и мгновенной нормированной частоты:

$$H[c_i(t)] = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau. \quad (2)$$

На последнем этапе получают частотно-временной энергетический спектр Гильберта:

$$H(w, t) = Re \sum_{i=1}^n a_i(t) \exp\left(j \int w_i(t) dt\right). \quad (3)$$

Спектр Гильберта помогает получить трехмерный график частотно-временного распределения энергии. Спектра ПГ можно увидеть на рис. 2. Как видно на графике амплитудно-временной амплитуды, большая часть энергии сосредоточена в центре частотно-временного графика ПГ в области эхосигнала от задней стенки образца. Таким образом, интересующая область выбирается в области задней стенки, и это показывает, что энергии сосредоточены в нормированной полосе частот от 0,1 до 0,2 по оси y и приблизительно от 11 до 14 мм по оси x обратного эхосигнала. Энергия сконцентрирована в интересующей области для установления взаимосвязи между нагретым обработанным образцом из нержавеющей стали и энергией ПГХ. В связи с этим было выбрано небольшое окно (длиной примерно 3 мм), сконцентрированное в области обратного эхосигнала. Этот выбор делается после оценки общего спектра в каждом месте. Выбранные места должны быть одинаковыми для всех образцов перед выделением сигнала.

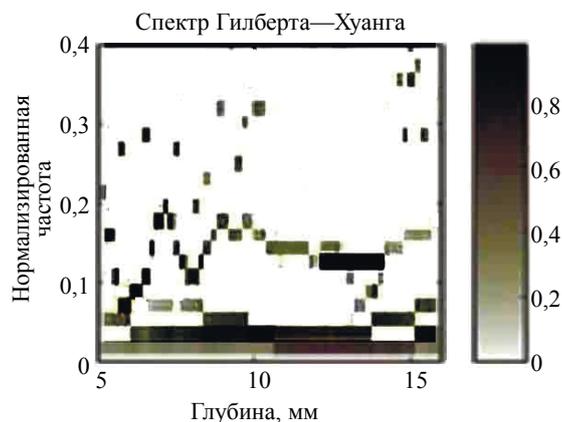


Рис. 2. Спектр ПГХ для 100°C.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Затухание ультразвука и ударная вязкость

Чтобы связать влияние механических свойств с результатами УЗК, был произведен расчет затухания ультразвукового сигнала по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{1}{d} 20 \log A1 / A2, \quad (4)$$

где α — затухание ультразвука, дБ/мм; d — глубина проплавления, мм; $A1/A2$ — отношение амплитуд двух ультразвуковых волн, дБ.

Отношение было рассчитано с использованием MatLab. Значения затухания построены в зависимости от температуры термообработки, что показано на рис. 3.

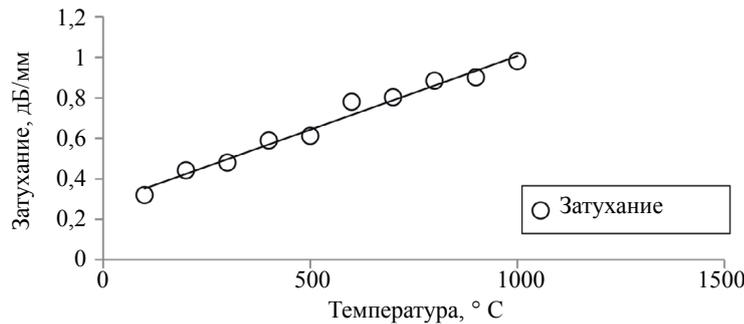


Рис. 3. Затухание ультразвука в зависимости от температуры термообработки.

На указанном рисунке видно, что затухание УЗ-сигнала прямо пропорционально увеличивается с увеличением температуры термообработки. Это подтверждает литературные данные о том, что размер зерна увеличивается с повышением температуры [17].

Кроме того, на рис. 4 видно, что энергия Шарпи увеличивается с увеличением температуры термообработки, что указывает на большой размер зерна в свариваемом материале. Поэтому материал становится пластичным и требует больше энергии для разрушения.

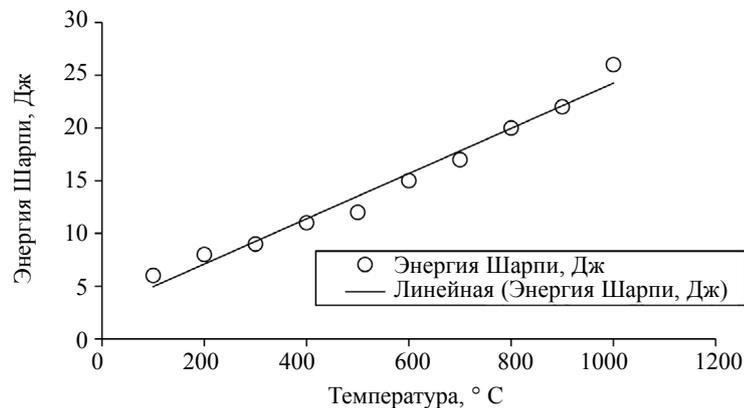


Рис. 4. Зависимость энергии Шарпи от температуры термообработки.

Как показано на рис. 5, возрастающая зависимость связывает затуханию УЗ-сигнала и ударную вязкость. Такая зависимость позволяет контролеру связать ударную вязкость сварного участка с ультразвуковыми свойствами в процессе контроля.

Как показано на рис. 3—5, затухание и ударная вязкость повышаются с увеличением температуры термообработки из-за увеличения размера зерна. Установлено, что в результате термической

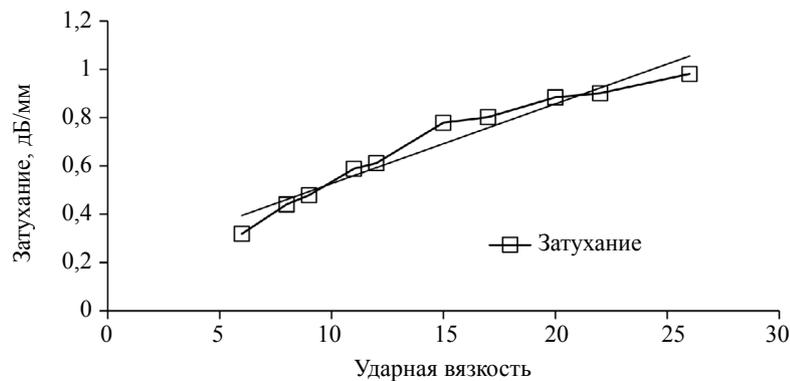


Рис. 5. Зависимость между затуханием ультразвука и ударной вязкостью.

обработки размер зерна становится большим, что делает материал пластичным и увеличивает его сопротивление разрушению [18].

Энергия Гильберта вычисляется с использованием ПГХ для УЗ-сигналов, полученных от сварных образцов. Сумма всех энергий ПГХ, сосредоточенных в интересующей области, была рассчитана и построена в зависимости от температур термообработки. На рис. 6 суммирование энергии при интегрировании в интересующей области устанавливает взаимосвязь между температурой термообработки (искусственное старение) и энергией ПГХ. Можно отметить, что энергия ПГХ уменьшается с повышением температуры термообработки из-за большего размера зерна и, следовательно, обеспечивает большее сопротивление, когда сигналы проходят через объект контроля. Из-за изменения микроструктуры материала при увеличении температуры, а также отражения и преломления на границах зерен, УЗ-сигналы больше поглощаются при распространении в объекте контроля. Следовательно, можно предсказать, что уменьшение энергии ПГХ при высоких температурах может вызвать снижение пластичности материала с увеличением прочности и может привести к пластической деформации перед разрушением [18].

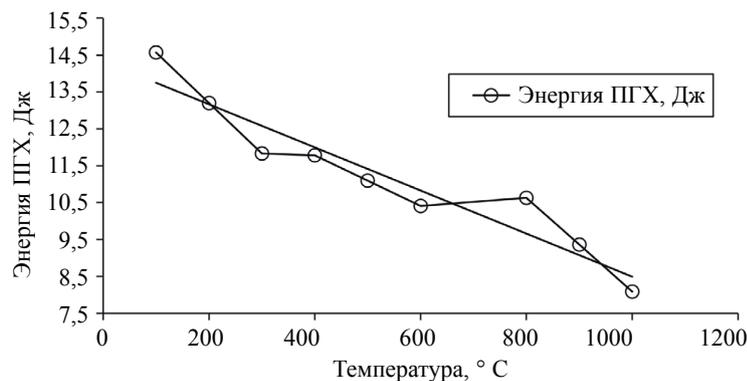


Рис. 6. Зависимость между энергией ПГХ и температурой термообработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе с помощью УЗК были определены механические свойства сварных образцов из низкоуглеродистой стали, подвергнутых термообработке при различных температурах, особенно когда объекты подвергаются различным процессам старения. Следовательно, устанавливается корреляция между ударной вязкостью (РазК) и затуханием ультразвука (НК) сварных швов, подверженных старению при разных температурах. Механические свойства материала определены при различных температурах с помощью метода испытания по Шарпи. Оценка низкоуглеродистой термообработанной стали после сварки проводится с использованием УЗК. Процесс термической обработки или искусственного старения изменяет как механические свойства, так и характеристи-

ки ультразвуковых сигналов, поэтому эта предложенная взаимосвязь помогает дефектоскописту связать ударную вязкость сварного участка с затуханием во время процедуры контроля. Работа также направлена на получение взаимосвязи между температурой, при которой производится старение термообработанного образца и ПГХ. Наблюдается, что энергия ПГХ уменьшается с увеличением температуры термообработки, что является причиной крупных зерен в материале и, следовательно, приводит к большему сопротивлению к распространению сигнала. Эта зависимость также показывает, что методы НК могут использоваться для оценки механических свойств сварных термически состаренных материалов и позволяет инспекторам по качеству лучше проводить техническое обслуживание. Вышеуказанная методика эксперимента также может использоваться для определения и сравнения других механических свойств и их корреляции путем изменения процедуры термообработки, сварного материала, типа сварки, соединений и использования различных механических испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dorbane A., Mansoor B., Ayoub G., Shunmugas V.C., Imad A.* Mechanical, Microstructural and fracture properties of dissimilar welds produced by friction stir welding of AZ 3113 and AL 6061 // *Material Science & Engineering A*. 2016. V. 651. P. 720—733. ELSEVIER.
2. *Li Bo, Yufi Shen, Weiye Hu.* The study of defects in Aluminum 2219-T6 thick butt friction stir welds with the application of multiple Non Destructive testing methods // *Material & Design*. 2011. V. 32 (4). P. 2073—2084
3. *Fadare D.A., Fadara T.G., Akanbi O.Y.* Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of NST 37-2 Steel // *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2011. V. 10. No. 3. P. 299—308.
4. *Khan Tariq Mairaj, Khan Sohaib Z.* Assesment of material properties of AISI 316L stainless steel using non destructive testing // *Karachi*. 2016. V. 31. Is. 4.
5. *Srivastava Bipin Kumar.* A Review oneffect of preheating and/or post weld heat treatment (PWHT) on mechanical behaviour of ferrous metals // *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2010. V. 2 (4). No. 0975—5462. P. 625—631.
6. *Nanekar P.P., Shah B.K.* Characterization of Material Properties by Ultrasonics // *BARC Newsletter*. 2004. No. 249. P. 25—36.
7. *Chern E. James.* An improved ultrasonic image presentation // *Quantitative Non Destructive Evaluation*. 1995. V. 14. P. 889—892.
8. *Khan Tariq Mairaj, Maqsood A., Warraich S.A., Khalid S.* Postweld Heat Treatment Characterization of Mild Steel (E6013) Welded Areas Using Wavelet Transform of Ultrasonic Testing Signals // *Journal of Testing and Evaluation*. 2018. V. 5. P. 46.
9. *Khan Sohaib Z., Khan Tariq M., Joya Yasir F., Khan Muhammad A., Ahmed Sarah, Shah Aqueel.* Assessment of material properties of AISI 316L stainless steel using non-destructive testing // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2016. P. 360—370.
10. *Dragan K., Katunin A., Dziendzikowski M.* Damage Identification in Aircraft Composite Structures: A case study using various Non Destructive Testing Techniques. 2015. DOI: 10.1016/J. COMPSTRUCT 2015.02.080
11. NDT Resource Center. www.nde-ed.org
12. *Moura Cassio Melo.* Evaluation of the Ductile to Brittle Transition Temperature in Steel Low Carbon, Brazil: Rio De Janeiro, 2009. INIS -BR-6370.
13. *Yang G., Khan T., Zhang L., Dib G., Xin J., Udpa L., Majumdar S., Udpa S., Kim J.* Pre-processing methods for eddy current data analysis using Hilbert-Huang Transform // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2012. V. 39.1. P. 389—395.
14. *Khan Tariq, Majumdar Shantanu, Udpa Lalita.* Automated flaw detection scheme for cast austenitic stainless steel weld specimens using Hilbert-Huang transform of ultrasonic phased array data // *AIP Conference Proceedings*. 2012. V. 1430. P. 1.
15. *Ali M. Ghazanfar, Warriach Saad, Khan Tariq Mairaj.* Evaluation of the aging effect on mild steel (E 6013) welded area using Hilbert Huang Transform on UT signals. Karachi: IEEE, 2016.
16. British Standards Institution. *Plastics — determination of charpy impact properties. Part 1. Non-instrumented impact test (ISO 179-1:2010)*. British Standards Institution, 2010.
17. *Gao Weimin, Glorieux Christ.* et al. Investigation of the microstructure of cast iron by laser ultrasonic surface wave spectroscopy, in material science and engineering. ELSEVIER. A313. 2001. P. 170—179.
18. *Naqvi Z.A., Khan T.M.R., Ali M. Ghazanfar* et al. Evaluation of heat treatment effect on impact strenght of glass fiber-reinforced composite material using NDT technique in material performance and characterization // *ASTM*. 2020. V. 9 (1). P. 72—81.