

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
 Основан в феврале 1965 года
 Екатеринбург

№ 10
2022

СОДЕРЖАНИЕ**Акустические методы**

Е.Г. Базулин. Сегментация ультразвукового изображения отражателей, основанная на анализе близости гистограммы к распределению Рэлея	3
Д.О. Долматов, Н.И. Ермошин. Цифровая когерентная обработка сигналов с расчетами в частотной области для решения задач ультразвуковой томографии с применением матричных антенных решеток с неэквидистантным расположением элементов	13
Ю.Г. Соколовская, Н.Б. Подымова, А.А. Карабутов. Выявление нарушений укладки слоев волокон в углепластиках методом широкополосной акустической спектроскопии	27
В.А. Стрижак. Акустический контроль прутков композитной арматуры с учетом процента армирования	37

Электромагнитные методы

Р.К. Вагапов, К.А. Ибатуллин. Оценка локальных дефектов на внутренней поверхности газопроводов, транспортирующих CO ₂ -содержащую продукцию	49
---	----

Общие вопросы дефектоскопии

С.К. Сингх, Р. Шанкер. Определение области чувствительности приклеиваемого и примагничиваемого ЦТС-датчиков при использовании метода электромеханического импеданса в целях неразрушающего контроля	57
Информация	74

СЕГМЕНТАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ, ОСНОВАННАЯ НА АНАЛИЗЕ БЛИЗОСТИ ГИСТОГРАММЫ К РАСПРЕДЕЛЕНИЮ РЭЛЕЯ

© 2022 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 19.08.2022; после доработки 03.09.2022

Принята к публикации 06.09.2022

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 более эффективной работы нейронных сетей изображения отражателей целесообразно обработать с целью повышения отношения сигнал/шум изображения и его сегментации (кластеризации). В статье предлагается метод сегментации, основанный на построении бинарной маски, скрывающей блики отражателей. Маска создается из условия получения максимально близкого вида гистограммы изображения к распределению Рэлея. Для решения задачи поиска минимума используется генетический алгоритм. В модельных экспериментах продемонстрирована эффективность применения данного подхода для сегментации изображений отражателей, восстановленных по эхосигналам, измеренным с помощью антенных решеток. Для определения типа отражателя применялся метод, основанный на анализе амплитуд бликов изображений, восстановленных по разным акустическим схемам.

Ключевые слова: антенная решетка, цифровая фокусировка антенной (ЦФА), Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), распределение Рэлея, генетический алгоритм (ГА), сегментация (кластеризация).

DOI: 10.31857/S0130308222100013, **EDN:** BSUEMA

1. ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковой неразрушающий контроль (УЗК) широко применяется для контроля различного оборудования на таких ответственных объектах, как атомные электростанции, различные трубопроводы, оборудование нефтехимических предприятий и т.д. Современная аппаратура для УЗК должна позволять быстро проводить регистрацию эхосигналов, восстановление изображения отражателей и его анализ на предмет определения типа отражателя и его размеров. К сожалению, восстановленные изображения отражателей могут быть недостаточно высокого качества для быстрой подготовки протокола контроля. Ручной анализ изображений отражателей может значительно увеличить время подготовки протокола контроля и повысить вероятность принятия неправильного решения из-за усталости или недостаточной квалификации оператора. Развитие техники проведения УЗК позволяет получать изображения отражателей с достаточно 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 или режимом тройного сканирования. Однако решение задачи определения типа отражателей по их изображению остается сложной задачей, так как далеко не всегда удается полностью восстановить границу отражателя, а наличие в изображении шума и ложных бликов также усложняет решение задачи. В результате время анализа изображения оператором может стать больше, чем время регистрации эхосигналов и восстановления изображения. В статье [3] был предложен простой метод определения типа отражателя, основанный на анализе амплитуд бликов изображений, восстановленных по разным акустическим схемам.

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. Бурными темпами развиваются системы автоматизированного распознавания на основе искусственных нейронных сетей [4].

Как упоминалось выше, для эффективного решения задачи распознавания целесообразно специальным образом подготовить изображение отражателей. Один из этапов — это сегментация (кластеризация) изображения. В настоящий момент для сегментации оптических изображений

разработано множество методов [5]. Приведенный ниже список не претендует на полный охват всех способов сегментации.

1. Адаптивный анизотропный диффузный фильтр (в зарубежной литературе 2D или 3D AADF) [6]. В статьях [7, 8] рассмотрено применение метода AADF для обработки изображений, полученных при проведении рентгеновского контроля, а в статье [9] — для повышения качества ЦФА-изображений отражателей.

2. Модифицированный метод нечеткой кластеризации С-средних (в зарубежной литературе Modified Fast Fuzzy C-Means (MFFCM)) [10].

3. Построение матрицы яркостной зависимости (в зарубежной литературе Gray Level Co-Occurrence Matrix (GLCM)) [11].

4. Метод нечеткой логики второго типа (в зарубежной литературе 2D Band-let Transform (2D BT)) [12].

5. Алгоритм вычисления порога бинаризации для полутонового изображения (Otsu's method) [13].

6. Технология Deep Cluster (нейронные сети без обучения) [14].

Сегментация ЦФА-изображения должна позволить определить на изображении блики отражателей, что должно повысить достоверность и скорость анализа изображения на предмет наличия отражателя и оценки его типа. Каждый из упомянутых выше методов сегментации имеет как минусы, так и плюсы. Одни методы очень быстрые, но дают не всегда хорошие результаты. А другие методы позволяют получить хороший результат, но их быстроедействие оставляет желать лучшего. В статье предлагается метод сегментации, основанный на построении бинарной маски, скрывающей блики отражателей. Маска создается из условия получения максимально близкого вида гистограммы изображения, умноженного на маску, к распределению Рэлея. Для решения задачи поиска минимума используется генетический алгоритм.

2. РЭЛЕЕВСКАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Распределение Рэлея — это распределение плотности вероятности случайной величины v [15], которую можно описать следующим образом:

$$f(v; \sigma) = \frac{v}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{v^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где $v \geq 0$, $\sigma > 0$ — коэффициенты, определяющие вид распределения. Обозначим через $I(x, z)$ модуль ЦФА-изображения. В статье [16] показано, что шум ЦФА-изображения описывается распределением Рэлея. Если на изображении будут присутствовать блики отражателей, то его гистограмма будет отличаться от распределения Рэлея. Идея заключается в нахождении двумерной маски $M(x, z)$, которая равна нулю в области бликов и равна единице, там где бликов нет, а есть шум изображения. Маска $M(x, z)$ подбирается так, чтобы гистограмма матрицы ее поэлементного умножения на ЦФА-изображение $I(x, z)$ была максимально близка к распределению Рэлея. Обозначим гистограмму произведения маски на ЦФА-изображение как

$$h(v; M(x, z)) = \mathbf{H}(M(x, z)I(x, z)), \quad (2)$$

где через \mathbf{H} обозначен оператор получения гистограммы изображения. По гистограмме $h(v; M(x, z))$ можно оценить коэффициент $\hat{\sigma}$ для наиболее близкого распределения Рэлея [17]. Предлагаемый способ сегментации можно записать:

$$M(x, z) = \arg \min_{M(x, z) \in R^{N_x \times N_z}} (\|h(v; M(x, z)) - f(v; \hat{\sigma})\|_2), \quad (3)$$

где $\|\cdot\|_2$ — норма вектора в метрике L_2 . Иными словами, нужно найти такую маску $M(x, z)$, которая, будучи умноженной на ЦФА-изображение $I(x, z)$, позволит получить гистограмму изображения (2), наиболее близкую к распределению Рэлея.

Если ОВИ имеет размеры $N_x \times N_z = 100 \times 100$, то нужно найти минимум функции 10 000 переменных. Для решения уравнения (3) можно использовать генетический алгоритм (ГА), который эффективно использовать для бинарных векторов большой размерности [18]. В данной статье при использовании ГА полагалось, что популяция содержит 256 членов, и существует 150 поколений.

3. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для регистрации эхосигналов в режиме двойного и тройного сканирования использовался дефектоскоп «АВГУР-АРТ», разработанный и изготовленный в Научно-производственном центре «ЭХО+» [19].

3.1. Образец трубопровода толщиной 65 мм с разнородным сварным соединением

В образце трубопровода толщиной 65 мм с разнородным сварным соединением было просверлено три БЦО диаметром 3 мм, отмеченные на рис. 1 выносками с номерами от 4 до 6. Антенная решетка (5 МГц, 32 элемента, размер пьезоэлемента $0,9 \times 10$ мм, расстояние между краями элементов 0,1 мм) на плексигласовой призме 20 град перемещалась по поверхности образца 16 раз с шагом 0,93 мм (режим тройного сканирования) при фиксированном положении по оси y , направленной перпендикулярно плоскости рисунка. Так как наиболее сложно получить изображение самого глубокого БЦО 6, то будем рассматривать только его изображение в области восстановления изображения (ОВИ), которая на рис. 1 показана полупрозрачным прямоугольником розового цвета¹.



Рис. 1. Фотография образца трубопровода толщиной 65 мм с разнородным сварным соединением. Стрелкой красного цвета схематически показана апертура сканирования.

На рис. 2а показано ЦФА-Х-изображение БЦО 6, которое было получено как когерентная сумма 17 парциальных ЦФА-изображений, восстановленных для каждого положения антенной решетки в предположении, что излучается и принимается продольная волна (акустическая схема LdT). На рисунок линиями черного цвета нанесены контуры сварного соединения образца и БЦО 6. На ЦФА-Х-изображении блик границы БЦО 6 слабо заметен из-за достаточно высокого уровня структурного шума. Кроме того, блик границы БЦО 6 смещен от своего истинного положения, так как при восстановлении изображения полагалось, что образец однороден и изотропен. На рис. 2б показан результат обработки методом AADF ЦФА-Х-изображения. Здесь и далее выбирался квадратичный вариант определения коэффициента диффузии [9]. Коэффициент K полагался равным

¹Использование цвета для пояснения рисунков доступно только в электронном варианте статьи или в ее печатном издании журнала «Дефектоскопия».

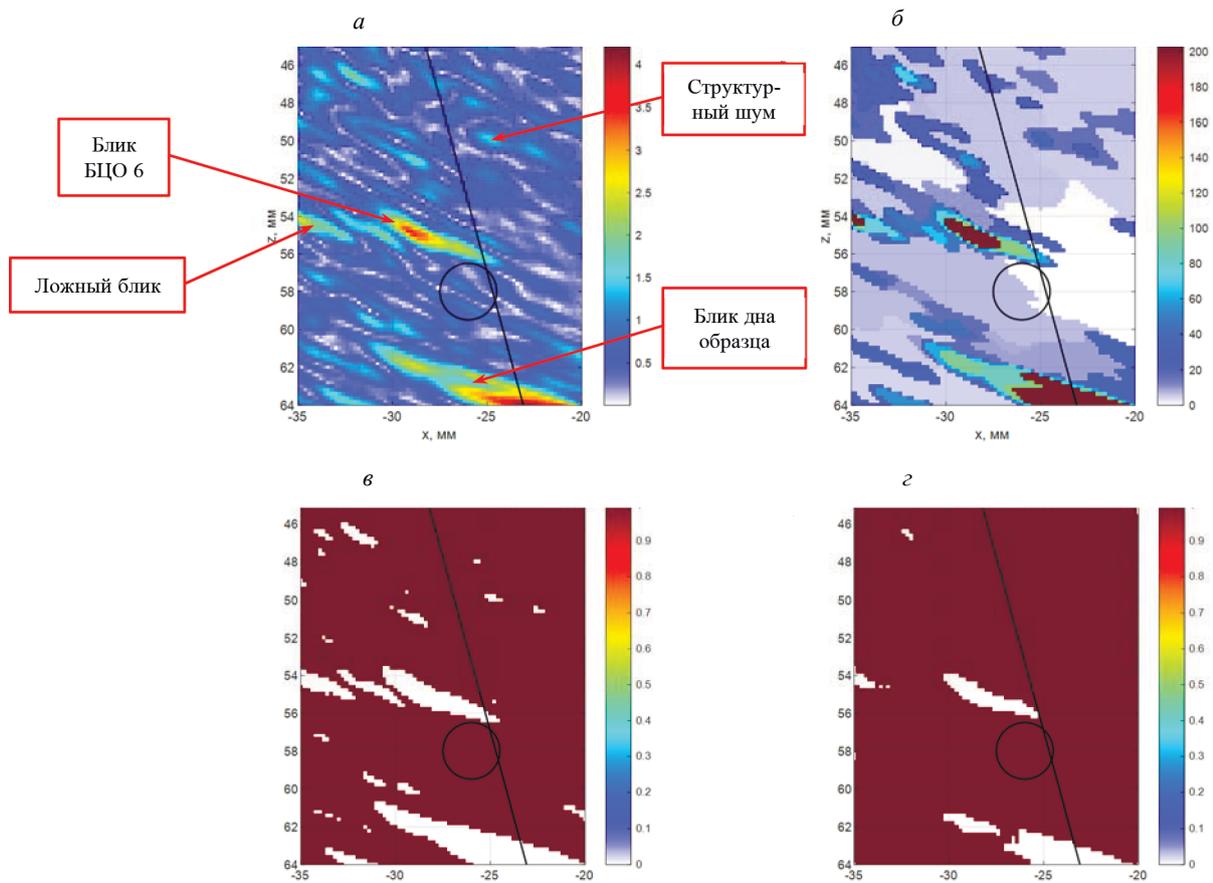


Рис. 2. ЦФА-Х-изображение БЦО 6 (а), результат обработки методом AADF (б), результат бинаризации по отсечке Оцу (в) и маска, полученная по предложенному алгоритму (3) (г).

0,1 для получения максимально контрастного изменения «коэффициента диффузии». Поэтому для получения эффекта «растворения» бликов число итераций было равно 100 000. На AADF-изображении остались блики с максимальной фокусировкой, а плохо сфокусированные блики исчезли («растворились»). Средний уровень структурного шума уменьшился примерно на 6 дБ и блик границы БЦО 6 стал более заметен. На рис. 2в показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по порогу бинаризации (отсечка Оцу) для полутонового изображения. Она выделила более чем пять областей, которые могут соответствовать блику от реального отражателя. На рис. 2г показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по предложенному алгоритму (3), который устранил практически все блики структурного шума.

3.2. Образец корпуса парогенератора толщиной 145 мм с узким сварным соединением

В образце корпуса парогенератора толщиной 145 мм были изготовлены БЦО диаметром 3 мм и модель висящей трещины в виде электроэрозионного пропила высотой 10 мм и толщиной 0,5 мм. Антенная решетка (5 МГц, 32 элемента, размер пьезоэлемента 0,9×10 мм, расстояние между краями элементов 0,1 мм) на плексигласовой призме 20 градусов перемещалась по поверхности образца 27 раз с шагом 2 мм (режим тройного сканирования). Для оценки типа отражателя использовался подход изложенный в статье [3].

3.2.1. БЦО диаметром 3 мм на глубине 75 мм

На рис. 3а показано ЦФА-Х-изображение БЦО диаметром 3 мм, просверленного на глубине 75 мм, полученное как когерентная сумма 27 парциальных ЦФА-изображений, восстановленных для каждого положения антенной решетки в предположении, что излучение и прием происходят

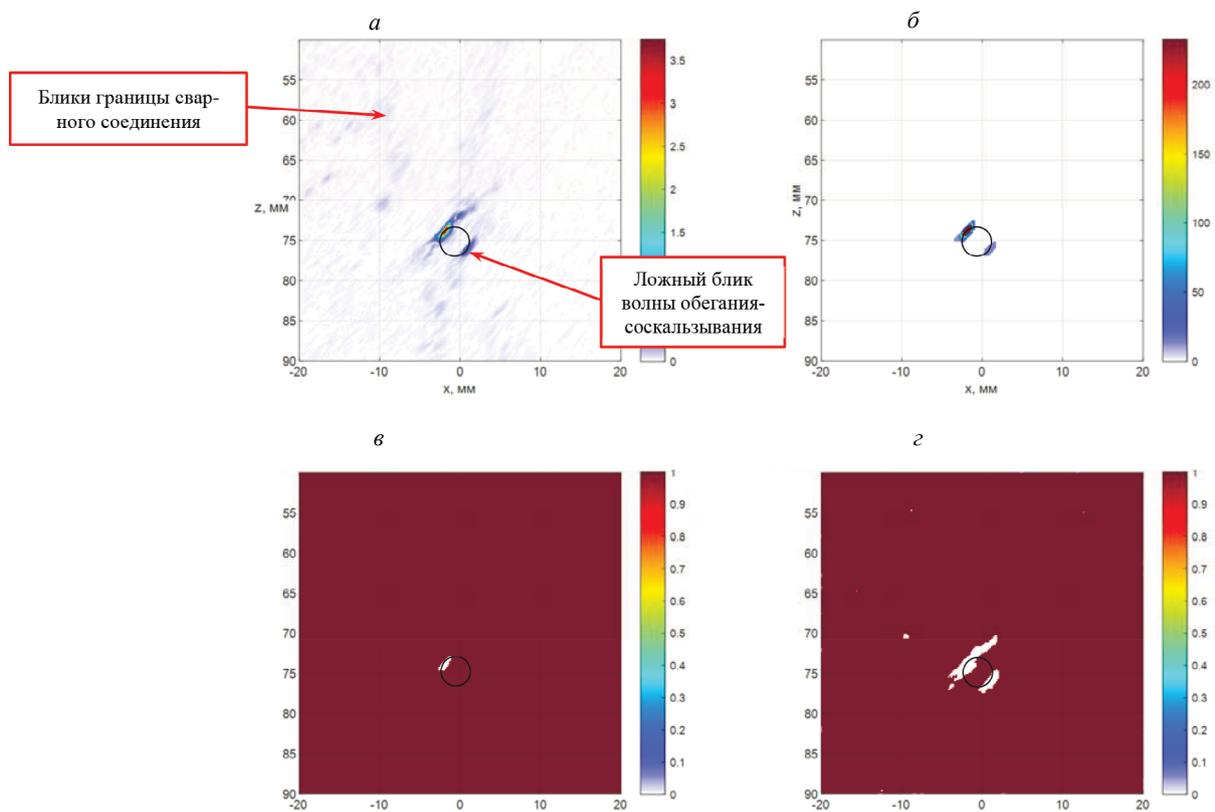


Рис. 3. ЦФА-Х-изображение БЦО, восстановленное по акустической схеме TdT (а), результат обработки методом AADF (б), результат бинаризации по отсечки Оцу (в) и маска, полученная по предложенному алгоритму (3) (г).

на поперечной волне (акустическая схема TdT). На рисунках окружностями черного цвета показан контур границы БЦО. На рис. 3а хорошо виден блик границы БЦО и ложный блик, сформированной импульсом волны обегания—соскальзывания рэлеевского типа. Блики, рассеянные границей сварного соединения, слабо заметны. На рис. 3б показано изображение после обработки методом AADF, на котором остались только два блика, один из которых ложный. На рис. 3в показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по порогу бинаризации (отсечка Оцу) для полутонового ЦФА-Х-изображения. Она выделила только один блик границы БЦО. На рис. 3г показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по предложенному алгоритму (3), на которой, как и на AADF-изображении, остались два блика.

На рис. 4 показаны изображения, подобные тем, что на рис. 3, но восстановленные в предположении, что излучается продольная волна, а принимается поперечная (акустическая схема LdT). Амплитуда блика границы БЦО на ЦФА-Х-изображении мала (рис. 4а), но на AADF-изображении (рис. 4б) и на изображении, получено по предложенному алгоритму (3) (рис. 4г), блик границы БЦО уверенно обнаруживается. На изображении, полученном по порогу бинаризации (отсечка Оцу), обнаружить блик границы БЦО невозможно (рис. 4в).

На рис. 5 показаны изображения, подобные тем, что на рис. 3, но восстановленные в предположении, что излучается и принимается продольная волна (акустическая схема LdT). На всех четырех изображениях уверенно обнаруживается только один блик границы БЦО. Ложный блик, сформированный импульсом волны обегания—соскальзывания, имеет пренебрежимо малую амплитуду и ни на одном изображении не виден.

3.2.2. Висящая трещина высотой 15 мм на глубине 105 мм

На рис. 6а показано ЦФА-Х-изображение электроэрозионного паза высотой 15 мм и толщиной 0,5 мм с центром на глубине 105 мм, восстановленное по акустической схеме TdT. На изображении

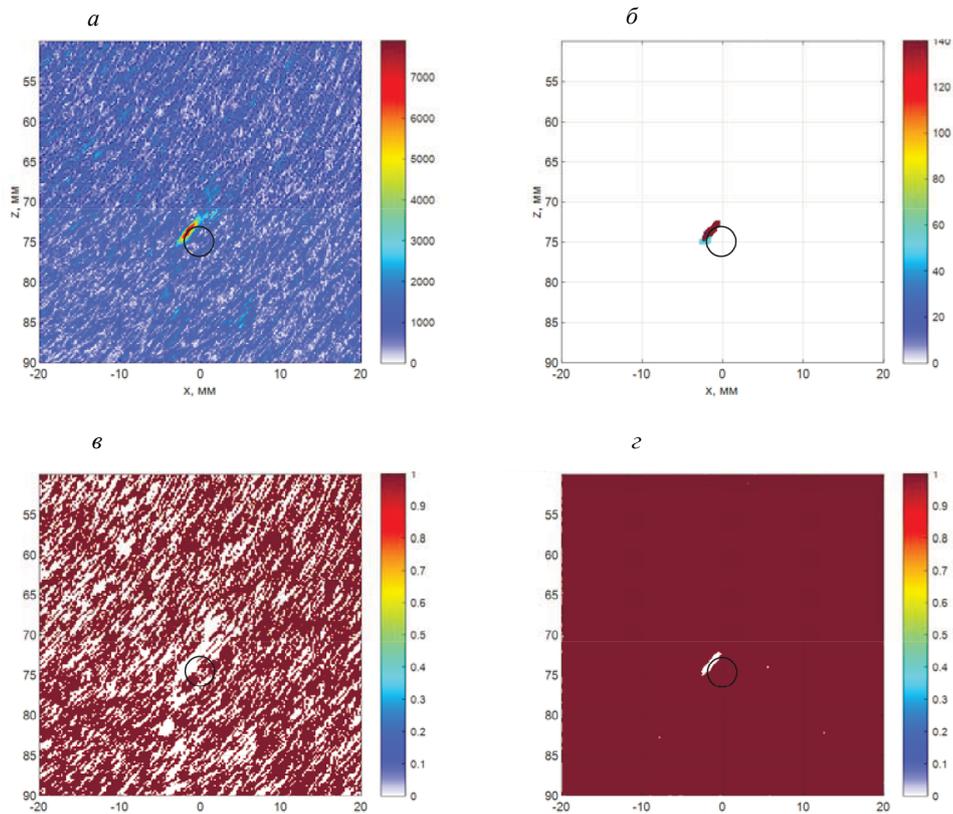


Рис. 4. ЦФА-Х-изображение БЦО, восстановленное по акустической схеме LdT (*a*), результат обработки методом AADF (*б*), результат бинаризации по отсечки Оцу (*в*) и маска, полученная по предложенному алгоритму (*з*).

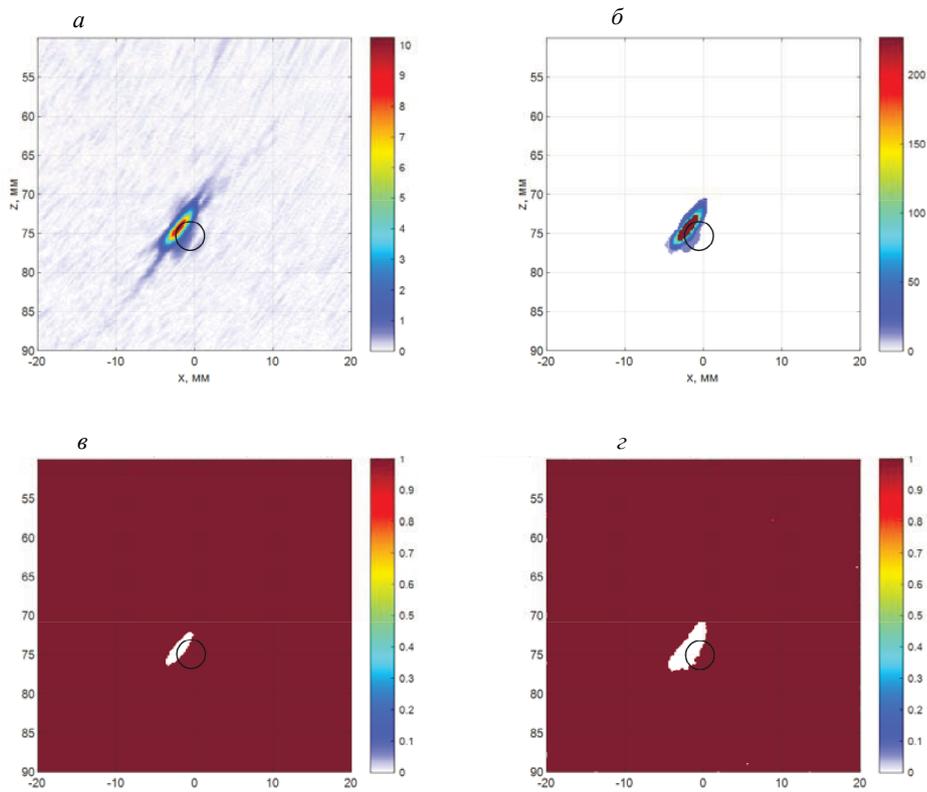


Рис. 5. ЦФА-Х-изображение БЦО, восстановленное по акустической схеме LdL (*a*), результат обработки методом AADF (*б*), результат бинаризации по отсечки Оцу (*в*) и маска, полученная по предложенному алгоритму (*з*).

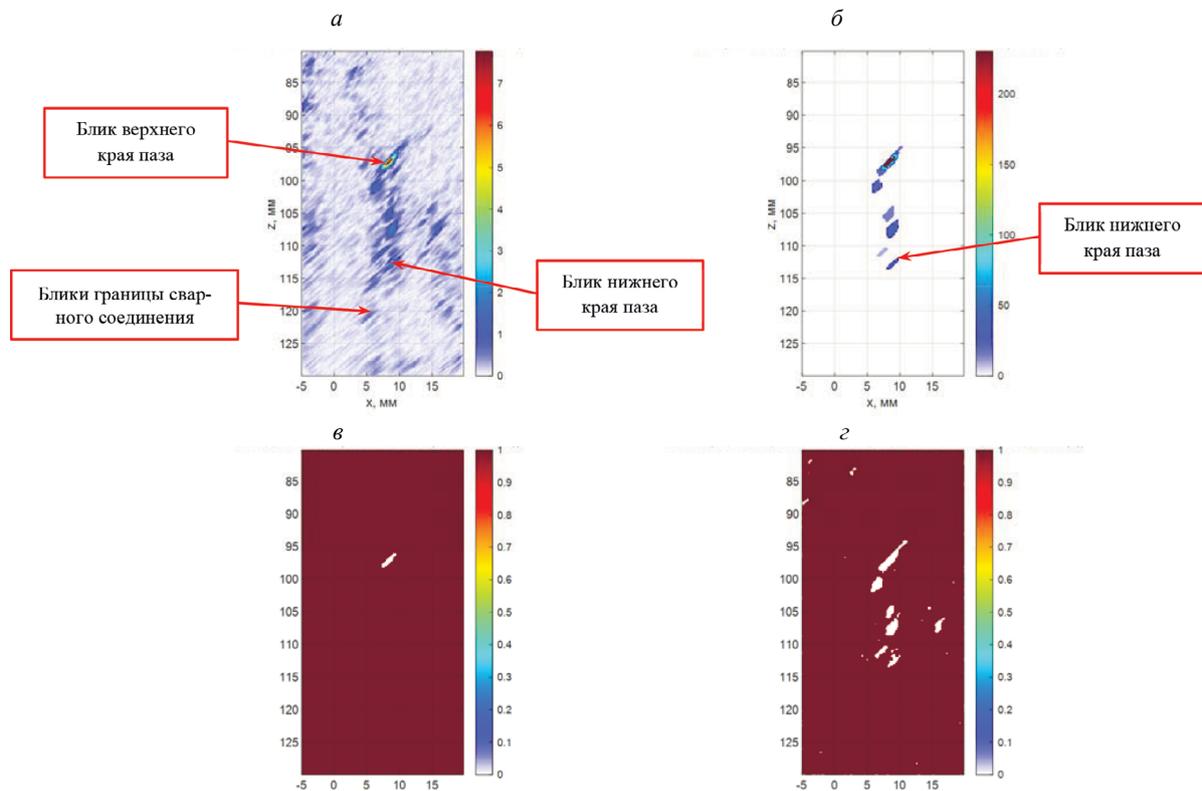


Рис. 6. ЦФА-Х-изображение электроэрозионного паза, восстановленное по акустической схеме TdT (а), результат обработки методом AADF (б), результат бинаризации по отсечки Оцу (в) и маска, полученная по предложенному алгоритму (3) (г).

хорошо виден блик верхнего края паза, а вот определить блик нижнего края паза затруднительно. Блики, сформированные при диффузном отражении на границе сварного соединения, слабо заметны. На рис. 6б показано изображение после обработки методом AADF, на котором остались шесть бликов, четыре из которых ложные. На рис. 6в показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по порогу бинаризации (отсечка Оцу) для полутонного ЦФА-Х-изображения. Она выделила только один блик верхнего края паза. На рис. 6г показана маска ЦФА-Х-изображения, полученная по предложенному алгоритму (3), на которой, как и на AADF-изображении, остались несколько бликов. Оценка высоты паза по самому глубокому блику на рис. 6б и г дает значение около 15 мм, что хорошо согласуется с истинными размерами паза.

На рис. 7 показаны изображения, подобные тем, что на рис. 6, но восстановленные в предположении, что излучается продольная волна, а принимается поперечная (акустическая схема LdT). На ЦФА-Х-изображении блик нижней границы паза стал более заметен (рис. 7а). На AADF-изображении амплитуды бликов верхнего и нижнего края выровнялись и стали хорошо заметны. На изображении, полученном по предложенному алгоритму (3), вообще остались только блики краев трещины. На изображении, полученном по порогу бинаризации (отсечка Оцу), обнаружить блики краев паза невозможно (рис. 7в).

На рис. 8 показаны изображения, подобные тем, что на рис. 6, но восстановленные в предположении, что излучается и принимается продольная волна (акустическая схема LdT). На изображении, полученном по порогу бинаризации (отсечка Оцу), остался только блик верхнего края паза (рис. 8в). На остальных трех изображениях уверенно обнаруживаются два блика краев паза.

3.2.3. Определение типа отражателя

В статье [3] было показано, что, используя особенности поведения коэффициента отражения для разных типов волн, по ЦФА-изображениям, восстановленным только на прямом луче по разным акустическим схемам, можно сделать обоснованное заключение о типе отражателя. Если

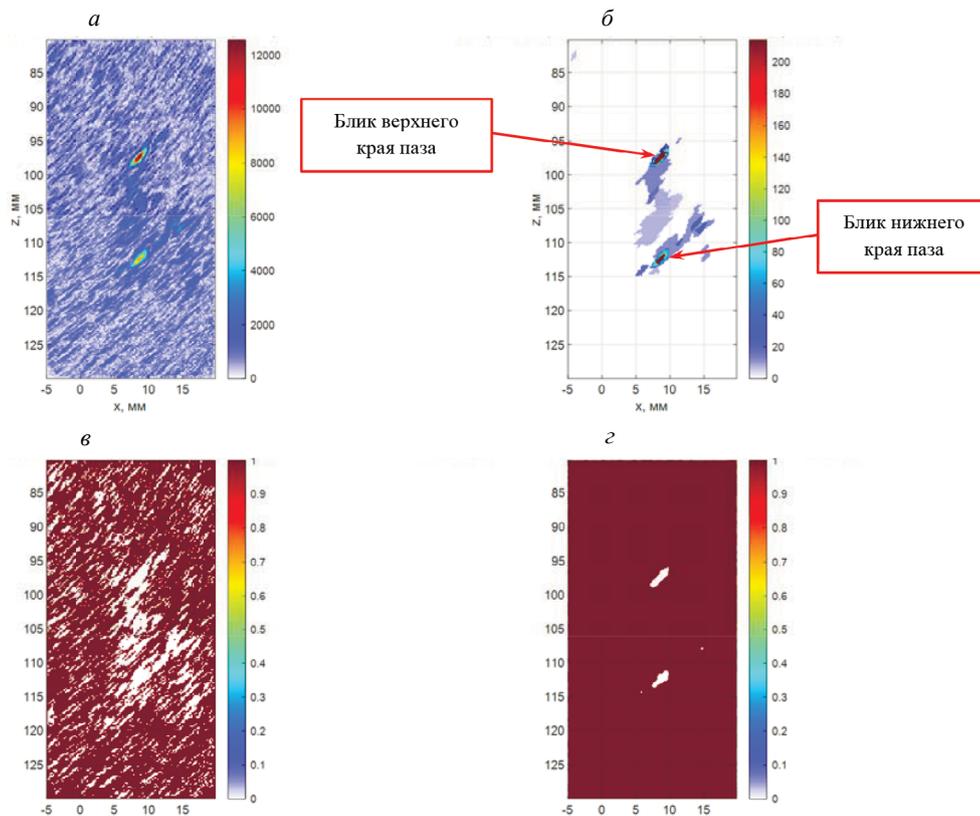


Рис. 7. ЦФА-Х-изображение электроэрозионного паза, восстановленное по акустической схеме LdT (*a*), результат обработки методом AADF (*б*), результат бинаризации по отсечки Оцу (*в*) и маска, полученная по предложенному алгоритму (3) (*г*).

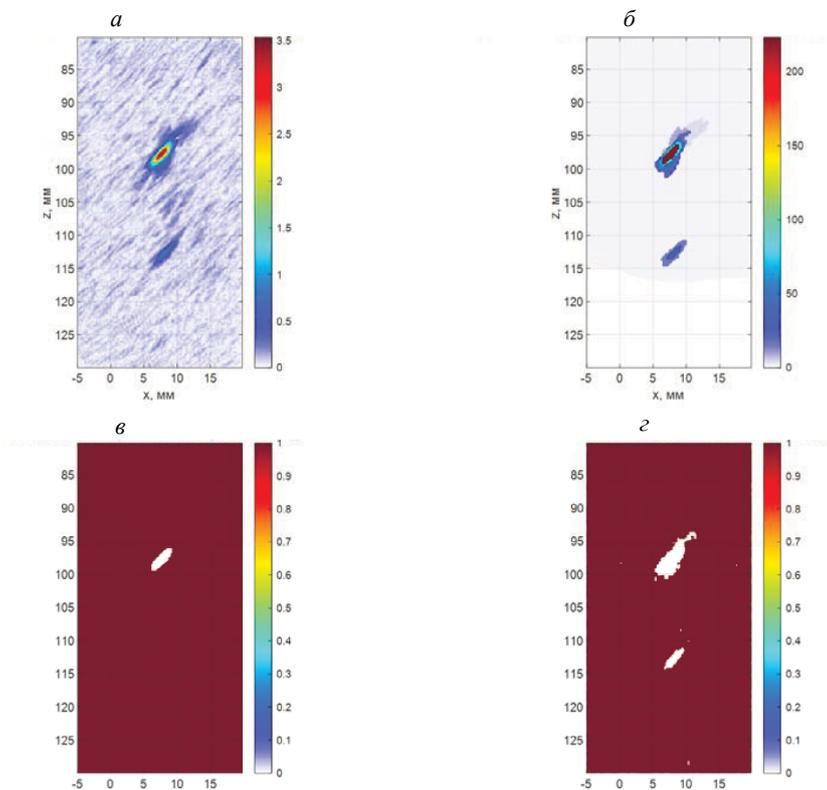


Рис. 8. ЦФА-Х-изображение электроэрозионного паза, восстановленное по акустической схеме LdL (*a*), результат обработки методом AADF (*б*), результат бинаризации по отсечки Оцу (*в*) и маска, полученная по предложенному алгоритму (3) (*г*).

обозначить через A_{LL} , A_{LT} и A_{TT} амплитуды бликов отражателя на изображениях, восстановленных по разным акустическим схемам, то можно ввести следующий коэффициент:

$$K = \frac{A_{LT}}{(A_{LL} + A_{TT})/2}.$$

Если K меньше уровня $K_{level} = 0,1$, то можно утверждать, что блик соответствует отражателю объемного типа. Если K будет больше уровня K_{level} , то можно утверждать, что обнаруженный блик соответствует краю плоскостного отражателя. Как видно из табл. 1, составленной по изображениям на рис. 3а, рис. 4а, рис. 5а, рис. 6а, рис. 7а и рис. 8а, можно по значению коэффициента K сделать обоснованное предположение о типе отражателя. Полагаю, что для реальной трещины с раскрытием 5—10 мкм, а не для электроэрозионного паза, сделанного с помощью пластины толщиной около 0,5 мм, значение коэффициента K только увеличится.

Таблица 1

Оценка типа отражателя

	Амплитуда блика БЦО	Амплитуда бликов краев паза	
		Верх	Низ
Акустическая схема TdT	360 000	75 000	28 000
Акустическая схема LdT	8 000	12 800	11 000
Акустическая схема LdL	120 000	35 000	12 000
$(A_{LL} + A_{TT})/2$	240 000	55 000	20 000
K	0,03	0,23	0,55

4. ВЫВОДЫ

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

Предложен метод построения бинарной маски для сегментации изображения отражателей на области, в которых блики отражателей либо есть, либо нет. Эффективность метода продемонстрирована на нескольких модельных экспериментах.

Использование ЦФА- или ЦФА-Х-изображений, восстановленных по акустическим схемам TdT, LdT и LdL, позволяет отделить ложные блики от реальных, и тем самым повысить достоверность проведения контроля (см., например, рис. 6, рис. 7 и рис. 8).

Еще раз подтверждена эффективность подхода определения типа отражателя (см. табл. 1) по значениям коэффициента K , предложенного в статье [3].

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: 15 июля 2022 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. Bazulin E.G., Vopilkin A.Kh., Tikhonov D.S. Determining the Type of Reflector from Amplitudes of Flares Reconstructed in Various Acoustic Schemes // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 4. P. 251—260. [Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Определение типа отражателя по амплитудам бликов изображений, восстановленных по разным акустическим схемам // Дефектоскопия. 2021. № 4. С. 3—12.]
4. Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х. Применение нейронных сетей в ультразвуковом неразрушающем контроле (обзор) // Контроль, Диагностика. 2022. № 5. С. 12—25. DOI: 10.14489/td.2022.05.pp.012-025
5. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Image_segmentation (дата обращения: 12 июля 2022 года).

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. *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>
8. *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
9. *Bazulin E.G.* Application of Adaptive Anisotropic Diffusion Filter To Improve the Reflector Image Quality when Performing Ultrasonic Nondestructive Testing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 5. P. 343—351. [*Базулин Е.Г.* Применение адаптивного анизотропного диффузного фильтра для повышения качества изображения отражателей при проведении ультразвукового неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 3—12.]
10. *Bezdek James C.* Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. 1981. ISBN 0-306-40671-3.
11. *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
12. *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
13. *Otsu N.* A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. V. 9. No. 1. P. 62—66.
14. URL: <https://neurohive.io/ru/papers/deep-cluster/> (дата обращения: 12 июля 2022 года).
15. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Распределение_Рэлея (дата обращения: 12 июля 2022 года).
16. *Bevan R., Zhang J., Budyn N., Croxford A.J., Wilcox P.D.* Experimental quantification of noise in linear ultrasonic imaging // Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2018. TUFFC-08970-2018. DOI: 10.1109/TUFFC.2018.2874720
17. *Джонсон Н.Л., Коц С., Кемп А.У.* Одномерные дискретные распределения / Монография, 4-е изд. (эл.) М.: Лаборатория знаний, 2017. 563 с. ISBN 978-5-00101-457-7. URL: <https://znanium.com/catalog/product/541882> (дата обращения: 12.07.2022).
18. *Fraser A.S.* Simulation of genetic systems // J. of Theor. Biol. 1962. V. 2. P. 329—346.
19. Научно-производственный центр «ЭХО+»: официальный сайт фирмы. URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 15.07.2022).

ЦИФРОВАЯ КОГЕРЕНТНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ С РАСЧЕТАМИ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТРИЧНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С НЕЭКВИДИСТАНТНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2022 г. Д.О. Долматов^{1,*}, Н.И. Ермошин^{1,**}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634040 Томск, пр-т Ленина, 30
E-mail: *dolmatovdo@tpu.ru; **nikvan@tpu.ru

Поступила в редакцию 27.07.2022; после доработки 16.08.2022
Принято к публикации 23.08.2022

Задача повышения скорости восстановления изображений дефектов является актуальной проблемой развития промышленной ультразвуковой томографии на основе цифровой когерентной обработки сигналов матричных антенных решеток (АР). В контексте указанной проблемы в рамках данной работы рассмотрено совместное использование вычислительно-эффективных алгоритмов с расчетами в частотной области и матричных АР с неэквидистантным расположением элементов. Совместное применение указанных подходов по повышению скорости получения результатов обеспечивается за счет применения алгоритма цифровой когерентной обработки на основе неэквидистантного быстрого преобразования Фурье (НБПФ). Эффективность данного алгоритма была подтверждена экспериментально.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, ультразвуковая томография, алгоритмы цифровой когерентной обработки с расчетами в частотной области, неэквидистантное быстрое преобразование Фурье, матричные антенные решетки с неэквидистантным расположением элементов.

DOI: 10.31857/S0130308222100025, **EDN:** BSWHQC

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день ультразвуковая томография с применением цифровой когерентной обработки сигналов АР на основе метода синтезированной апертуры находит все большее применение в практике ультразвукового неразрушающего контроля. Такие технологии как Цифровая фокусировка антенной [1, 2] и Total Focusing Method [3], базирующиеся на подобном подходе, реализуются во все большем количестве современных моделей ультразвуковых дефектоскопов на АР [4—7]. Указанная тенденция обусловлена тем фактом, что применение АР в качестве преобразователя в совокупности с цифровой когерентной обработкой сигналов, обеспечивает возможность получения результатов контроля в форме изображений дефектов высокого разрешения, по которым представляется возможным с высокой точностью оценить параметры выявленных несплошностей.

В общем случае дефекты являются объемными и ориентированы в объектах контроля случайным образом, поэтому трехмерные изображения являются наиболее предпочтительной формой получения результатов в ультразвуковой томографии [8]. В этой связи в рамках задачи оценки параметров дефектов большой интерес представляет использование матричных АР. Применение подобных преобразователей способно обеспечить получение трехмерных результатов высокого разрешения как в одной измерительной позиции, так и при сканировании, но связано с необходимостью цифровой когерентной обработки значительного объема ультразвуковых сигналов. Это приводит к низкой скорости получения результатов, что напрямую сказывается на производительности контроля. Таким образом, актуальным вопросом более широкого применения матричных АР в совокупности с цифровой когерентной обработкой сигналов является разработка подходов, обеспечивающих высокую скорость получения результатов.

Для повышения скорости получения трехмерных изображений при применении трехмерной когерентной обработки сигналов матричных АР могут быть применены два принципиальных подхода. Первый подход заключается в получении оптимизированного набора сигналов подлежащих цифровой когерентной обработке, что обеспечивается применением разреженных преобразователей и преобразователей с неэквидистантным расположением элементов [9—14]. Второй подход заключается в разработке и использовании вычислительно-эффективных алгоритмов цифровой когерентной обработки, обеспечивающих высокую скорость восстановления изображений дефектов высокого качества. В рамках данного подхода большой интерес представляет применение алгоритмов цифровой когерентной обработки с расчетами в частотной области, которые показали более высокую скорость получения результатов по сравнению с широко применяемыми алгоритмами

с расчетами во временной области при использовании одноэлементных преобразователей [15], линейных [16] и матричных [17] АР. Алгоритмы с расчетами в частотной области базируются на применении алгоритма быстрого преобразования Фурье, который подразумевает, что данные заданы на равномерной сетке. Тем не менее применение разреженных преобразователей и преобразователей с неэквидистантным расположением элементов подразумевает необходимость когерентной обработки сигналов, заданных на сетке с непостоянным шагом. Таким образом, в данной работе рассматривается совместное использование алгоритмов с расчетами в частотной области и преобразователей с неэквидистантным расположением элементов за счет реализации вычислений в рамках алгоритма на основе использования НБПФ [18].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Антенные решетки с неэквидистантным расположением элементов в форме диска Пуассона. В ультразвуковой дефектоскопии с АР стандартным подходом является использование преобразователей с постоянным шагом (АР с эквидистантным расположением элементов). При этом требуемый шаг подобной решетки (h) определяется в соответствии со следующим критерием:

$$h \leq \lambda / 2, \quad (1)$$

где λ — длина ультразвуковой волны в объекте контроля [19].

Применение специальных режимов сбора данных направлено на восстановление изображений высокого качества при меньшем по сравнению со стандартным подходом набором сигналов. Это может быть обеспечено путем ограничения числа активных элементов в АР, участвующих в зондировании объектов контроля и приеме эхосигналов. В таком случае говорят о разреженных АР. При этом перечень активных элементов АР, обеспечивающих получение результатов высокого качества может меняться в зависимости от условий проведения контроля. Для поиска оптимальной конфигурации АР может использоваться метод перебора, а также алгоритмы стохастической оптимизации [20—22]. Также сбор оптимизированного набора сигналов может быть обеспечен за счет использования преобразователей с непостоянным шагом между соседними элементами (АР с неэквидистантным расположением элементов). В научной литературе были предложены различные конструкции преобразователей с неэквидистантным расположением элементов, включая спиральные антенные решетки и преобразователи с произвольным расположением элементов [23, 24]. Необходимо отметить, что на сегодняшний день не существует общепринятого подхода к получению оптимизированного объема данных. В научной литературе отсутствует сравнительный анализ различных подходов к определению оптимальной конфигурации разреженной АР и конструкций АР с неэквидистантным расположением элементов.

Одним из подходов для получения оптимизированного набора сигналов является применение преобразователя с неэквидистантным расположением элементов в форме диска Пуассона [24]. Предполагается, что при такой конфигурации элементы располагаются в произвольном порядке, но накладывается ограничение на минимальное расстояние между ними.

Определение расположения элементов в таком преобразователе может быть осуществлено в соответствии со следующим алгоритмом [25]:

1. Входными данными для построения конфигурации матричной АР с неэквидистантным расположением элементов является параметр, определяющий размер апертуры (D), и минимально допустимое расстояние между соседними элементами (r).

2. Задается сетка из точек, которая будет служить базисом для формирования конфигурации элементов в форме диска Пуассона. При этом точки заданной сетки должны располагаться с шагом $r/\sqrt{2}$. Кроме того, формируется массив, который будет содержать координаты точек, в которых будут расположены центры элементов преобразователя с неэквидистантным расположением элементов.

3. Поиск конфигурации разреженной АР является итеративным процессом. На каждой итерации выбирается узел сетки x_n , в окрестности которого выбирается набор точек x_i . На выбор точек накладывается следующие ограничения:

$$\begin{aligned} |x_n - x_i| &< 2r; \\ |x_n - x_i| &> r. \end{aligned} \quad (2)$$

Для каждой точки из указанного набора определяются расстояния до ранее определенных элементов матричной АР с неэквидистантным расположением элементов, положение которых опи-

сывается данными из массива. Координаты одной из точек, которая находится на расстоянии не менее чем r от ранее определенных элементов матричной АР (если такие точки имеются в наборе), заносятся в массив с координатами элементов матричной АР. Впоследствии выбранный узел исключается из дальнейших расчетов. Выполнение алгоритма завершается после рассмотрения всех узлов сетки.

Реализация быстрого преобразования Фурье на нерегулярных сетках. Реализация НБПФ первого рода подразумевает необходимость применения свертки с гауссианом, применение алгоритма быстрого преобразования Фурье и реализацию обратной свертки [26]. Для реализации операции свертки, обеспечивающей высокую точность получаемых результатов, задается регулярная сетка с повышенной относительно требуемой сетки частотой дискретизации. Параметры сетки с повышенной частотой дискретизации определяются с учетом степени передискретизации (oversampling ratio), которая является входным параметром при реализации алгоритма.

Для каждой точки (x_j, y_j, z_j) функции $f(x, y, z)$ определяются ближайшая точка (ξ_1, ξ_2, ξ_3) на регулярной сетке; при этом $\xi_1 < x_j$, $\xi_2 < y_j$, $\xi_3 < z_j$. Для каждой точки функции $f(x, y, z)$ рассчитываются параметры гауссианы:

$$E_1 = \exp\left[-\frac{(x_j - \xi_1)^2 + (y_j - \xi_2)^2 + (z_j - \xi_3)^2}{4\tau}\right]; \quad (3)$$

$$E_{2x} = \exp\left[\frac{\pi(x_j - \xi_1)}{M_r\tau}\right]; \quad (4)$$

$$E_{2y} = \exp\left[\frac{\pi(y_j - \xi_2)}{M_r\tau}\right]; \quad (5)$$

$$E_{2z} = \exp\left[\frac{\pi(z_j - \xi_3)}{M_r\tau}\right]; \quad (6)$$

$$E_3(k) = \exp[\tau k^2], \quad |k| < N/2, \quad (7)$$

где τ — параметр, определяющий ширину гауссианы; M_r — количество отсчетов в регулярной сетке с повышенным шагом дискретизации; k — волновое число; N — размеры регулярной сетки, для которой требуется получить преобразование Фурье.

Таким образом, для каждой точки (x_j, y_j, z_j) функции $f(x, y, z)$ рассчитывается:

$$V_{xyz} = f(x_j, y_j, z_j) \cdot E_1 \cdot E_{2x}(n_1) \cdot E_{2y}(n_2) \cdot E_{2z}(n_3); \quad (8)$$

$$f_\tau(m_1 + n_1, m_2 + n_2, m_3 + n_3) = f_\tau(m_1 + n_1, m_2 + n_2, m_3 + n_3) + V_{xyz}, \quad (9)$$

где $n_1 = \overline{-M_{sp} + 1, M_{sp}}$, $n_2 = \overline{-M_{sp} + 1, M_{sp}}$, $n_3 = \overline{-M_{sp} + 1, M_{sp}}$, $(m_1, m_2, m_3) = \frac{(\xi_1, \xi_2, \xi_3) \cdot M_r}{2\pi}$.

Параметр M_{sp} определяет количество точек на регулярной сетке с повышенной частотой дискретизации в окрестности точки (x_j, y_j, z_j) функции $f(x, y, z)$.

Результатом сопряжения является функция $f_\tau(m_1, m_2, m_3)$ с регулярной сеткой, для которой с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье получают фурье-образ $F_\tau(k_1, k_2, k_3)$. Получение итогового результата обеспечивается применением операции обратной свертки:

$$F(k_1, k_2, k_3) = \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} \cdot E_3(k_1) \cdot E_3(k_2) \cdot E_3(k_3) \cdot F_\tau(k_1, k_2, k_3). \quad (10)$$

Алгоритм цифровой когерентной обработки сигналов АР с неэквидистантным расположением элементов с расчетами в частотной области. Рассмотрим совмещенный режим работы

матричной АР. Алгоритм с расчетами в частотной области [15], обеспечивающий высокую скорость восстановления изображений в случае применения иммерсионного акустического контакта требуется адаптировать для случая трехмерной цифровой когерентной обработки на неравномерной сетке, что связано с применением разреженной матричной АР или преобразователя с неэквидистантным расположением элементов.

Набор сигналов, зарегистрированных матричным преобразователем, может быть описан функцией $P(t, x, y, z)$, где t — это время; x, y, z — координаты элемента матричной антенной решетки. Необходимо отметить, что использование преобразователя с неэквидистантным расположением элементов подразумевает, что указанная функция задана на неравномерной сетке, что приводит к необходимости использования на первом этапе алгоритма НБПФ первого рода, реализация которого рассмотрена в формулах (3)—(10). Результатом применения НБПФ является фурье-образ функции $p(\omega, k_x, k_y, z)$, заданный на равномерной сетке:

$$P(t, x, y, z) \xrightarrow{\text{НБПФ}} p(\omega, k_x, k_y, z), \quad (11)$$

где ω — угловая частота; k_x, k_y — компоненты волнового вектора.

Следующим шагом в рамках алгоритма является экстраполяция функции $p(\omega, k_x, k_y, z)$ на границу раздела объект контроля — иммерсионная жидкость (вода):

$$p(\omega, k_x, k_y, z + \Delta z) = p(\omega, k_x, k_y, z) \cdot e^{ik_z \Delta z}, \quad (12)$$

где Δz — толщина слоя иммерсионной жидкости; k_z — компонента волнового вектора.

При этом компонента волнового вектора k_z в формуле (12) определяется с использованием следующего выражения:

$$k_z = -\frac{\omega}{|\omega|} \left(\frac{\omega^2}{\hat{c}_1^2} - k_x^2 - k_y^2 \right)^{1/2}, \quad (13)$$

где \hat{c}_1 — половина скорости продольных волн в иммерсионной среде.

Получение трехмерного изображения осуществляется с применением преобразования Столта, для чего угловая частота выражается через компоненты волнового вектора:

$$\omega(k_x, k_y, k_z) = -\frac{k_z}{|k_z|} \cdot \hat{c}_2 \cdot (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)^{1/2}. \quad (14)$$

Таким образом, получение изображения реализуется через замену переменной, интерполяцию и применение трехмерного обратного преобразования Фурье:

$$P(\omega, k_x, k_y, z + \Delta z) \longrightarrow P(k_x, k_y, k_z) \xrightarrow{\text{БПФ}} I(x, y, z). \quad (15)$$

Экспериментальная часть. Алгоритм цифровой когерентной обработки, базирующийся на расчетах в частотной области и рассмотренный в предыдущих разделах, был реализован в программном пакете Matlab. Входными данными для алгоритма служили наборы сигналов, полученные в результате сканирования объектов контроля. Выходным результатом работы алгоритма являются трехмерные изображения дефектов в используемых тестовых образцах. Также с использованием программного пакета Matlab был создан алгоритм поиска конфигурации матричной АР с неэквидистантным расположением элементов в форме диска Пуассона. Входными параметрами для данного алгоритма служил параметр, определяющий размер апертуры (параметр D), а также минимально допустимое расстояние между соседними элементами (параметр r). Результатом работы данного алгоритма является набор координат, характеризующий расположение элементов в преобразователе.

Для проверки алгоритма цифровой когерентной обработки на основе НБПФ была проведена серия натуральных экспериментов на экспериментальном стенде, основой которого служил блок электроники OPTUS (I-Deal Technologies GmbH) (рис. 1).

Для проведения серии экспериментов использовалось два участка тестового образца, содержащие плоскодонные отверстия диаметром 2 мм. Эскиз тестового образца представлен на рис. 2. Взаимное расположение дефектов в тестовых участках представлено на рис. 3. Участок, содержащий одиночный дефект (рис. 3а), предназначен для оценки разрешения и отношения сигнал/шум (ОСШ) результатов, полученных с использованием алгоритма с расчетами в частотной области.



Рис. 1. Электронный блок OPTUS.

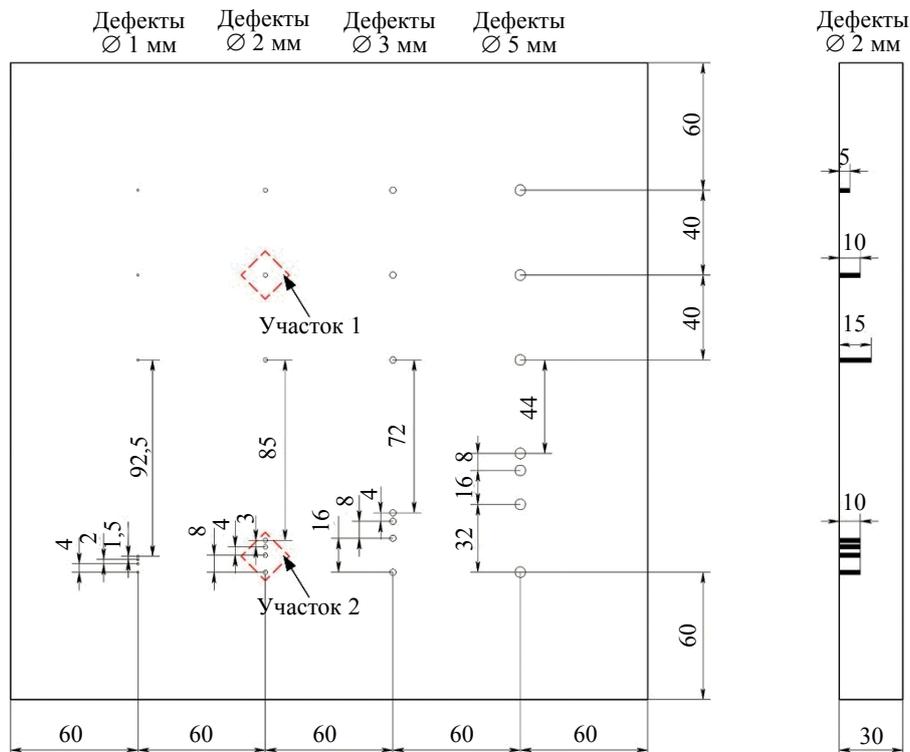


Рис. 2. Эскиз тестового образца.

Участок с близкорасположенными дефектами (рис. 3б) был использован для подтверждения результатов, полученных для одиночного дефекта.

В качестве преобразователя в серии экспериментов применяли матричную АР с эквидистантным расположением элементов Doppler 5M8×8BP1.0 (рис. 4). Для проведения экспериментальной верификации с применением разработанного алгоритма был определен набор матричных АР с неэквидистантным расположением элементов в форме диска Пуассона, параметры которых представлены в табл. 1. Расположение элементов в этих преобразователях представлено на рис. 5.

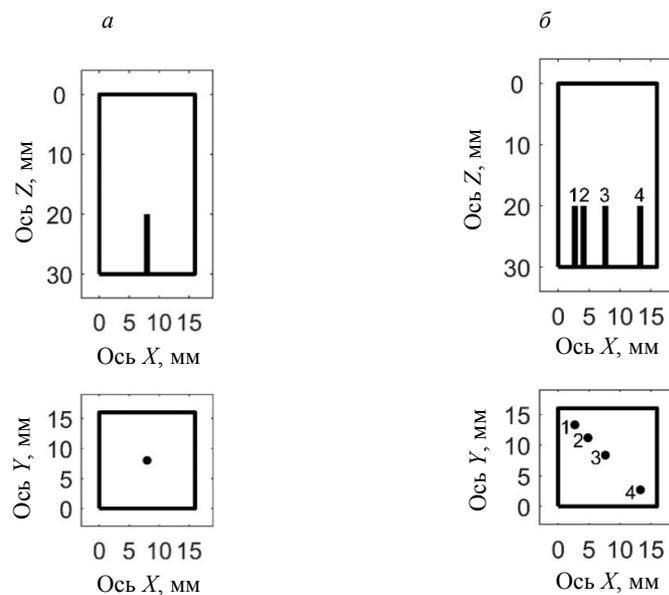


Рис. 3. Взаимное расположение дефектов в выбранных участках тестового образца: участок с одиночным дефектом (а); участок с множественными дефектами (б).



Рис. 4. Ультразвуковой преобразователь Doppler 5M8×8P1.0.

Таблица 1

Параметры матричных АР, имеющих неэквидистантное расположение элементов в форме диска Пуассона

№ АР	Количество элементов в АР	Параметр D , мм	Параметр r , мм
1	1153	16	0,4
2	524	16	0,6
3	297	16	0,8
4	194	16	1
5	101	16	1,4
6	51	16	2

В процессе экспериментальной верификации использовали первый элемент преобразователя (размер $0,8 \times 0,8$ мм, рабочая частота $5,41$ МГц). При этом работа преобразователей с неэквидистантным расположением элементов в совмещенном режиме моделировалась за счет перемещения эле-

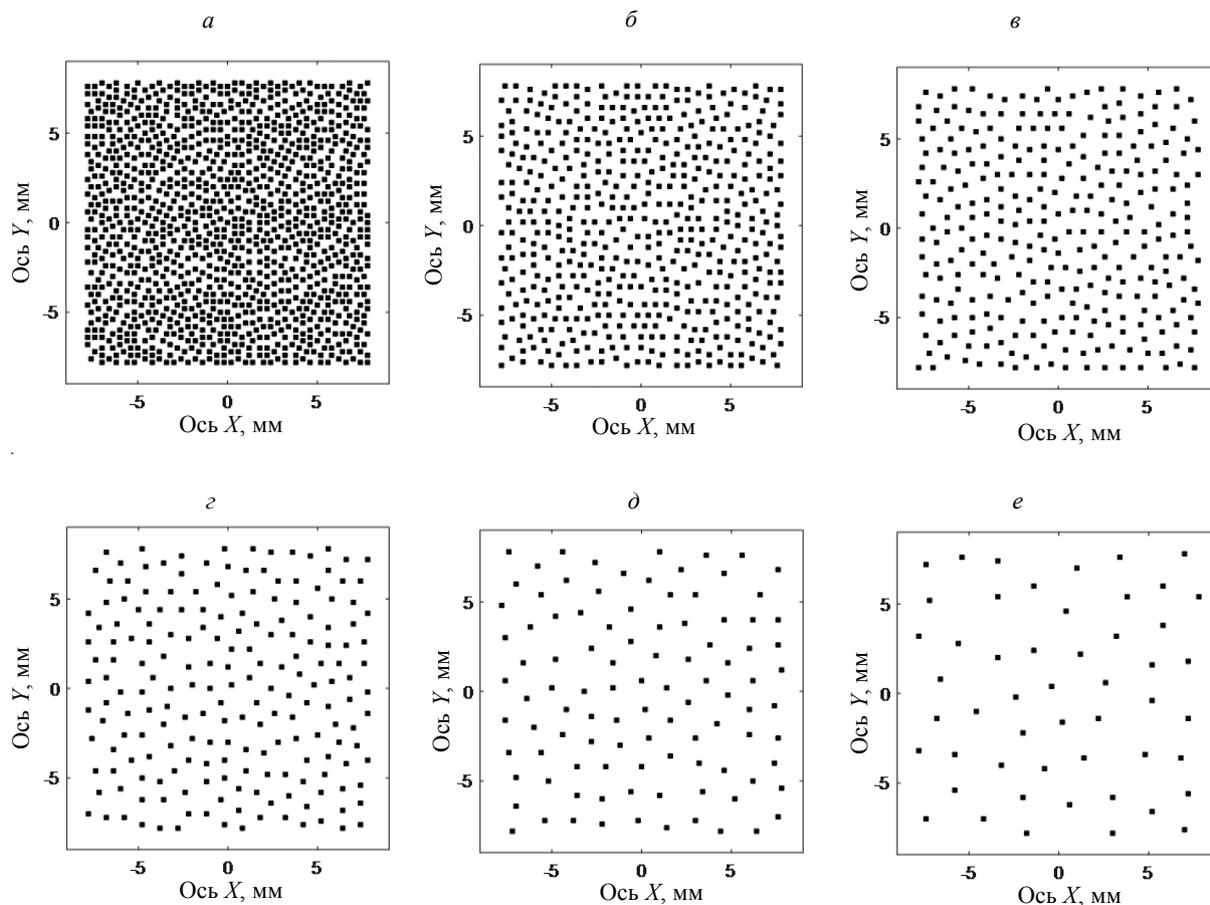


Рис. 5. Расположение элементов матричных AP с неэквидистантным расположением элементов: AP № 1 (а); AP № 2 (б); AP № 3 (в); AP № 4 (г); AP № 5 (д); AP № 6 (е).

мента используемой матричной AP в заданные точки пространства с использованием двухосного манипулятора с точностью позиционирования 0,1 мм.

Наборы сигналов, полученных в результате сканирования тестовых образцов с применением иммерсионного акустического контакта, являлись исходными данными для алгоритма цифровой когерентной обработки на основе НБПФ. В рамках данной экспериментальной верификации восстанавливали трехмерные изображения размером $16 \times 16 \times 30$ мм и разрешением 0,2 мм.

Полученные результаты оценивали по полученному разрешению, для чего использовали величину Aggray Performance Indicator (API) [27]. Для трехмерных изображений указанная величина может быть рассчитана для отражателя по следующей формуле:

$$API = \frac{V_{-6\text{дБ}}}{\lambda^3}, \quad (16)$$

где $V_{-6\text{дБ}}$ — объем отражателя, в которой амплитуда синтезированного изображения выше порога в -6 дБ от максимальной амплитуды, соответствующей этому отражателю на синтезированном изображении.

Кроме того, оценивали ОСШ полученных результатов, что осуществляли с применением следующей формулы [28, 29]:

$$SNR = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{I_1}{I_2} \right), \quad (17)$$

где I_1 — максимальная амплитуда вокселя, соответствующего отражателю на синтезированном изображении; I_2 — максимальная амплитуда вокселя в области на синтезированном изображении, не содержащей отражателя.

Параметры матричных АР с эквидистантным расположением элементов, рассматриваемых при проведении экспериментов

№ АР	Количество элементов в АР	Размер апертуры, мм	Шаг АР, мм
1	1600	16×16	0,4
2	729	16,2×16,2	0,6
3	400	16×16	0,8
4	256	16×16	1
5	144	16,8×16,8	1,4
6	64	16×16	2

Для оценки результатов, полученных с использованием алгоритма на основе НБПФ и АР с неэквидистантным расположением элементов для тестового образца с одиночным отражателем, сравнивали с изображениями дефектов, полученных с использованием стандартного подхода, который подразумевает использование преобразователей с эквидистантным расположением элементов и применения алгоритмов с расчетами во временной области. При этом цифровую когерентную обработку с расчетами во временной области применяли в соответствии с [30]. В рамках экспериментальной верификации рассматривали АР с эквидистантным расположением элементов, представленные в табл. 2. Моделирование работы указанных преобразователей также осуществляли за счет перемещения элемента матричной АР с использованием двухосного манипулятора с точностью позиционирования 0,1 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как было сказано ранее, результатом цифровой когерентной обработки экспериментальных данных являлись трехмерные изображения дефектов в участках тестового образца (рис. 6).

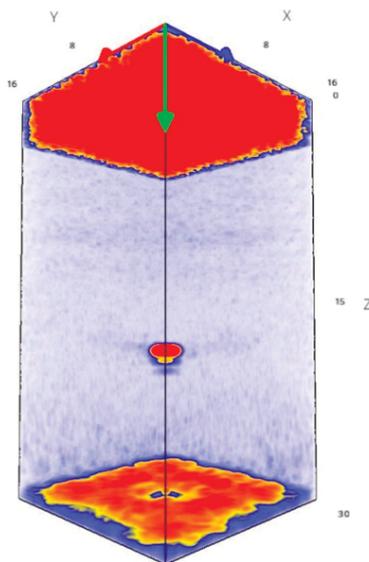


Рис. 6. Пример результата трехмерной цифровой когерентной обработки.

Результаты для участка тестового образца с одиночным дефектом в форме проекций на ось ХУ представлены на рис. 7 и рис. 8. На рис. 7 показаны результаты при использовании преобра-

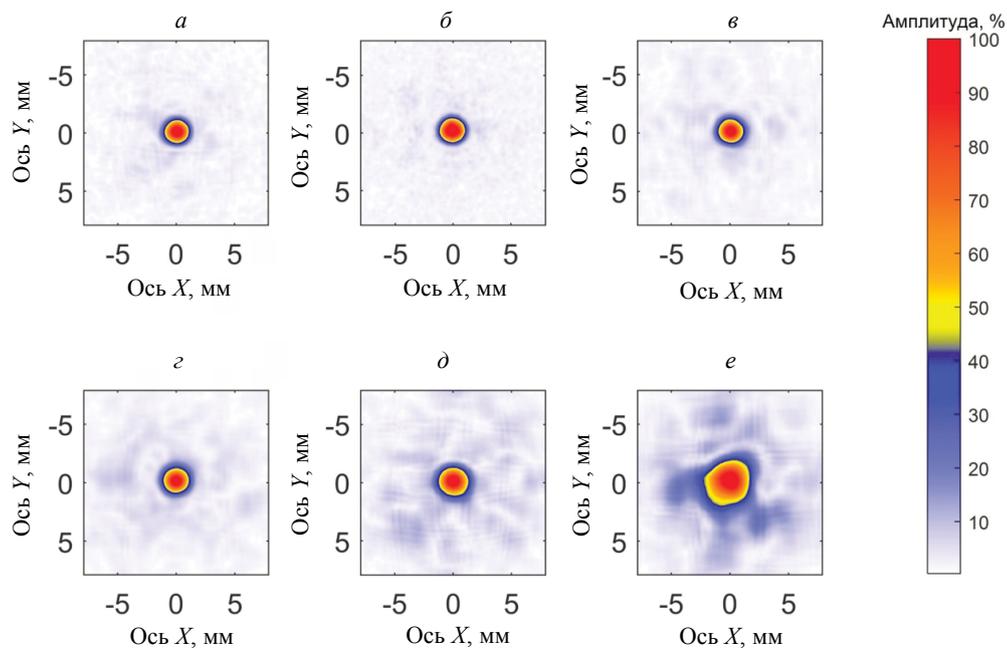


Рис. 7. Результаты цифровой когерентной обработки с применением алгоритма на основе НБПФ и матричной АР с неэквидистантным расположением элементов: АР № 1 (а); АР № 2 (б); АР № 3 (в); АР № 4 (г); АР № 5 (д); АР № 6 (е).

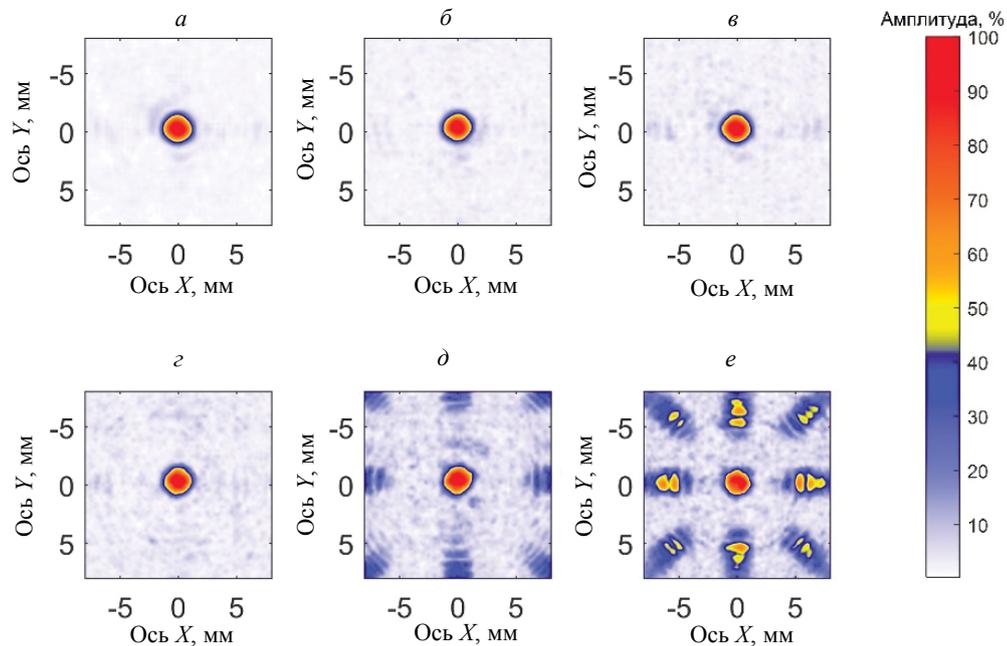


Рис. 8. Результаты цифровой когерентной обработки с применением алгоритма с расчетами во временной области и АР с эквидистантным расположением элементов: АР № 1 (а); АР № 2 (б); АР № 3 (в); АР № 4 (г); АР № 5 (д); АР № 6 (е).

зователей с неэквидистантным расположением элементов в форме диска Пуассона и применении цифровой когерентной обработки с расчетами в частотной области. Аналогичные результаты при использовании стандартного подхода представлены на рис. 8. Обозначения АР на рис. 7 даны в соответствии с табл. 1, а обозначение преобразователей на рис. 8 даны в соответствии с табл. 2.

Полученные изображения оценивали по разрешению и ОСШ в соответствии с формулами (16) и (17). Результаты оценки величины АРІ представлены в табл. 3, а результаты оценки ОСШ — в табл. 4 и в графиках на рис. 9.

Таблица 3

Значения АРІ полученных результатов

АР с неэквидистантным расположением элементов				АР с эквидистантным расположением элементов				Разница, %
№ АР	Количество элементов АР	Параметр r , мм	АРІ	№ АР	Количество элементов АР	Параметр h , мм	АРІ	
1	1153	0,4	0,809	1	1600	0,4	0,808	0,1
2	524	0,6	0,807	2	729	0,6	0,814	-0,9
3	297	0,8	0,811	3	400	0,8	0,823	-1,5
4	194	1	0,865	4	256	1	0,841	2,8
5	101	1,4	0,949	5	144	1,4	0,893	5,9
6	51	2	2,580	6	64	2	0,668	74,1

Таблица 4

Значения ОСШ полученных результатов

АР с неэквидистантным расположением элементов				АР с эквидистантным расположением элементов				Разница, дБ
№ АР	Количество элементов АР	Параметр r , мм	ОСШ, дБ	№ АР	Количество элементов АР	Параметр h , мм	ОСШ, дБ	
1	1153	0,4	28,2	1	1600	0,4	24,1	4,1
2	524	0,6	26,1	2	729	0,6	21,7	4,4
3	297	0,8	23,1	3	400	0,8	18,6	4,5
4	194	1	20,9	4	256	1	16,2	4,7
5	101	1,4	17,1	5	144	1,4	10,2	6,9
6	51	2	12,2	6	64	2	4,5	7,7

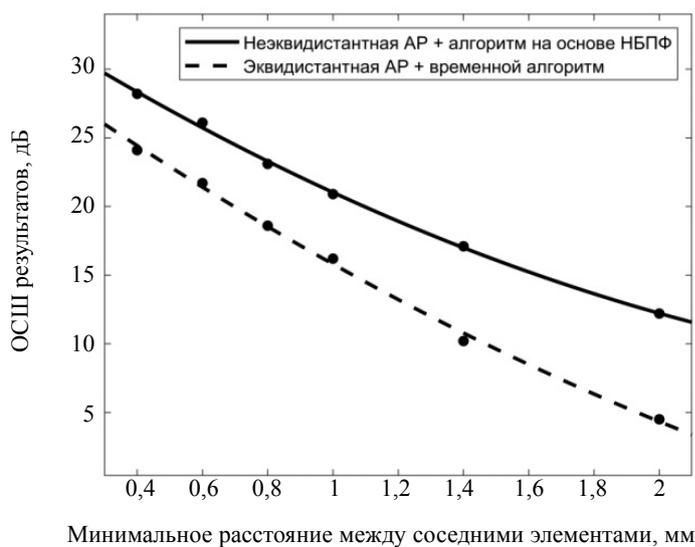


Рис. 9. Зависимость ОСШ от минимального расстояния между элементами матричных АР.

Таким образом, исходя из полученных данных, применение АР с неэквидистантным расположением элементов в совокупности с цифровой когерентной обработкой с расчетами в частотной области на основе НБПФ способно обеспечить восстановление изображений со сходным разрешением относительно стандартного подхода при более высоком ОСШ полученных результатов. При этом необходимо отметить, что при минимальном расстоянии между элементами (задаются параметром r для АР с неэквидистантным расположением элементов и параметром h для преобразователя с эквидистантным расположением элементов), равном 2 мм, в обоих случаях изображение высокого качества получить не удалось. При использовании АР с неэквидистантным расположением элементов и алгоритма на основе НБПФ получается низкое разрешение изображения дефекта, в то время как при использовании стандартного подхода восстанавливаемое изображение имеет низкое ОСШ.

На рис. 10 представлены результаты цифровой когерентной обработки с расчетами в частотной области на основе НБПФ для участка тестового образца, содержащего несколько близкорасположенных дефектов. Обозначение АР с неэквидистантным расположением элементов дается в соответствии с табл. 1.

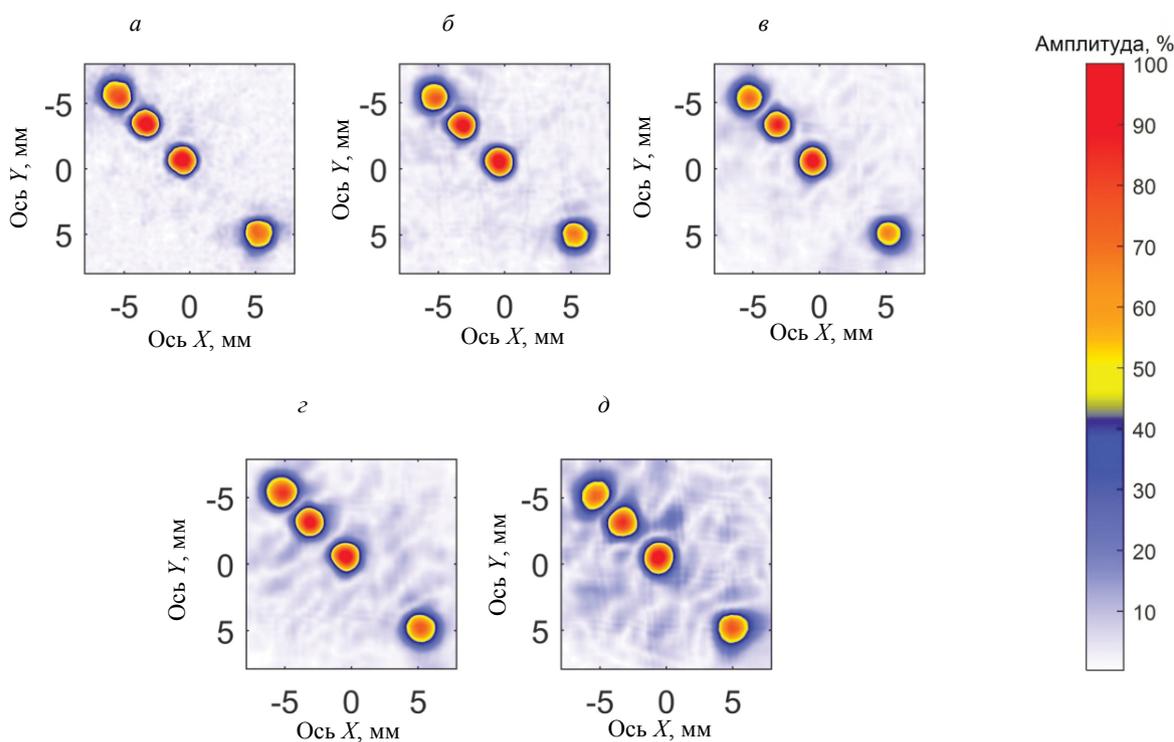


Рис. 10. Результаты цифровой когерентной обработки с применением алгоритма на основе НБПФ и матричной АР с неэквидистантным расположением элементов: АР № 1 (а); АР № 2 (б); АР № 3 (в); АР № 4 (г); АР № 5 (д).

Результаты оценки значения АРІ и ОСШ представлены в табл. 5. Нумерация дефектов в табл. 5 приводится в соответствии с рис. 3.

В целом, результаты, полученные с применением алгоритма на основе НБПФ для участка тестового образца с несколькими дефектами, коррелируют с результатами, полученными ранее для участка образца с одиночным дефектом. Получено сходное разрешение изображений дефектов, которое оценивалось с применением величины АРІ при высоком ОСШ. Это показывает потенциальную эффективность применения алгоритма на основе НБПФ совместно с использованием АР с неэквидистантным расположением элементов.

Таблица 5

Значения АРІ и ОСШ результатов, полученных для участка тестового образца с несколькими дефектами

№ АР	Количество элементов АР	Параметр r , мм	№ дефекта	АРІ	ОСШ, дБ
1	1153	0,4	1	0,827	25,9
			2	0,818	26,6
			3	0,805	27,0
			4	0,832	24,5
2	524	0,6	1	0,833	22,5
			2	0,821	24,2
			3	0,801	24,5
			4	0,844	21,7
3	297	0,8	1	0,840	20,1
			2	0,823	21,7
			3	0,816	21,9
			4	0,864	18,9
4	194	1	1	0,903	17,2
			2	0,855	18,2
			3	0,837	18,6
			4	0,932	16,4
5	101	1,4	1	0,974	12,4
			2	0,976	14,5
			3	0,963	15,3
			4	1,051	12,2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрен алгоритм цифровой когерентной обработки сигналов с расчетами в частотной области на основе НБПФ, реализующий расчеты в частотной области и учитывающий непостоянный шаг между активными элементами матричной АР, что актуально при использовании разреженных преобразователей и АР с неэквидистантным расположением элементов. В рамках сравнительного анализа данный алгоритм рассматривался совместно с матричной АР с неэквидистантным расположением элементов в форме диска Пуассона. Результаты, полученные с применением подобного подхода, сравнивали с результатами, полученными с применением стандартного для цифровой когерентной обработки сигнала подхода (алгоритм с расчетами во временной области в совокупности с использованием матричной АР с эквидистантным расположением элементов). Полученные результаты свидетельствуют, что оба подхода обеспечивают получение изображений дефектов со сходным разрешением. Разница в значении АРІ для результатов, полученных с применением двух подходов, во всех случаях не превышала 6 %. При этом применение решетки с неэквидистантным расположением элементов в совокупности с алгоритмом на основе НБПФ обеспечивает получение результатов с более высоким ОСШ. Во всех рассмотренных случаях алгоритм на основе НБПФ обеспечивал получение изображений дефекта с более высоким ОСШ (разница составляла от 4,1 до 7,7 дБ). Также восстановление изображений с применением АР с неэквидистантным расположением элементов осуществлялась меньшим по объему сигналов относительно стандартного подхода. При одинаковом ограничении на минимальное расстояние между соседними элементами набор сигналов АР с неэквидистантным рас-

положением элементов был ниже на значение от 20 до 30 %, что является важным фактором для решения задачи повышения скорости восстановления изображений. Результаты, полученные с применением алгоритма на основе НБПФ для участка тестового образца с одним дефектом, были подтверждены результатами, полученными с использованием указанного алгоритма для участка образца с несколькими близкорасположенными дефектами. Во всех рассмотренных случаях получены изображения с высоким ОСШ и разрешением, сходным с тем, что были получены для участка образца с одиночным дефектом.

Полученные результаты являются базисом для дальнейших исследований и разработок в области цифровой когерентной обработки сигналов матричных антенных решеток для решения задач ультразвукового неразрушающего контроля. Важным вопросом является аппаратная оптимизация алгоритма на основе НБПФ, например, перевод расчетов в рамках данного алгоритма на программируемые логические интегральные схемы или графические процессоры, что должно обеспечить высокую скорость получения результатов. Кроме того, в работе рассмотрен алгоритм для работы матричной АР в совмещенном режиме. Тем не менее в контексте использования АР наибольший интерес представляет использование режима двойного сканирования, обеспечивающего получение максимального набора данных о внутренней структуре контролируемого изделия. Таким образом, адаптация алгоритма на основе НБПФ для работы матричной АР в режиме двойного сканирования также является актуальным и важным вопросом дальнейших исследований и разработок.

Исследование выполнено за счет гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук и докторов наук (проект № МК-1679.2022.4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bazulin E.G.* Comparison of systems for ultrasonic nondestructive testing using antenna arrays or phased antenna arrays // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2013. V. 49. No. 7. P. 404—423.
2. *Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G.* Ultrasonic tomography of metal structures using the digitally focused antenna array method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2011. V. 47. No. 1. P. 16—29.
3. *Holmes C., Drinkwater B., Wilcox P.* The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method // *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2004. V. 46. No. 11. P. 677—680.
4. M2M Gekko Specifications Sheet [Электронный ресурс] // Eddyfi Режим доступа: https://eddyfi.com/doc/Downloadables/201906_M2M-GEKKO-specifications-sheet_A4-01.pdf, свободный. Загол. с экрана (дата обращения: 20.07.2022).
5. OmniScan X3 64 [Электронный ресурс] // Olympus Режим доступа: <https://www.olympus-ims.com/ru/phasedarray/omniscan-x3/>, свободный. Загол. с экрана (дата обращения: 20.07.2022).
6. АВГУР-АРТ [Электронный ресурс] // НПЦ ЭХО+ Режим доступа: <https://echoplus.ru/products/defektoskopy/augur-art/>, свободный. Загол. с экрана (дата обращения: 20.07.2022).
7. Высокочастотный ультразвуковой дефектоскоп-томограф a1550 introvisor [Электронный ресурс] // Акустические контрольные системы. Режим доступа: <https://acsys.ru/vyisokochastotnyj-ultrazvukovoj-defektoskop-tomograf-a1550-introvisor/>, свободный. Загол. с экрана (дата обращения: 20.07.2022).
8. *Dolmatov D.O., Tarrazó-Serrano D., Filippov G.A., Minin I.V., Minin O.V., Sednev D.A.* Application of Phase-Reversal Fresnel Zone Plates for Improving The Elevation Resolution in Ultrasonic Testing with Phased Arrays // *Sensors*. 2019. V. 19. No. 23. Article number: 5080.
9. *Bazulin E.G.* Ultrasonic testing on a singly reflected beam using sparse antenna arrays and 3D echo-signal processing // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. V. 52. No. 1. P. 1—13.
10. *Hu H., Du J., Ye C., Li X.* Ultrasonic phased array sparse-TFM imaging based on sparse array optimization and new edge-directed interpolation // *Sensors*. 2018. V. 18. No. 6. Article number: 1830.
11. *Yang P., Chen B., Shi K.R.* Novel method to design sparse linear arrays for ultrasonic phased array // *Ultrasonics*. 2006. V. 44. P. e717—e721.
12. *de Souza J.C.E., Parrilla Romero M., Higuti R.T., Martínez-Graullera O.* Design of Ultrasonic Synthetic Aperture Imaging Systems Based on a Non-Grid 2D Sparse Array // *Sensors*. 2021. V. 21. No. 23. Article number: 8001.
13. *Martínez-Graullera O., de Souza J.C.E., Parrilla Romero M., Higuti R.T.* Design of 2D Planar Sparse Binned Arrays Based on the Coarray Analysis // *Sensors*. 2021. V. 21. No. 23. Article number: 8018.
14. *Ramalli A., Boni E., Savoia A.S., Tortoli P.* Density-tapered spiral arrays for ultrasound 3-D imaging // *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 2015. V. 62. No. 8. P. 1580—1588.
15. *Skjelvareid M.H., Olofsson T., Birkelund Y., Larsen Y.* Synthetic aperture focusing of ultrasonic data from multilayered media using an omega-k algorithm // *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 2011. V. 58. No. 5. P. 1037—1048.

16. *Hunter A.J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D.* The wavenumber algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 2008. V. 55. No. 11. P. 2450—2462.
17. *Dolmatov D.O., Sednev D.A., Bulavinov A.N., Pinchuk R.V.* Applying the algorithm of calculation in the frequency domain to ultrasonic tomography of layered inhomogeneous media using matrix antenna arrays // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 7. P. 499—506.
18. *Capozzoli A., Curcio C., Liseno A.* Optimized Nonuniform FFTs and Their Application to Array Factor Computation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. V. 67. No. 6. P. 3924—3938.
19. *Moreau L., Drinkwater B.W., Wilcox P.D.* Ultrasonic imaging algorithms with limited transmission cycles for rapid nondestructive evaluation // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 2009. V. 56. No. 9. P. 1932—1944.
20. *Bannouf S., Robert S., Casula O., Prada C.* Data set reduction for ultrasonic TFM imaging using the effective aperture approach and virtual sources // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2013. V. 457. No. 1. Article number: 012007.
21. *Hu H., Du J., Xu N., Jeong H., Wang X.* Ultrasonic sparse-TFM imaging for a two-layer medium using genetic algorithm optimization and effective aperture correction // NDT & E International. 2017. V. 90. P. 24—32.
22. *Dolmatov D.O., Ermoshin N.I., Koneva D.A., Sednev D.A.* Application of Nonuniform Fourier Transform to Solving Ultrasonic Tomography Problems with Antenna Arrays // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 8. P. 603—610.
23. *Martínez-Graullera O., Martín C. J., Godoy G., Ullate L.G.* 2D array design based on Fermat spiral for ultrasound imaging // Ultrasonics. 2010. V. 50. No. 2. P. 280—289.
24. *Velichko A., Wilcox P.D.* Characterisation of Complex Defects Using Two-Dimensional Ultrasonic Arrays // Proceedings of the ECNDT. 2010. V. 1. P. 18.
25. *Bridson R.* Fast Poisson disk sampling in arbitrary dimensions // ACM SIGGRAPH. 2007.
26. *Greengard L., Lee J.Y.* Accelerating the nonuniform fast Fourier transform // SIAM review. 2004. V. 46. No. 3. P. 443—454.
27. *Fan C., Caleap M., Pan M., Drinkwater B.W.* A comparison between ultrasonic array beamforming and super resolution imaging algorithms for non-destructive evaluation // Ultrasonics. 2014. V. 54. No. 7. P. 1842—1850.
28. *Zhang J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D., Hunter A.J.* Defect detection using ultrasonic arrays: The multi-mode total focusing method // NDT&E International. 2010. V. 43. P. 123—133.
29. *Dolmatov D. O., Tarrazó-Serrano D., Filippov G.A., Uris A., Sednev D.A.* Application of Phase-Reversal Fresnel Zone Plates for High-Resolution Robotic Ultrasonic Non-Destructive Evaluation // Sensors. 2021. V. 21. No. 23. Article number: 7792.
30. *Kvasnikov K.G., Soldatov A.I., Bolotina I.O., Krening K.M., Potapenko A.A.* The use of geometrical acoustics for the solution of visualization problems // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2013. V. 49. No. 11. P. 625—630.

ВЫЯВЛЕНИЕ НАРУШЕНИЙ УКЛАДКИ СЛОЕВ ВОЛОКОН В УГЛЕПЛАСТИКАХ МЕТОДОМ ШИРОКОПОЛОСНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

© 2022 г. Ю.Г. Соколовская^{1,*}, Н.Б. Подымова^{1,**}, А.А. Карабутов^{1,2,***}

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Россия 119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр.2

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия 119991 Москва, ул. Вавилова, 38
E-mail: *yu.sokolovskaya@mail.ru; **npodymova@mail.ru; ***aak@optoacoustic.ru

Поступила в редакцию 11.07.2022; после доработки 02.09.2022

Принята к публикации 09.09.2022

Показана возможность обнаружения нарушений укладки слоев армирующей ткани в углепластиках, представляющих собой зазоры между лентами углеродных волокон. Для этой задачи использовалась широкополосная акустическая спектроскопия с лазерным источником ультразвука. Широкая полоса частот зондирующего сигнала позволяет получить частотные зависимости для коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн в углепластике в спектральном диапазоне 1—11 МГц. На примере исследованной стрингерной панели показано, что в областях с наличием зазоров наблюдается локальный минимум внутри резонансного максимума коэффициента затухания, вызванный нарушением периодичности структуры. Сканирование объекта вдоль поверхности позволяет определять направление данных зазоров в плоскости укладки углеродной ткани.

Ключевые слова: лазерный ультразвук, коэффициент затухания ультразвука, продольные акустические волны, углепластики, полимерные композиты.

DOI: 10.31857/S0130308222100037, **EDN:** ВТСРZH

ВВЕДЕНИЕ

Разработка методов неразрушающего контроля структуры углепластиков является в настоящее время актуальной задачей вследствие их широкого применения во многих отраслях производства. Так, например, они используются в авиации, ракетостроении, судостроении, атомной промышленности [1—4]. Углепластики представляют собой материал со слоистой периодической структурой, образованной слоями углеродной ткани и полимерной матрицы [5]. Конструкции из углепластика обладают высокой прочностью и жесткостью, однако их прочность может значительно ухудшаться из-за нарушений структуры, возникающих на этапе изготовления. Обнаружение структурных нарушений в углепластиках может осуществляться с помощью ультразвуковых методов (традиционных [4, 6] и лазерно-ультразвуковых [7]), инфракрасной термографии [8], акустико-эмиссионных методик [3], а также рентгеновской томографии [4]).

В современной промышленности для изготовления углепластиковых деталей и конструкций часто применяются методы автоматизированной выкладки углеродных лент [9—11]. Эти методы имеют важное преимущество — сокращение времени изготовления для крупногабаритных конструкций. Однако все же остается проблема возникновения производственных дефектов структуры материала. Типичным примером таких дефектов являются зазоры в слоях углеродной ткани, которые возникают между соседними лентами углеродных волокон вследствие неточности их выкладки [10—13]. Размеры таких зазоров составляют порядка миллиметра в направлении, перпендикулярном волокнам, и порядка нескольких сантиметров в параллельном направлении. Известно, что их наличие может приводить к существенному уменьшению прочности композитной конструкции. Так, например, в [14] проводилось численное моделирование поведения углепластика при прочностных испытаниях методом конечных элементов и было показано снижение прочности при наличии зазоров в слоях углеродной ткани. Проведенные в работах [11, 12] испытания также подтверждают уменьшение прочности на сжатие и сдвиг для углепластика с зазорами. Таким образом, необходима разработка методов неразрушающего контроля, позволяющих выявить данные нарушения структуры.

Так как при пропитке зазоры заполняются связующим, то при отверждении между лентами волокон образуются каналы из полимерной матрицы. Фактически, в местах их нахождения возникает локальное нарушение чередования слоев (углеродная ткань—полимерная матрица—углеродная ткань), и данный дефект можно рассматривать как локальное нарушение периодичности слоистого материала. Параметры слоистой периодической структуры (толщины и последовательность слоев,

их акустические импедансы) оказывают влияние на характер частотной зависимости коэффициентов пропускания и коэффициентов затухания продольных акустических волн в такой структуре [15—19]. При этом в спектрах пропускания акустических волн такими структурами будут наблюдаться полосы прозрачности и непрозрачности, и вблизи полос непрозрачности величина коэффициента затухания ультразвука резко возрастает [17, 20]. Так, например, в работе [15] существование полос прозрачности и непрозрачности в спектре пропускания периодической структуры было показано на примере модельных структур из чередующихся металлических пластин с различным акустическим импедансом, а в [17, 18] — на примере структур из чередующихся слоев стеклянных пластин и слоев воды. Присутствие в структуре дефектов, нарушающих ее периодичность, приводит к возникновению пиков пропускания внутри полос непрозрачности [15, 17] — локальных экстремумов в частотных зависимостях коэффициентов затухания и пропускания.

Для выявления зазоров в слоях углеродной ткани в данной работе предлагается использовать метод широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником зондирующих импульсов продольных акустических волн (см., напр., [21]). Преимуществами метода являются большая амплитуда и малая длительность зондирующих ультразвуковых сигналов. Это позволяет применять его для исследования сильно поглощающих и рассеивающих ультразвук композитных материалов [16, 21]. Подбор параметров лазерного излучения и материала для оптико-акустического источника позволяет создавать зондирующие импульсы с заданной полосой частот, необходимой для конкретной задачи.

Таким образом, цель настоящей работы состоит в обнаружении зазоров между лентами углеродной ткани в углепластике с использованием метода широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником. Основная идея состоит в том, что данный метод позволяет получать зависимости коэффициента затухания продольных акустических волн $\alpha(f)$ в широком частотном диапазоне от долей до десятков мегагерц, при этом характер частотных зависимостей коэффициента затухания продольных акустических волн несет в себе информацию об особенностях структуры исследуемого композита. Это позволит выявить области с нарушением периодичности структуры углепластика.

ИССЛЕДУЕМЫЙ ОБЪЕКТ

Схема структуры углепластика показана на рис. 1а. На рис. 1б приведено схематическое изображение зазоров между лентами углеродной ткани (в слоях под углами 0 и 45°). Фото зазоров (на примере полуфабриката препрега из нескольких слоев) представлено на рис. 1в. После отверждения материала на местах таких зазоров присутствуют каналы, заполненные полимерной матрицей, размер данных каналов для исследуемого материала составлял в среднем от 0,5 до 1,5 мм в направлении, перпендикулярном волокнам. В направлении вдоль волокон размер каналов может составлять до нескольких сантиметров или десятков сантиметров в зависимости от степени отклонения волоконной ленты от заданного положения при укладке материала, а также от размера конструкции. Отметим, что в углепластике с перекрестным армированием данный дефект наблюдается чаще, чем в однонаправленном материале. В данной работе исследовалась углепластиковая конструкция — трехстрингерная панель, схема которой показана на рис. 1г. Панель имела перекрестную структуру армирования: слои углеродной ткани в материале были уложены под углами 0, ±45, 90°. Пунктиром на рис. 1г выделена область толщиной 6 мм, состоящая из 32 слоев углеродной ткани, внутри этой области было выбрано несколько участков для ультразвукового исследования.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема широкополосного акустического спектрометра с лазерным источником показана на рис. 2а. Для возбуждения акустических зондирующих импульсов использовался Nd:YAG-лазер с диодной накачкой и модуляцией добротности, длина волны 1064 нм, длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе 300 мкДж, частота следования импульсов 500 Гц. Излучение лазера с помощью оптического волокна доставлялось в оптико-акустический преобразователь, схема преобразователя показана на рис. 2б. Оптико-акустический источник (ОАИ) представляет собой плоскопараллельную пластину из черного пластика. Такой источник обеспечивает полосу частот зондирующего сигнала от 1 до 12—15 МГц. Прозрачная призма находится в акустическом контакте с ОАИ и одновременно является звукопроводом широкополосного пьезоэлектрического приемника. Рабочая полоса частот используемого пьезоприемника с зарядовым предусилителем

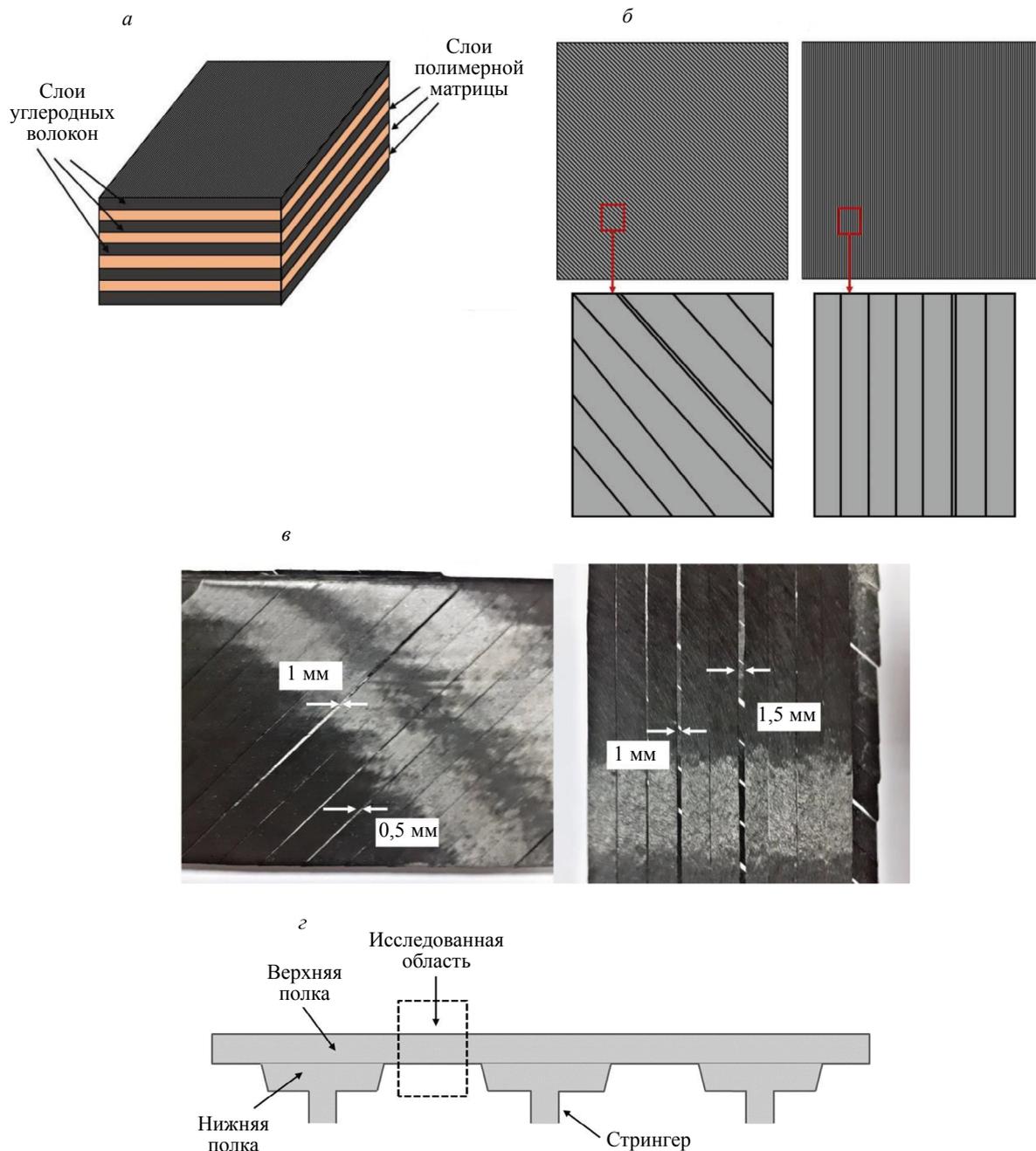


Рис. 1. Схема структуры углепластика (а), схематичное изображение зазоров в слоях углеродной ткани (б), фото зазоров (в) и схема исследованной стрингерной панели (г).

составляла 0,5—25 МГц. При поглощении лазерного излучения в ОАИ происходит неоднородный нестационарный нагрев его приповерхностного слоя. Последующее тепловое расширение этого слоя приводит к возникновению в нем механического напряжения, формирующего два импульса продольных акустических волн на границе раздела между призмой и ОАИ. Один из них сразу проходит через призму на приемник (зондирующий сигнал показан на рис. 2 цифрой 8), другой проходит через слой ОА-источника и частично отражается на границах раздела источник—вода и вода—образец из-за рассогласования величин их акустических импедансов (показан цифрой 9). Оставшаяся часть этого импульса проходит через толщину исследуемого образца, отражается от его тыльной стороны и регистрируется пьезоприемником с временной задержкой относительно импульсов 1 и 2, зависящей от скорости звука и толщины образца (показан цифрой 10).

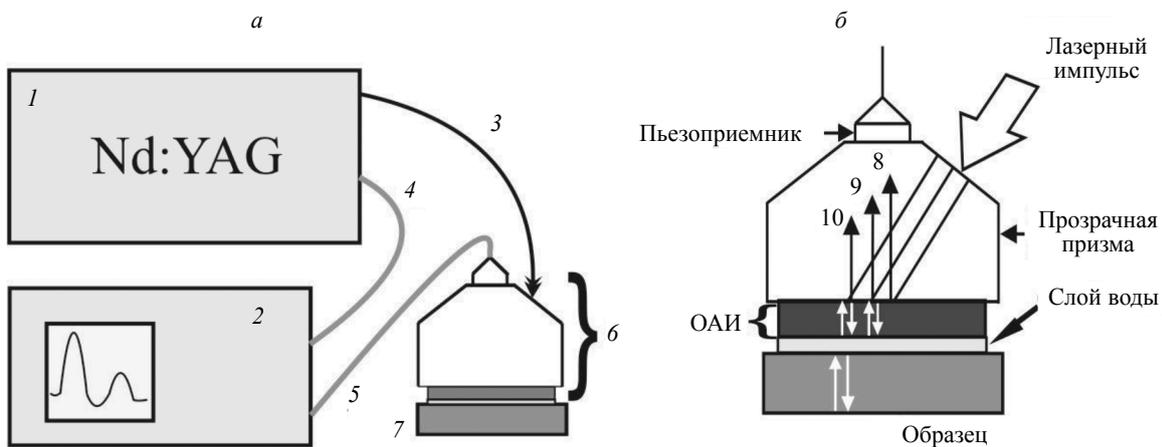


Рис. 2. Схема экспериментальной установки (а): 1 — Nd:YAG-лазер; 2 — осциллограф; 3 — оптоволоконный кабель; 4, 5 — соединительные кабели для передачи сигнала с пьезоприемника и синхронизации; 6 — опико-акустический преобразователь; 7 — образец. Опико-акустический преобразователь в увеличенном масштабе (б) (пояснение нумерации сигналов приведено в тексте).

На рис 3 а, б приведены временная форма и амплитудный спектр зондирующего акустического импульса, а на рис. 3в — временной трек сигнала, регистрируемого пьезоприемником при прохождении зондирующего импульса через исследуемый слоистый композит. Цифра 1 на рис. 3в соответствует зондирующему импульсу, возбуждаемому в ОА-источнике (что соответствует импульсу, обозначенному номером 8 на рис. 2). Под номером 2 показана суперпозиция импульсов, отраженных от границ раздела ОАИ—вода и вода—композит, наблюдаемая форма этих импульсов вызвана тем, что из-за шероховатости поверхности композитного образца и некоторой неравномерности

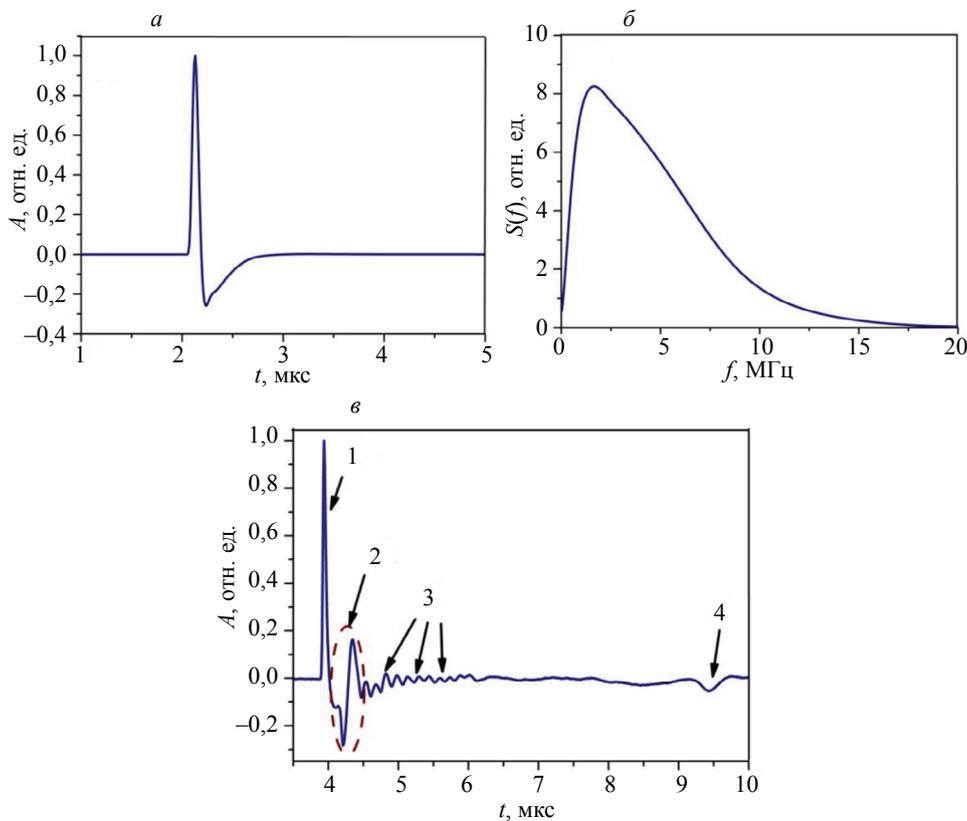


Рис. 3. Временная форма (а) и амплитудный спектр зондирующего акустического импульса (б), полный трек зарегистрированного сигнала для углепластика (в).

его толщины слой воды между образцом и ОАИ не будет идеально равномерным и тонким. Так как величина акустического импеданса воды меньше импеданса источника, то импульс от границы источник—вода будет приходить в противофазе относительно зондирующего. Импеданс образца, напротив, больше импеданса воды, и импульс от границы вода—образец приходит уже в фазе с зондирующим. Далее цифрой 3 обозначена совокупность импульсов, отраженных от периодически чередующихся слоев полимерной матрицы и углеродной ткани, также имеющих различные импедансы. Наконец, цифрой 4 показан импульс, отраженный от тыльной поверхности образца и дважды прошедший его толщину. Этот импульс несет информацию о затухании и скорости звука в исследуемом образце.

Динамический диапазон системы регистрации составлял около 50—60 дБ, максимальная низкочастотная чувствительность для данной установки составляет около 3 В/бар. Сигналы с пьезоприемника передавались на цифровой двухканальный запоминающий осциллограф Tektronix с аналоговой полосой частот 200 МГц и максимальной чувствительностью 2 мВ/дел. Далее расчет спектров сигналов проводился на персональном компьютере. Максимальное соотношение сигнал-шум регистрируемых электрических сигналов составляло порядка 2000.

Спектр ультразвукового импульса $S(f)$, дважды прошедшего через объект известной толщины h при используемой косвенной схеме измерений (при которой излучатель и приемник находятся с одной и той же стороны от исследуемого объекта, аналогично ультразвуковому эхометоду), будет определяться следующим образом [22]:

$$S(f) = S_0(f)T_1T_2\exp[-\alpha(f)2H] = S_0(f)T_{\text{trans}}\exp[-\alpha(f)2H], \quad (1)$$

где $S_0(f)$ — амплитудный спектр зондирующего сигнала; $\alpha(f)$ — коэффициент затухания ультразвука; $T_1 = 2Z_s/(Z_s+Z_{\text{liq}})$ — амплитудный коэффициент прохождения волны из ОА-источника в слой иммерсионной жидкости (воды); $T_2 = 2Z_{\text{liq}}/(Z_{\text{liq}}+Z_c)$ — коэффициент прохождения из воды в образец; Z_s , Z_{liq} и Z_c — значения акустических импедансов ОА-источника, воды и композита. Из (1) можно вычислить коэффициент затухания продольных акустических волн в материале:

$$\alpha(f) = \frac{1}{2H} \ln \frac{S_0(f)}{S(f)} + \frac{1}{2H} \ln T_{\text{trans}}. \quad (2)$$

Локальность тестирования материала в поперечном направлении (в плоскости укладки углеродных волокон) составляла 1,5—2 мм и определялась диаметром ультразвукового зондирующего пучка, который, в свою очередь, определялся диаметром лазерного пучка, попадающего на поверхность ОАИ. При этом локальность будет такой при условии, что толщина образца меньше, чем дифракционная длина для акустической волны в образце. Для исследованных углепластиков величина дифракционной длины составляет около 15—16 мм, что больше, чем толщина исследованного участка конструкции. Поэтому можно считать, что локальность сохраняется в пределах 1,5—2 мм по всей толщине исследованного участка. При увеличении толщины материала свыше 15 мм локальность измерения коэффициента затухания будет ухудшаться из-за дифракционной расходимости ультразвукового пучка.

Временной профиль регистрируемого акустического сигнала представляет собой свертку функции импульсного отклика материала образца на опорный (зондирующий) сигнал и импульсной переходной характеристики лазерно-ультразвукового преобразователя, которая представляет собой временной профиль опорного акустического сигнала, возбуждаемого при поглощении лазерного импульса в ОАИ и зарегистрированного пьезоприемником. Этот профиль определяется временной зависимостью интенсивности поглощенного лазерного импульса, коэффициентом поглощения света в материале ОАИ, затуханием и дифракцией ультразвука в призме-звукопроводе и ограниченностью рабочей полосы частот пьезоприемника. Чтобы учесть это влияние, необходимо произвести обратную операцию — т. н. «деконволюцию» регистрируемого сигнала с импульсной переходной характеристикой лазерно-ультразвукового преобразователя. Эта операция производится в спектральном представлении и сводится к делению комплексных спектров регистрируемого сигнала и импульсной переходной характеристики лазерно-ультразвукового преобразователя и обратному преобразованию Фурье от результата деления.

Спектры ультразвуковых импульсов рассчитывались с использованием стандартного программного пакета быстрого преобразования Фурье с учетом амплитудных коэффициентов отражения акустической волны на каждой границе раздела в оптико-акустической ячейке (см. (1)). Также для спектров всех импульсов применялась процедура численного расчета компенсации частотно-зависимого дифракционного искажения широкополосных ультразвуковых импульсов [23, 24].

Если при проведении измерений исследуемый углепластиковый образец располагается так, что зондирующий акустический импульс будет распространяться перпендикулярно слоям углеродной ткани (направлению выкладки лент углеродных волокон), то можно считать, что импульс распространяется в плоскости изотропии материала. В такой конфигурации исследуемый образец можно считать одномерной периодической структурой, и в спектре ультразвукового импульса, прошедшего через углепластик, должны существовать полосы прозрачности и непрозрачности. При этом период слоев композита, а также соотношение акустических импедансов углеродной ткани и полимерной матрицы будут определять частоту, соответствующую центру полосы непрозрачности.

Отметим, что влияние на затухание ультразвука в углепластиках также может оказывать и пористость материала [16]. Однако в данной панели пористость составляла менее 0,1 %, что подтверждается результатами рентгеновской томографии. Поэтому ее влияние на затухание можно не учитывать.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Частотные зависимости коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн были получены в частотном диапазоне от 1 до 11 МГц. Для $f < 1$ МГц коэффициент затухания не определялся из-за его малости и достаточно большой погрешности, возникающей из-за дифракции низкочастотных составляющих сигнала в материале. Для $f > 11$ МГц амплитуда прошедшего импульса достаточно мала и сравнима с уровнем шума (вследствие сильного затухания высоких частот в углепластике), поэтому на частотах выше 11 МГц коэффициент затухания также не определялся. Точность измерения коэффициента затухания акустических волн определяется погрешностью измерения толщины исследуемого образца, а также соотношением сигнал—шум для спектральной амплитуды каждой гармоники сигнала (около 8—10 %).

Данный экспериментальный диапазон позволяет выявить частоты, характеризующие периодичность материала. Примеры нормированных амплитудных спектров зарегистрированных сигналов $S(f)$ для четырех участков (по два участка с дефектом и без дефекта) конструкции приведены на рис. 4. Видно, что в области 7—9 МГц характер этих зависимостей для участков с наличием и отсутствием зазоров будет отличаться, и поведение частотной зависимости коэффициента затухания $\alpha(f)$ в этом диапазоне также будет различным.

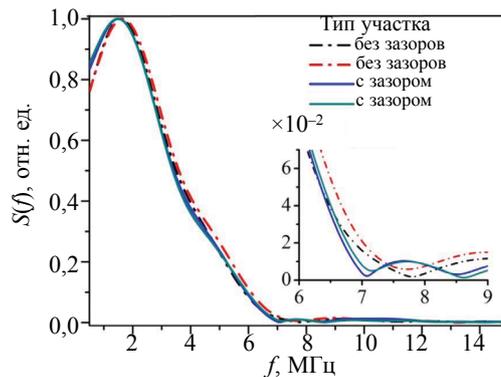


Рис. 4. Примеры амплитудных спектров сигналов для участков панели с наличием и отсутствием нарушения укладки слоев.

Рассмотрим экспериментально полученные с использованием формулы (2) зависимости $\alpha(f)$ для десяти различных участков стрингерной панели. На рис. 5а приведены $\alpha(f)$ для пяти выбранных участков без зазоров (обозначим их № 1—5). Видно, что для бездефектной области наблюдается одиночный резонансный пик затухания. Возрастание $\alpha(f)$ на частотах f_{res} соответствует так называемому «толщинному» резонансу затухания, вызванному периодичностью структуры углепластика. Значение f_{res} и максимума α_{max} зависит от пространственного периода слоистой структуры и соотношения величин акустических импедансов чередующихся слоев. Отметим, в случае очень близких импедансов слоев и высокой адгезии выраженного максимума может и не наблюдаться. Для бездефектной области величина $f_{\text{res}} \approx 8$ МГц при скорости звука на данной частоте $C = 3015 \pm 10$ м/с и при известном периоде слоев $h_0 \approx 190$ мкм дают соотношение $h_0 = C/2f_{\text{res}}$. Это означа-

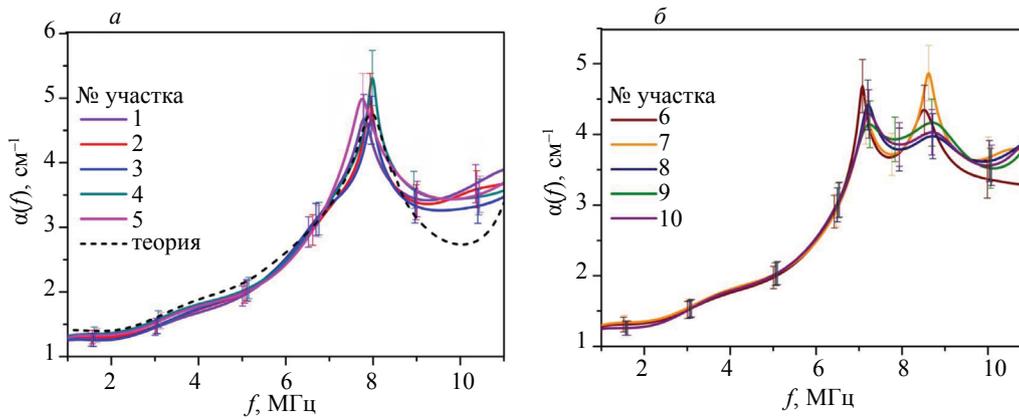


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента затухания ультразвука в углепластиковой панели: бездефектные участки (а), участки с зазорами (б).

ет, что на частоте f_{res} длина волны ультразвука будет соответствовать удвоенному периоду слоев углепластика, что может быть использовано для измерения периода слоев h_0 по измеренным C и f_{res} . Отметим, что для беспористых углепластиков дисперсия скорости ультразвука в исследуемом частотном диапазоне несущественна.

Теоретическая зависимость коэффициента затухания от частоты может быть получена моделированием распространения продольных акустических волн в многослойной периодической структуре с использованием широко известного метода передаточных матриц (см. напр., [15, 25, 26]). В этом методе используется связь комплексных амплитуд волн в соседних слоях периодической структуры через матрицу, элементы которой определяются акустическими импедансами слоев структуры (произведение плотности слоя на скорость звука в нем) и их толщинами. Рассматривалась среда из чередующихся слоев углеродных волокон и полимерной матрицы, при этом считаем, что для каждого слоя имеется как падающая, так и отраженная волна (частичное отражение происходит в каждом слое). Для связи комплексных амплитуд падающей и отраженной волны до и после прохождения N слоев будет справедливо соотношение:

$$\begin{pmatrix} P_0^+ \\ P_0^- \end{pmatrix} = \hat{A} \times \begin{pmatrix} P_N^+ \\ P_N^- \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Здесь P_0^+ и P_0^- — падающая и отраженная волна на поверхности материала (при падении на первый слой); P_N^+ и P_N^- — падающая и отраженная волны для N -го (последнего) слоя структуры. Матрица \hat{A} соответствует произведению матриц перехода для всех пар соседних слоев: $\hat{A} = \hat{A}_{0,1} \times \hat{A}_{1,2} \times \dots \times \hat{A}_{N-2,N-1} \times \hat{A}_{N-1,N}$, при этом для любой пары слоев:

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} \frac{z_n + z_{n-1}}{2z_n} e^{-ik_n l_n} & \frac{z_n - z_{n-1}}{2z_n} e^{ik_n l_n} \\ \frac{z_n - z_{n-1}}{2z_n} e^{-ik_n l_n} & \frac{z_n + z_{n-1}}{2z_n} e^{ik_n l_n} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где z_n — акустический импеданс (произведение плотности слоя на скорость звука в нем); k_n — волновое число; l_n — толщина (все параметры для n -го слоя). Используя такой подход, можно рассчитать коэффициент затухания волны в слоистом материале. Рассчитанная таким способом зависимость $\alpha(f)$ также приведена на рис. 5а.

На рис. 5б приведены экспериментальные зависимости $\alpha(f)$ для пяти выбранных участков панели, содержащих зазоры (№ 6—10). Видно, что в таких участках резонансный пик содержит два локальных максимума (на частотах $f_1 \approx 7,2$ и $f_2 \approx 8,8$ МГц) и один локальный минимум (на частоте $f \approx 8$ МГц). Таким образом, вследствие локального нарушения периодичности структуры углепластика действительно возникает локальный минимум внутри резонансного пика затухания $\alpha(f)$. Следовательно, характер частотной зависимости коэффициента затухания продольных акустических

волн в диапазоне 7—9 МГц несет информацию о наличии или отсутствии заполненных связующим зазоров в слоях углеродной ткани углепластика.

С целью построения ультразвуковых изображений структуры панели было проведено ее автоматизированное сканирование ОА-преобразователем. При этом можно получить изображения как в плоскости укладки слоев углеродных волокон, так и в перпендикулярной ей плоскости. Изображения формируются путем сбора треков сигналов в каждом исследованном участке композита (т.н. А-сканы, рис. 3в). Рис. 6а соответствует плоскости, перпендикулярной слоям углеродной ткани. Первая (верхняя) светлая полоса на этом рисунке представляет собой зондирующий сигнал, возбуждающийся в приповерхностном слое оптико-акустического источника (показано стрелкой). Так как акустический импеданс воды меньше акустического импеданса источника, то отражение от слоя воды происходит в противофазе (следующая темная полоса). Далее светлой линией представлена поверхность образца (так как импеданс верхнего слоя — углеродной ткани — больше импеданса воды). Под поверхностью материала видно чередование слоев углеродной ткани (более светлые полосы) и слоев матрицы (темные полосы). Цвет изображения будет соответствовать амплитуде сигнала в данной точке, при этом амплитуды могут иметь как положительное, так и отрицательное значение. В градациях серого белый цвет соответствует максимальному положительному значению амплитуды (амплитуды зондирующего сигнала на рис. 3в), а черный цвет — максимальному отрицательному (отражение от слоя воды), промежуточные амплитуды имеют серый оттенок, шкала амплитуд в относительных единицах также приведена на рис. 6а.

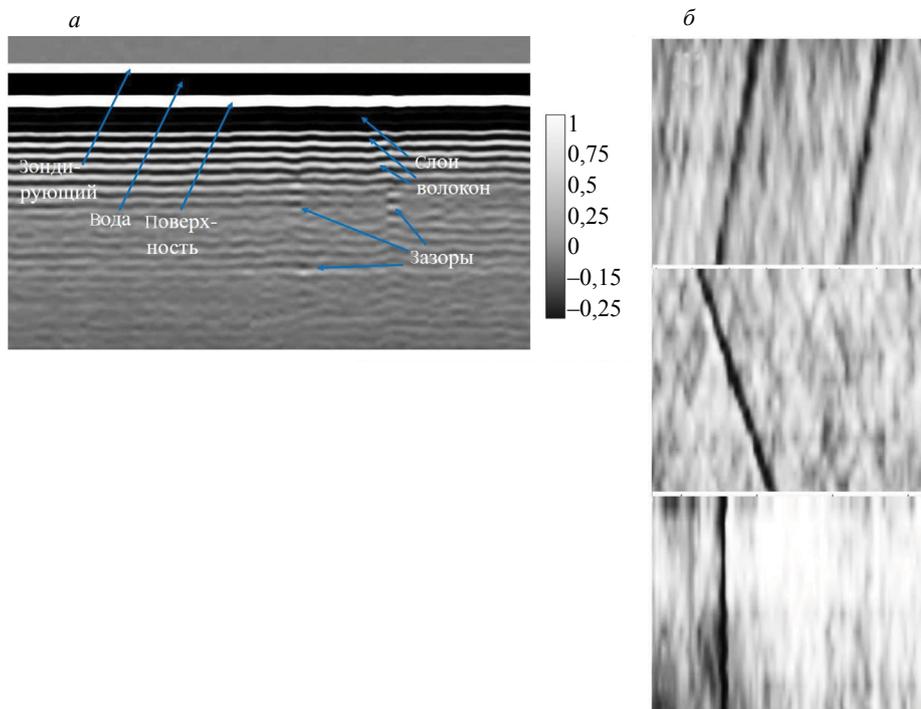


Рис. 6. Ультразвуковые изображения структуры углепластиковой панели (шкала соответствует амплитуде сигнала в относительных единицах) (а) и зазоров в слоях углеродной ткани (б).

На рис. 6б приведены три примера ультразвуковых изображений структуры углепластиковой панели в плоскости слоев углеродной ткани (для участков с нарушением структуры). Размер приведенных участков панели составлял около 8×6 см. Здесь наблюдаются темные полосы, направление которых совпадает с направлением укладки наполнителя в данном слое композита (0 и 45°), которые и представляют собой искомые зазоры между лентами углеродной ткани (зазоры заполняются эпоксидной смолой, чей акустический импеданс ниже, чем импеданс волокна). Переход темной полосы в более светлую на некоторых изображениях связан с небольшой неравномерностью толщины слоя. Путем такого сканирования было выявлено полное соответствие между участками, в которых происходит изменение структуры резонансного пика коэффициента затухания, и участками, в которых наличие зазоров было выявлено по полученному ультразвуковому изображению.

Таким образом, характер $\alpha(f)$ в исследуемом участке композитной панели действительно несет информацию о наличии или отсутствии нарушений укладки лент в слоях углеродной ткани.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе продемонстрирована возможность обнаружения нарушений структуры углепластика — зазоров в слоях углеродной ткани. Для этой цели использована методика широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником зондирующих ультразвуковых импульсов. Получены частотные зависимости коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн в диапазоне 1—11 МГц для нескольких участков исследуемой углепластиковой стрингерной панели. Показано, что в бездефектной области наблюдается резонансный максимум, частота которого зависит от периода слоев композита. Также показано совпадение экспериментальной частотной зависимости коэффициента затухания в бездефектном участке конструкции с расчетом, выполненным методом передаточных матриц. Продемонстрировано, что в данной панели существуют области, в которых резонансный максимум коэффициента затухания ультразвука имеет внутри себя локальный минимум, вызванный дефектом структуры материала. Получены ультразвуковые изображения зазоров между лентами волокон в слоях углеродной ткани и выявлено совпадение их расположения с областями, в которых наблюдается локальный минимум внутри резонансного максимума затухания. Предложенный метод может быть использован в промышленности как для контроля тестовых образцов углепластиков с целью усовершенствования условий и методик производства, так и для исследования особенностей структуры готовых композитных конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зорин В.А. Опыт применения композиционных материалов в изделиях авиационной и ракетно-космической техники (обзор) // Конструкции из композиционных материалов. 2011. № 4. С. 44—59.
2. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Григорьева Л.Н. Трансмиссионные валы из углепластика. Материалы и технологии (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 8 (90). С. 46—53.
3. Ser'eznov A.N., Stepanova L.N., Laznenko A.S., Kabanov S.I., Kozhemyakin V.L., Chernova V.V. Static Tests of Wing Box of Composite Aircraft Wing Using Acoustic Emission and Strain Gaging // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 8. P. 611—619. [Серезнов А.Н., Степанова Л.Н., Лазненко А.С., Кабанов С.И., Кожмякин В.Л., Чернова В.В. Статические испытания кессона композиционного крыла самолета с использованием акустической эмиссии и тензометрии // Дефектоскопия. 2020. № 8. С. 12—21.]
4. Бойчук А.С., Диков И.А., Чертищев В.Ю., Генералов А.С. Определение пористости монолитных зон деталей и агрегатов самолета, изготавливаемых из пкм, с применением ультразвукового эхоимпульсного метода // Дефектоскопия. 2019. № 1. С. 3—9.
5. Тарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно-армированные композиционные материалы. Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.
6. Kachanov V.K., Sokolov I.V., Karavaev M.A., Kontsov R.V. Selecting Optimum Parameters of Ultrasonic Noncontact Shadow Method for Testing Products Made of Polymer Composite Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 10. P. 831—842. [Качанов В.К., Соколов И.В., Каравеев М.А., Концов Р.В. Выбор оптимальных параметров ультразвукового теневого бесконтактного способа контроля изделий из полимерных композитных материалов // Дефектоскопия. 2020. № 10. С. 60—70.]
7. Sokolovskaya Yu.G., Podymova N.B., Karabutov A.A. Quantitative Evaluation of Porosity in Unidirectional CFRPs Using Laser Ultrasonic Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 3. P. 201—208. [Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Количественная оценка пористости однонаправленных углепластиков с использованием лазерно-ультразвукового метода // Дефектоскопия. 2020. № 3. С. 14—22.]
8. Chulkov A.O., Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Bedarev A.M., Yarkimbaev Sh., Shagdyrov B.I. Synthesizing Data of Active Infrared Thermography under Optical and Ultrasonic Stimulation of Products Made of Complex-Shaped CFRP // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 7. P. 595—602. [Чулков А.О., Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Бедарев А.М., Яркимбаев Ш., Шагдыров Б.И. Синтез данных активной инфракрасной термографии при оптической и ультразвуковой стимуляции изделий из углепластика сложной формы // Дефектоскопия. 2020. № 7. С. 54—60.]
9. Lukaszewicz D. H.-J.A., Carwyn W., Potter K. D. The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future // Composites: Part B. 2012. V. 43. P. 997—1009.
10. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Влияние зазоров и нахлестов при выкладке препрегов на механические свойства углепластиков (обзор) // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ». 2018. № 12 (72). С. 71—78.

11. Croft K., Lessard L., Pasini D.a, Hojjati M., Chen J., Yousefpour A. Experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates // *Comp. Part A*. 2011. V. 42. P. 484—491.
12. Cartié D., Lan M., Davies P., Baley C. Influence of embedded gap and overlap fiber placement defects on interlaminar properties of high performance composites // *Materials*. 2021. V. 14. 5332.
13. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // *Контроль. Диагностика*. 2007. № 4. С. 23—32.
14. Li X., Hallett S. R., Wisnom M. R. Modelling the effect of gaps and overlaps in automated fibre placement (AFP) manufactured laminates // *Science and Engineering of Composite Materials*. 2015. V. 22. No. 2. P. 115—129.
15. Zhang V. Y., Lefebvre J.E., Gryba T. Resonant transmission in stop bands of acoustic waves in periodic structures // *Ultrasonics*. 2006. V. 44. P. 899—904.
16. Карабутов А.А., Подымова Н.Б., Беляев И.О. Исследование влияния пористости на затухание ультразвука в углепластиковых композитах методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии // *Акуст. журн*. 2013. Т. 59. № 6. С. 714—721.
17. James R., Woodley S.M., Dyer C.M., Humphrey V.F. Sonic bands, bandgaps, and defect states in layered structures — theory and experiment // *J. Acoust. Soc. Am*. 1995. V. 97. No. 4. P. 2041—2047.
18. Scott W.R., Gordon P.F. Ultrasonic spectrum analysis for nondestructive testing of layered composite materials // *J. Acoust. Soc. Am*. 1995. V. 62. No. 1. P. 108—116.
19. Diez A., Kakarantzas G., Birks T.A., Russell P.St. J. Acoustic stop-bands in periodically microtapered optical fibers // *Appl. Phys. Lett*. 2000. V. 76. P. 3481—3483.
20. Карабутов А.А., Кожушко В.В., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б. Исследование оптико-акустическим методом прохождения широкополосных ультразвуковых сигналов через периодические одномерные структуры // *Акуст. Журн*. 2000. Т. 46. № 4. С. 509—514.
21. Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Исследование частотных зависимостей фазовой скорости продольных акустических волн в пористых углепластиках с использованием широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником ультразвука // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. Т. 85. № 1. С. 127—133.
22. Fitting D.W., Adler L. *Ultrasonic spectral analysis for nondestructive evaluation*. New York: Plenum Press, 1981. 354 p.
23. Гусев В.Э., Карабутов А.А. *Лазерная оптоакустика*. М.: Наука, 1991. 304 с.
24. Karabutov A.A., Savateeva E.V., Podymova N.B., Oraevsky A.A. Backward mode detection of laser-induced wide-band ultrasonic transients with optoacoustic transducer // *Journal of Applied Physics*. 2003. V. 87. No. 4. P. 2003—2014.
25. Бреховских Л.М., Годин О.А. *Акустика слоистых сред*. М.: Наука, 1989. 416 с.
26. Карабутов А.А. (мл.), Косевич Ю.А., Сапожников О.А. Осцилляции Блоха акустического поля в слоистой структуре // *Акуст. журн*. 2013. Т. 59. № 2. С. 158—169.

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРУТКОВ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ С УЧЕТОМ ПРОЦЕНТА АРМИРОВАНИЯ

© 2022 г. В.А. Стрижак^{1,*}

¹ИжГТУ имени М.Т. Калашикова,
Россия 426069 Удмуртская Республика, Ижевск, ул. Студенческая, 7
E-mail: *str@istu.ru

Поступила в редакцию 26.08.2022; после доработки 06.09.2022
Принята к публикации 09.09.2022

Необходимость в эффективных и производительных технических средствах контроля композитных материалов, выпускаемых в виде протяженных элементов (труба, прутки и т.д.), требует адаптации волноводной методики контроля к особенностям композитных материалов. Волноводная методика позволяет производить оценку качества стержня без сканирования и использует установку датчика на торец объекта контроля. Отстройка от влияния акустического контакта на получаемый результат реализуется использованием параметра, определяемого как отношение эхосигнала от неоднородности к амплитуде сигнала, отраженного от противоположного торца. Существенное влияние на результаты оказывает процент армирования композитного материала. Для композитной арматуры — это стекловолокно. Предложена модель, учитывающая влияние процента армирования стержня на результаты контроля стержневыми волнами. На основании модели рассчитаны коэффициенты и номограммы, позволяющие учесть процент армирования стержня и длину дефекта при принятии решения о его существенности. Представлен результат оценки значимости дефектов, выявленных в 5 партиях прутков разных производителей. Показаны дефекты, являющиеся значительными и малозначительными для свойств стержня композитной арматуры.

Ключевые слова: композитная арматура, акустический волноводный метод, искусственный отражатель.

DOI: 10.31857/S0130308222100049, **EDN:** BTDEBK

ВВЕДЕНИЕ

Одной из современных тенденций развития техники и технологии является замещение изделий из металла композитными материалами на основе полимерной матрицы с армирующим волокном [1—3]. Как правило, такие материалы легче, а иногда и прочнее металлических изделий. Данная тенденция, прежде всего, коснулась авиационной техники и ракетостроения. Композитные материалы в строительстве представлены, в том числе, арматурой, изготовленной по ГОСТ 31938—2012 (Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия). Экономическая целесообразность применения композитной арматуры определяется ее химической стойкостью, низкой теплопроводностью и существенно более низкой массой по сравнению с металлической арматурой [4, 5]. Химическая стойкость и низкая теплопроводность позволяет сокращать толщину защитной бетонной рубашки при проектировании зданий и сооружений, а низкая масса позволяет при выборе средства доставки существенно сократить транспортные расходы за счет перехода от ограничения по массе к ограничению по объему. Рекомендуемые области эффективного использования композитной арматуры — элементы фундаментов и нулевых этажей, не требующих высокой пожаростойкости. Особенно перспективным является применение композитной арматуры при проектировании сооружений, непосредственно контактирующих с водой, особенно при строительстве морских сооружений [6].

Внедрению композитных материалов в строительстве препятствует отсутствие квалифицированного, конкурентного рынка композитной арматуры, гарантирующего ее качество [7—9]. Выход на рынок новых производителей композитной арматуры не требует существенных капиталовложений, и новое производство может быть открыто в любом подсобном помещении. Крупных заказчиков отпугивает отсутствие на рынке высокопроизводительных и эффективных технических средств контроля композитной арматуры, что создает условия для манипулирования качеством продукции. Современный рынок композитной арматуры ориентирован, прежде всего, на частное домостроение и не дает существенных предпочтений ответственным производителям.

Используемые методы контроля арматуры композитной полимерной (АКП), определяемые ГОСТ 32482—2013, реализуются в виде лабораторных исследований выборочных образцов разрушающими методами [10, 11]. Данный подход может позволить сертифицировать производство, но не гарантирует отсутствие дефектов в готовых изделиях. В соответствии с ГОСТ Р 56787—2015 (Композиты полимерные. Неразрушающий контроль), методы контроля ориентированы на объек-

ты плоской или объемной формы с гладкой поверхностью. Неразрушающий контроль при поиске дефектов в стержнях, особенно со сложной поверхностью (ребристость, навивка, песчаное покрытие и т.д.), не позволяет добиться высокой чувствительности, и, как правило, такие решения отличаются низкой производительностью при высокой цене автоматических систем [12—21].

Композитную арматуру можно отнести к длинномерным объектам, у которых длина превышает диаметр более чем в 100 раз. Для данного типа объектов хорошо зарекомендовал себя акустический волноводный метод контроля, реализуемый через прозвучивание прутка низкочастотными эхоимпульсами. Методика позволяет осуществить контроль, при котором акустический пьезоэлектрический преобразователь, установленный на торец прутка, генерирует в теле композитной арматуры стержневую волну с последующей регистрацией эхо-импульса от противоположного торца и эхосигналов от дефектов. При этом реализуется высокая контролепригодность исследуемого образца, где без использования сканирования обеспечивается одинаковая чувствительность к дефектам, расположенным на разной глубине от поверхности прутка. Для метода характерно незначительное затухание акустических импульсов при низкой дисперсии скорости и высокая чувствительность к величине изменения акустического импеданса: к отклонениям сечения, нарушениям сплошности [23, 24].

Внедрение акустического волноводного метода для поиска дефектов в композитной арматуре требует разработки набора аппаратных и методологических средств обеспечения измерений. Существующие на рынке дефектоскопы (например, семейство АДНШ), использующие акустическую волноводную методику, ориентированы на контроль металлопроката. Дефектоскоп использует электромагнитный (ЭМА) излучатель и приемник на пьезоэлементе. Материал композитной арматуры не позволяет использовать ЭМА-излучатель, но адаптация приемника для работы в совмещенном режиме достаточно проста [25, 26].

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПОДХОДЫ

Для оценки работоспособности дефектоскопа и его настройки при контроле металлопроката используется настроечный образец с дефектом в виде сегментного паза длиной 30 мм и глубиной 0,4 мм [27, 28]. Это соответствует классическим методам создания искусственных отражателей для акустического контроля в виде полости, при этом, производится механическое удаление части материала, что соответствует разнообразным дефектам (раковина, загрязнение, включение, пористость и т.д.). Композитный материал в отличие от металлопродукции не является однородным и существенно меняет свои свойства в зависимости от направления армирующих волокон. Композитная арматура изготавливается в виде силового стержня, состоящего из армирующих волокон, расположенных в нем соосно, что и приводит к существенной анизотропии свойств. В качестве связующего материала между армирующими нитями используется наполнитель из синтетических смол (например, эпоксидная смола). При вырезании искусственного отражателя в теле АПК механические свойства участка в зоне искусственного отражателя будут существенно зависеть от количества разрушенных армирующих волокон, что требует высокой повторяемости при нанесении искусственного отражателя. Другая особенность композитной арматуры в том, что при ее изготовлении на силовой стержень равномерно по поверхности и под углом к его продольной оси наносится навивка из нити армирующего волокна в виде двойной нити или одиночной нити, что существенно усложняет форму поверхности и нанесение на нее искусственного отражателя. Основной классификационной характеристикой композитной арматуры является номинальный диаметр d (диаметр равновеликого по объему гладкого, круглого стержня).

Типичным производственным дефектом композитной арматуры является наплыв, возникающий на месте ремонта при обрыве нити армирующего волокна [29, 30]. В зоне дефекта наблюдаются значительные поры и нарушения сечения стержня. Таким образом, изготовление искусственного отражателя на композитной арматуре методом удаления части материала вызывает существенные затруднения, но существует возможность нанесения искусственного отражателя в виде наплыва. При этом использование наполнителя из эпоксидной смолы гарантирует хорошую адгезию к материалу композитной арматуры, не нарушает внутренней структуры силового стержня и в силу высокой пластичности заполняет все особенности внешней поверхности стержня.

Цель работы — на основании акустических свойств модели искусственного отражателя разработать рекомендации по учету процента армирования стержня при контроле композитной арматуры волноводным методом, опробовать данный подход на образцах композитной арматуры с разным процентом армирования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

В силу особенностей периодического (анкерочного) профиля арматуры площадь сечения по всей длине стержня можно принять как постоянную величину и при моделировании прутков представить в виде круглого гладкого стержня с номинальным диаметром d . В качестве искусственного отражателя рассматривается прямоугольный наплыв высотой h и длиной L (рис. 1а). Искусственный отражатель дополняет круглый профиль стержня до прямоугольного и при высоте $h = 0$ мм демонстрирует наличие незначительного избыточного сечения.

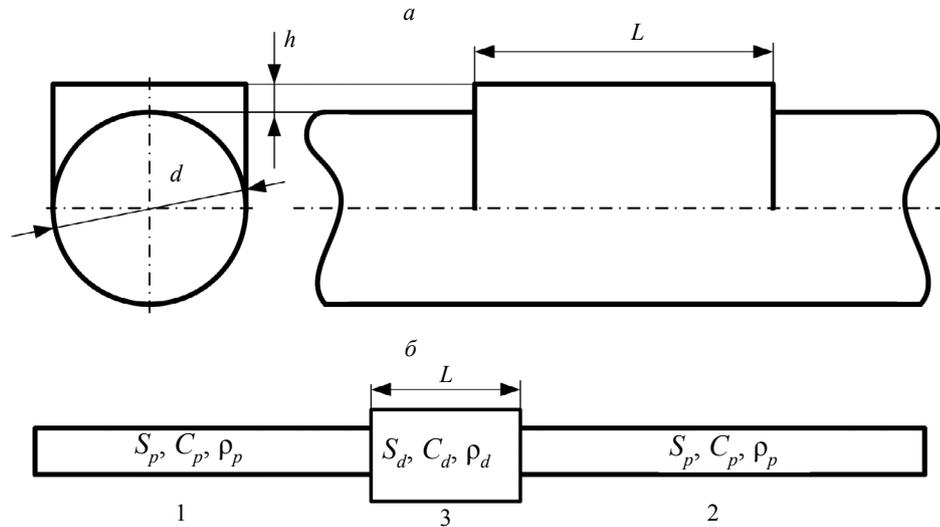


Рис. 1. Геометрическая модель искусственного отражателя (а) и его акустическая модель (б): d — номинальный диаметр; h — высота отражателя; L — длина отражателя.

Акустический импеданс участка в зоне с искусственным отражателем отличается от акустического импеданса стержня, что приводит к возникновению отражения акустических импульсов. Акустический импеданс определяется площадью сечения S , плотностью ρ и скоростью акустической волны C_s . Искусственный отражатель, изготовленный из эпоксидной смолы, имеет свойства, существенно отличающиеся от свойств армированного материала АКП, что существенно сказывается на коэффициенте прозрачности R и коэффициенте отражения D . Свойства основных компонентов, входящих в композицию материала стержня и искусственного отражателя, приведены в табл. 1. Характеристики материала стержня определяются степенью его армирования A_p , который, в свою очередь, задается массовой долей стекла в стержне, выраженной в процентах [31—33].

Таблица 1

Свойства основных компонентов, входящих в композицию материала стержня и искусственного отражателя

Тип материала	Армирование A_p , %	Плотность ρ , 10^3 кг/м ³	Модуль упругости E , ГПа	Скорость стержневой волны C_s , м/с
Стекло	100	2,5	80	5657
Эпоксидная смола в отверженном состоянии	0	1,2	5	2041
АКП стеклокомпозит	88	2,18	55	5059
АКП стеклокомпозит	76	1,98	46	4820

Модель участка с искусственным отражателем (см. рис. 1б) является коаксиальной и не учитывает особенность искусственного отражателя, реализованного в виде наплыва только с одной сто-

роны стержня. Модель содержит зоны 1 и 2 с одинаковыми свойствами материала прутка (площадь сечения S_p , скорость стержневой волны C_p , плотность ρ_p). Участок 3 (искусственный отражатель) длиной L имеет свойства, отличные от свойств исходного материала стержня (площадь сечения S_d , скорость стержневой волны C_d , плотность ρ_d).

В зоне 1 и 2 плотность ρ_p можно оценить через процент армирования и плотности входящих компонентов: плотности стекла ρ_s и эпоксидной смолы в отверженном состоянии ρ_n . Степень отверждения при этом не учитывается:

$$\rho_p = \frac{\rho_s \cdot \rho_n}{A(\rho_n - \rho_s) + \rho_s}. \quad (1)$$

Для оценки скорости стержневой волны C_p в зависимости от процента армирования можно принять, что $C_p = \sqrt{\frac{E_p}{\rho_p}}$, где E_p — модуль упругости прутка; ρ_p — плотность прутка. Учитывая, что при одинаковом относительном удлинении происходит перераспределение усилия между элементами армирования и наполнителем в соответствии с процентом армирования A_p , модуль упругости прутка E_p выражается через модули упругости стекла E_s и наполнителя E_n :

$$E_p = \frac{E_s \cdot S_s + E_n \cdot (S_p - S_s)}{S_p}. \quad (2)$$

Таким образом, скорость стержневой волны в прутке C_p определяется процентом армирования A_p , модулями упругости стекла E_s , наполнителя E_n и площадью сечения прутка:

$$C_p = \sqrt{\frac{E_s \cdot S_s + E_n \cdot (S_p - S_s)}{S_p} \cdot \frac{A_p(\rho_n - \rho_s) + \rho_s}{\rho_s \cdot \rho_n}}, \quad (3)$$

где S_s — площадь в сечении прутка, занятая стеклом:

$$S_s = \frac{S_p}{\rho_s - \rho_n} \left(\frac{\rho_s \cdot \rho_n}{A_p(\rho_n - \rho_s) + \rho_s} - \rho_n \right). \quad (4)$$

Интегральные характеристики материала в зоне искусственного отражателя рассчитывается аналогично, но массовая доля стекловолокна будет уменьшаться с увеличением высоты искусственного отражателя, так как он состоит только из материала наполнителя:

$$\rho_d = \frac{S_p \cdot \left(\frac{\rho_s \cdot \rho_n}{A_p(\rho_n - \rho_s) + \rho_s} \right) + S_d \cdot \rho_n}{S_d}; \quad (5)$$

$$C_d = \sqrt{\frac{E_p \cdot S_p + E_n \cdot S_d}{S_d \cdot \rho_d}}, \quad (6)$$

где ρ_d — плотность участка; S_d — площадь сечения; C_d — скорость стержневой волны в зоне искусственного отражателя.

Рис. 2 демонстрирует линейную зависимость скорости стержневой волны от процента армирования как для прутка без искусственного отражателя C_p , так и в зоне с искусственным отражателем C_d . При этом увеличение высоты искусственного отражателя приводит к незначительному уменьшению наклона зависимости $C_p(A)$.

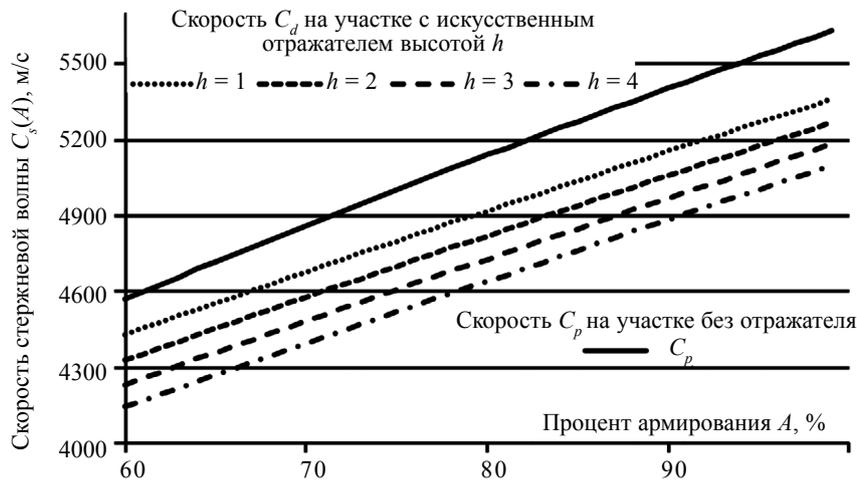


Рис. 2. Скорость стержневой волны в прутке без искусственного отражателя C_p и в зоне с искусственным отражателем C_d при разных высотах дефекта h .

Используемый подход не рассматривает вопросы, связанные с акустическими особенностями волновода, в том числе с дисперсией скорости, не учитывает влияние диаметра прутка на скорость стержневой волны, наличие пор, частичное отвердевание наполнителя, не рассматривает другие особенности, возникающие в сложных композитных системах.

В качестве результирующего параметра Kd (далее «параметр Kd ») выступает отношение амплитуды эхосигнала от искусственного отражателя $Ud(f)$ к амплитуде сигнала, отраженного от торца $Ut(f)$, выраженное в процентах:

$$Kd = \frac{\max(|Ud(t)|)}{\max(|Ut(t)|)} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Сигнал, отраженный от торца $Ut(f)$, определяется коэффициентом прозрачности $D(f)$, причем сигнал дважды проходит через зону с искусственным отражателем. Сигнал, отраженный от искусственного отражателя $Ud(f)$, определяется коэффициентом отражения $R(f)$.

Расчет основывается на свойствах коэффициента отражения и коэффициента прозрачности, полученных из общего решения по известной методике [34], построенной на учете явлений прохождения акустического импульса через участок с тонкой пленкой. Выражения для коэффициентов отражения $R(f)$ и прозрачности $D(f)$ учитывают отличие свойств стержня от участка с искусственным отражателем:

$$R(f) = \frac{(Z_d^2 - Z_p^2) \cdot \sin(2\pi f / C_d \cdot L)}{2 \cdot Z_p \cdot Z_d \cdot i \cdot \cos(2\pi f / C_d \cdot L) - (Z_p^2 + Z_d^2) \cdot \sin(2\pi f / C_d \cdot L)}; \quad (8)$$

$$D(f) = \frac{2 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_d^2 + Z_p^2) \cdot \cos(2\pi f / C_d \cdot L) - 2 \cdot Z_d \cdot Z_p \cdot i \cdot \sin(2\pi f / C_d \cdot L)}, \quad (9)$$

где Z_p — импеданс стержня на участке без искусственного отражателя; Z_d — импеданс участка с искусственным отражателем; f — частота; C_d — скорость стержневой волны в зоне искусственного отражателя; L — длина искусственного отражателя. При этом $Z_p = \rho_p \cdot S_p \cdot C_p$, где ρ_p — плотность прутка; S_p — площадь сечения прутка; C_p — скорость стержневой волны прутка, а $Z_d = \rho_d \cdot S_d \cdot C_d$, где ρ_d — плотность; S_d — площадь сечения; C_d — скорость стержневой волны в зоне искусственного отражателя.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Коэффициенты отражения $R(f)$ и прозрачности $D(f)$ являются частотно-зависимыми (рис. 3) и их поведение для разных частот f обусловлено соотношением скорости стержневой волны в зоне дефекта C_d и длины искусственного отражателя L . Графики получены для прутка диаметром $d = 8$ мм, высотой дефекта $h = 2$ мм и длиной дефекта $L = 30$ мм.

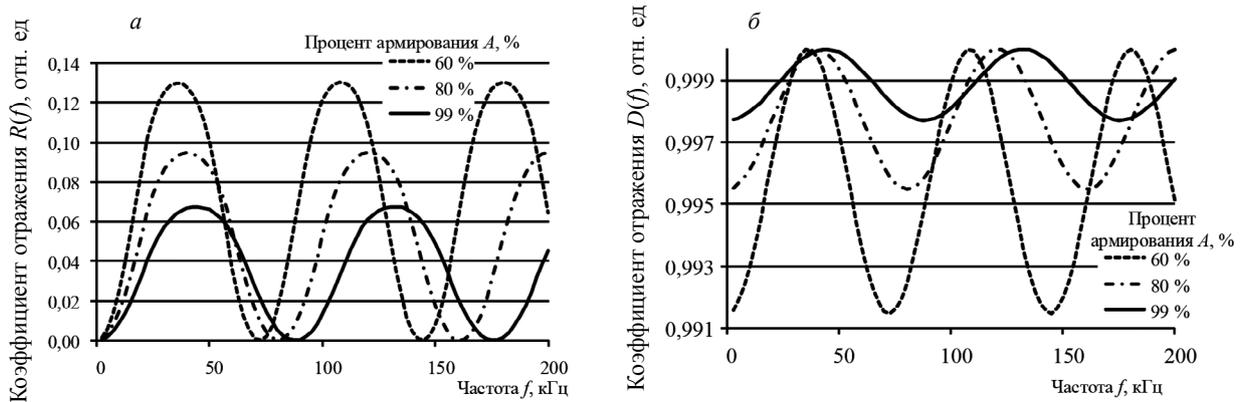


Рис. 3. Коэффициенты отражения $R(f)$ и прозрачности $D(f)$ участка с искусственным отражателем при разных процентах армирования (диаметр прутка $d = 8$ мм, высота отражателя $h = 2$ мм, длина отражателя $L = 30$ мм).

Процент армирования A_p определяет плотность материала и, с одной стороны, влияет на амплитуду коэффициентов отражения $R(f)$ и прозрачности $D(f)$, а, с другой стороны, в силу изменения скорости стержневой волны в зоне дефекта C_d изменяет частотные свойства участка с искусственным отражателем. Так как искусственный отражатель изготовлен из материала наполнителя и имеет более низкую плотность по сравнению с материалом стержня, то стержню с большим процентом армирования A_p соответствует меньший коэффициент отражения $R(f)$ и больший коэффициент прозрачности $D(f)$. Аналогично, при фиксированных размерах искусственного отражателя увеличение процента армирования стержня A_p приводит к уменьшению коэффициента отражения и увеличению частоты резонанса участка с искусственным отражателем.

Последовательность расчета включает в себя получение спектрального образа зондирующего импульса, учет его спектрального искажения при прохождении (отражении) участка с искусственным отражателем и восстановление сигнала из полученного спектра. Коэффициент отражения от противоположного торца стержня принят за 1. Расчет не учитывает затухание акустических импульсов в прутке длиной до 10 м в силу их незначительности при низкочастотном прозвучивании [35]. Расчет адаптирован к свойствам усилительного тракта дефектоскопа протяженных объектов АДНШ-П в виде ограничения полосы пропускания на уровне -6 дБ в полосе частот 9—64 кГц с центральной частотой в 25 кГц [23].

Расчетные графики (рис. 4, рис. 5) иллюстрируют поведение параметра Kd при различной высоте искусственного отражателя h , процента армирования A_p и диаметра стержня d в зависимости от длины искусственного отражателя L . Параметр Kd определяется как геометрическими размерами искусственного отражателя: высота h и длина L , так и процентом армирования стержня A_p . Существенную роль имеет отношение исходной плотности ρ_p прутка и усредненной плотности ρ_d в зоне отражателя. В зависимости от длины искусственного отражателя L параметр Kd имеет схожее поведение. Например, при фиксированном проценте армирования стержня $A_p = 80\%$ (см. рис. 4а), с увеличением длины отражателя L параметр Kd сначала растет и по достижении своего максимума (длина отражателя $L \sim 41$ мм) падает в 2,5 раза (длина отражателя $L \sim 82$ мм), затем увеличивается на 20% и стабилизируется. Стабилизация значения параметра Kd наступает в виду разделения на временной оси сигналов от вступления и окончания искусственного отражателя. Положение максимума, в первую очередь, определяется соотношением длины искусственного отражателя L и длины волны $\lambda/4 = 48$ мм. Сдвиг максимума к меньшим длинам отражателя

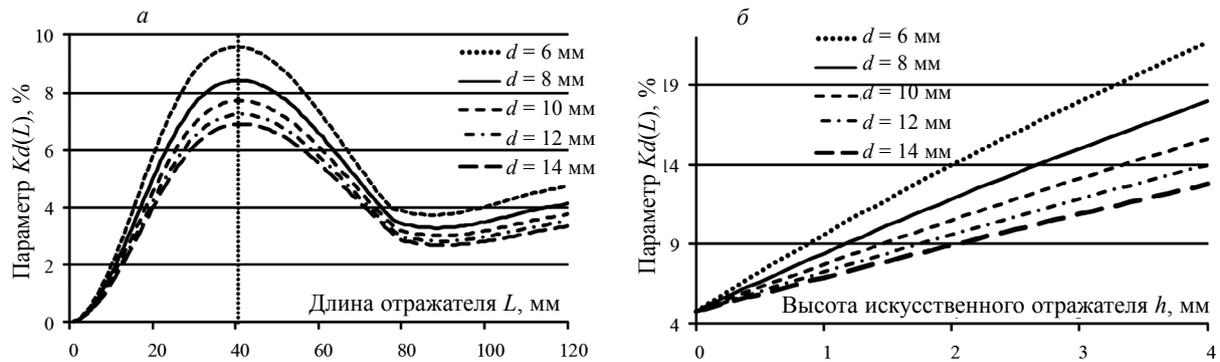


Рис. 4. Параметр Kd в зависимости от длины искусственного отражателя L и высоты искусственного отражателя h при разных диаметрах прутка d и фиксированном проценте армирования $A_p = 80\%$:
 а — высота искусственного отражателя $h = 1$ мм; б — длина искусственного отражателя $L = 41$ мм.

(смещение в более высокочастотную область) определяется учетом в параметре Kd амплитуды сигнала, отраженного от противоположного торца прутка, дважды прошедшего через зону с отражателем.

Рис. 4а демонстрирует, что при фиксированном значении процента армирования $A_p = 80\%$ у прутков разных диаметров d параметр Kd в основном определяется соотношением площадей поперечного сечения в зоне с искусственным отражателем и вне нее. Поскольку, в силу особенности модели, изменение высоты h линейно связано с изменением площади сечения искусственного отражателя, то параметр Kd (рис. 4б) у прутков разного диаметра растет с разным наклоном. У прутков с меньшим диаметром d при увеличении высоты h рост параметра $Kd(L)$ происходит более интенсивно. Расчет параметра $Kd_d(L)$ для прутка диаметром d возможен через соответствующее значение параметра $Kd_8(L)$, полученного для прутка диаметром $d = 8$ мм с привязкой к диаметру прутка d :

$$Kd_d(L) = \frac{8}{d} (Kd_8(L) - Kd_8^{h=0}(L)) + Kd_8^{h=0}(L), \quad (10)$$

где $Kd_d(L)$ — расчетный параметр для прутка диаметром d ; $Kd_8(L)$ — значение параметра для прутка диаметром $d = 8$ мм; $Kd_8^{h=0}(L)$ — значение параметра для прутка диаметром $d = 8$ мм при высоте отражателя $h = 0$.

Для прутков разных диаметров, при фиксированном значении процента армирования и одинаковой высоте искусственного отражателя h , изменения плотности в зоне искусственного отражателя не оказывает существенного влияния на изменение параметра Kd . Отклонение расчетного значения параметра $Kd_d(L)$ по формуле (10) от значения параметра $Kd_d(L)$ в соответствии с моделью, приведенное к значению высоты отражателя h в мм, не выходит за пределы значения 0,01.

Уменьшение процента армирования A_p при фиксированной высоте отражателя h (рис. 5а) или увеличение высоты отражателя h при фиксированном проценте армирования A_p (рис. 5б) не только

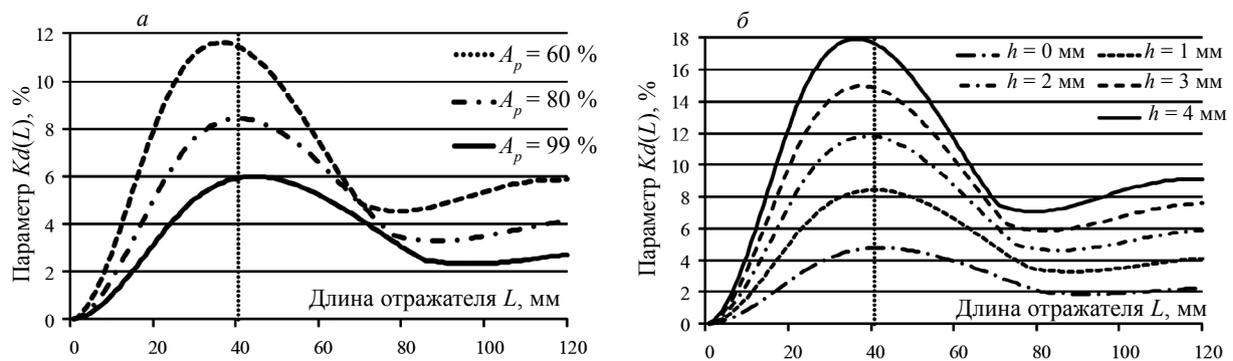


Рис. 5. Параметр Kd в зависимости от длины искусственного отражателя L для прутка диаметром $d = 8$ мм:
 а — процент армирования $A_p = 60$ —99 %, высота искусственного отражателя $h = 1$ мм; б — процент армирования $A_p = 80\%$, высота искусственного отражателя $h = 1$ —4 мм.

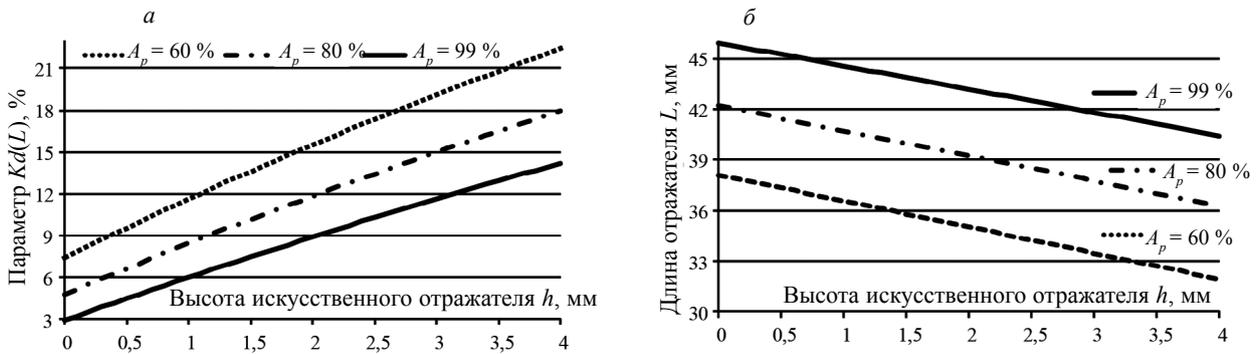


Рис. 6. Максимум параметра Kd и соответствующая ему длина L в зависимости от высоты h для прутка диаметром $d = 8$ мм при проценте армирования $A_p = 60$ — 99 %:

a — значение максимума параметра Kd ; b — длина L , соответствующая значению максимума параметра Kd .

увеличивает значение параметра Kd , но и приводит к смещению его максимума в сторону меньшего значения длины искусственного отражателя L по сравнению с позицией $A_p = 80$ % и $h = 1$ мм (вертикальная пунктирная линия). В первую очередь, данное изменение определяется изменением плотности стержня при изменении процента армирования или изменением плотности в зоне искусственного отражателя при увеличении его высоты и, как следствие, уменьшением скорости стержневой волны.

Для прогнозирования величины параметра $Kd(h)$ при вариации процента армирования стержня A_p приведены расчеты значения максимума параметра $Kd(h)$ и соответствующие ему длины L для различных высот h (рис. 6). Изменение процента армирования стержня A_p с 99 до 60% у искусственного отражателя высотой $h = 1$ мм приводит к росту параметра $Kd(h)$ в 1,94 раза, а у дефекта высотой $h = 3$ мм — к росту параметра $Kd(h)$ в 1,54 раза. При аналогичных величинах процента армирования стержня A_p длины, соответствующие максимуму параметра $Kd(h)$, при высоте искусственного отражателя $h = 1$ мм составляют 44,6 и 36,6 мм, а при высоте $h = 3$ мм — 41,8 и 33,6 мм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании предложенной методики разработана номограмма (рис.7), позволяющая соотнести между собой прутки с разным процентом армирования A_p при разных высотах искусственного отражателя h . Линии номограммы соединяют точки максимумов параметра Kd одного уровня при различных значениях процента армирования и высотах искусственного отражателя. Напри-

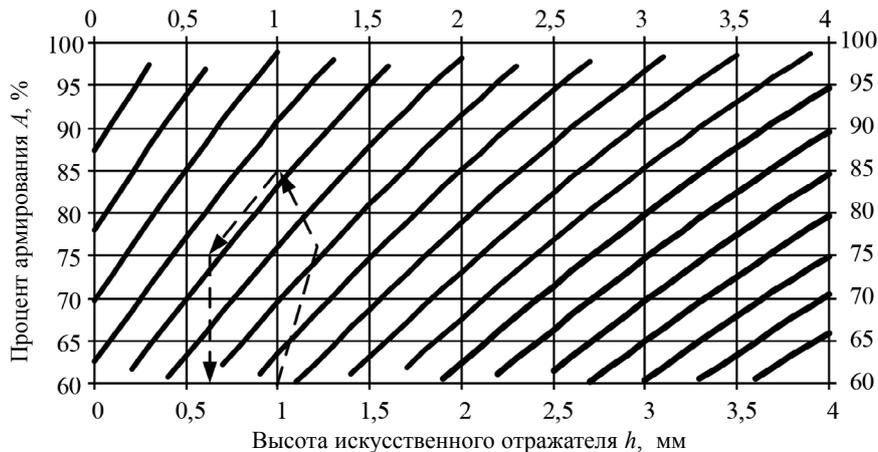


Рис. 7. Номограмма для прутка диаметром $d = 8$ мм значений одного уровня максимумов параметра Kd в зависимости от высоты h искусственного отражателя и процента армирования стержня A_p .

мер, настроенный образец [36], изготовленный для калибровки дефектоскопа, реализующего контроль композитной арматуры волноводным методом с нанесенным искусственным отражателем высотой 1 мм на стержне с процентом армирования $A_p = 85\%$ по значению параметра Kd соответствует образцу с процентом армирования стержня $A_p = 75\%$ и с искусственным отражателем высотой 0,65 мм. Пунктирная линия показывает нахождение уровня параметра Kd при известном значении армирования и поиск значения высоты искусственного отражателя при другом уровне процента армирования.

По результатам расчета влияния размера наплыва и процента армирования стержня на значение параметра Kd рассчитаны поправочные коэффициенты, позволяющие при оценке существенности дефектов учесть процент армирования материала стержня:

$$Kd^M = Kd^i(-0,018(A_p - 80) + 1,013); \tag{11}$$

$$L^M = L^i(-0,005(A_p - 80) + 1,004), \tag{12}$$

где Kd^M — значение параметра Kd с учетом отличия процента армирования A_p от 80 %; Kd^i — измеренное значение параметра Kd ; L^M — значение длины дефекта с учетом отличия процента армирования A_p от 80 %; L^i — измеренное значение длины дефекта.

При изготовлении композитной арматуры дефекты образуются в виду заполнения связующим материалом неудаленных узлов нитей в зоне их обрыва или окончания. Петля армирующей нити, находящаяся на поверхности стержня, не приводит к ухудшению качества стержня и может быть, при необходимости, удалена режущим инструментом. Существенным дефектом является пузырь, заполненный связующим или воздухом и внедренный в тело арматуры. Таким образом, заключение о дефектности необходимо основывать на величине параметра Kd и измерении габаритов обнаруженных дефектов. При изготовлении композитной арматуры типовые дефекты не превышают 30 мм по длине. Применительно к искусственному отражателю, в области длин до 30 мм, величина параметра Kd для одной высоты h различается многократно.

На графике (рис. 8) нанесены величины параметра Kd , рассчитанные для прутка диаметром $d = 8$, с процентом армирования стержня $A_p = 80\%$, при разных высотах искусственного отражателя. Точками обозначены значения параметра Kd^M для дефектов, обнаруженных по волноводной методике контроля, в 5 партиях 4-х производителей с общим объемом более тысячи образцов, с длиной более 6 метров каждый [37]. Значение параметра Kd^M и его длина дефекта L^M для разных партий скорректирована в соответствии с процентом армирования стержня в партии. Измерение геометрических размеров дефектных участков позволяет оценить значимость дефекта. Уровень $Kd(L)$, соответствующий искусственному отражателю с заданной высотой, может рассматриваться как уровень браковки. В этом случае дефекты с одинаковым параметром Kd , но разные по протяженности, будут классифицированы по-разному.

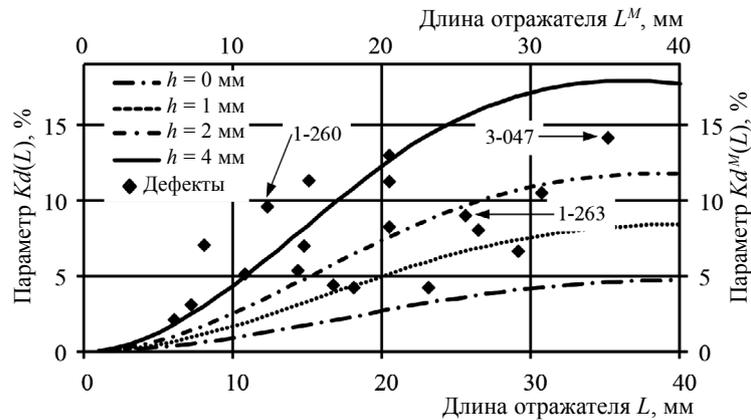


Рис. 8. Параметр Kd дефектов и прутка диаметром $d = 8$ мм, процент армирования стержня $A_p = 80\%$ при разных высотах искусственного отражателя h в зависимости от длины L .

В табл. 2 приведена краткая характеристика и внешний вид некоторых дефектных участков. В качестве браковочного уровня выбран критерий, соответствующий расчетному значению искус-

Характеристики и вид обнаруженных дефектов

Образец	Значение параметра $Kd^M, \%$	Длина $L^M, \text{мм}$	Внешний вид дефекта	Годен или брак / (Заключение)
Армирование, %				
1-260	9,86	12		Брак / (Недостаток связующего в стержне)
76,4 %				
1-263	8,49	20		Годен / (Наплыв может быть удален)
76,4%				
3-047	14,3	35		Годен / (Наплыв не влияет на качество стержня)
79,9 %				

ственного отражателя высотой $h = 3$ мм. Образец 1-260 при небольшой протяженности дефекта имеет существенный сигнал и при визуальном осмотре демонстрирует пористость тела в зоне дефекта. Образец 1-263 на поверхности стержня имеет узел, заполненный связующим, что не влияет на качество тела прутка. У образца 3-047 протяженное утолщение по телу не уменьшает качество стержня и при отсутствии специальных требований к поверхности он может быть использован.

ВЫВОДЫ

Разработанная акустическая модель прозвучивания стержня с искусственным отражателем в виде наплыва учитывает отличия материалов используемых при изготовлении композитного стержня и при создании наплыва. Модель построена на учете коэффициента прозрачности и коэффициента отражения в районе неоднородности с учетом резонансных явлений, возникающих при прозвучивании низкочастотным импульсом с торца прутка. С ростом высоты наплыва в зоне дефекта изменяется массовая доля армирующего стекловолокна, и, как следствие, средние значения акустического импеданса в этой области зависят не только от высоты искусственного отражателя, но и от процента армирования исходного материала стержня. Модель учитывает изменение скорости стержневой волны, интегральную плотность в зоне наплыва в зависимости от диаметра стержня, процента его армирования, высоту и длину наплыва. Результатом расчета является параметр Kd в виде отношения сигнала, отраженного от неоднородности, к сигналу, отраженному от противоположного торца объекта контроля.

Модель показывает, что при фиксированном проценте армирования и одинаковой высоте искусственного отражателя изменение диаметра стержня не влияет на параметр Kd , который в основном определяется высотой и длиной отражателя.

Увеличение процента армирования или увеличение высоты отражателя приводит к увеличению параметра Kd и смещению максимума зависимости параметра $Kd(L)$ к меньшим значениям длины L искусственного отражателя.

На основании модели рассчитана номограмма, позволяющая соотнести настроечные образцы с искусственным отражателем в виде наплыва, выполненные на стержнях с разным процентом армирования.

Предложено при заключении о значительности дефектов, обнаруженных волноводным методом, учитывать визуальную длину дефекта, а значение параметра Kd и длину дефекта L адаптировать к величине армирования стержня в 80 %. Применение данного подхода позволило отделить дефекты, имеющие влияние на стержень композитной арматуры, от малозначительных особенностей, не приводящих к понижению эксплуатационных свойств стержня.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотов М.Ю., Будадин О.Н., Козельская С.О., Овчинников И.Г., Шелемба И.С. Внешнее армирование композитными материалами и оптический мониторинг надежности эксплуатации строительных сооружений (Обзор) // Конструкции из композиционных материалов. 2022. № 1 (165). С. 57—67. DOI: 10.52190/2073-2562_2022_1_57. EDN NZVWQQ.
2. Бегунова Н.В., Грахов В.П., Возмищев В.Н., Кислякова Ю.Г. Сравнительная оценка результатов испытаний бетонных балок с композитной арматурой и расчетных данных // Наука и техника. 2019. Т. 18. № 2. С. 155—163. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-2-155-163. EDN ZBFCNL.
3. Францев М.Э. Исследование надстройки из композитов пассажирского судна на подводных крыльях акустическими методами неразрушающего контроля // В мире неразрушающего контроля. 2016. Т. 19. № 4. С. 13—17.
4. Soliman Ehab S. M. M., El-Sayed Tamer A., Naga Soheir A. R. A new approach to design a composite material for light mono leaf spring using fea // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2016. Т. 19. № 1. С. 8—13. DOI: 10.22213/2413-1172-2016-1-8-13
5. Степанова В.Ф., Ильин Д.А., Бучкин А.В. Гибридная композитная арматура с повышенным модулем упругости // Естественные и технические науки. 2014. № 9—10 (77). С. 435—437.
6. Николенко П.В., Шкуратник В.Л., Чепур М.Д. Акустико-эмиссионные эффекты при растяжении композитов и их использование для контроля состояния кровли горных выработок // Горный журнал. 2019. № 1. С. 13—16.
7. Усачев А.М., Хорохордин А.М., Данилова А.В. Анализ перспектив развития рынка стальной и композитной арматуры // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2016. № 2 (13). С. 122—126. EDN YGBSMX.
8. Гладунова О.И., Лысенко А.А. Мировой и российский рынок полимерных композиционных материалов. Тенденции и перспективы // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2021. № 2. С. 96—100. DOI: 10.46418/2079-8199_2021_2_15. EDN DEXUZI.
9. Долгих М.В., Федосова О.Г., Дергач И.А., Ондар А.А. Преимущества и недостатки применения композитной арматуры // Инновации и инвестиции. 2019. № 10. С. 298—300. EDN NZESFR.
10. Грахов В.П., Саидова З.С. Методика определения степени отверждения арматуры композитной полимерной // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т. 15. № 1. С. 96—98. DOI: 10.22213/2410-9304-2017-1-96-98. EDN YIOUBR.
11. Степанова Л.Н., Рамазанов И.С., Чернова В.В. Акустико-эмиссионный контроль процесса разрушения образцов из углепластика, изготовленных методом вакуумного формования // Конструкции из композиционных материалов. 2019. № 3 (155). С. 64—69. EDN GGFGBC.
12. Смелков С.Л. Способы контроля армированных композитов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 4. С. 49—52.
13. Трифонова С.И., Генералов А.С., Далин М.А. Современные технологии и средства теневого ультразвукового контроля полимерных композиционных материалов // Технология машиностроения. 2017. № 7. С. 37—43.
14. Gholizadeh S. A review of non-destructive testing methods of composite materials / Proc. XV Portuguese Conference on Fracture, PCF 2016, 10—12 February 2016, Paço de Arcos, Portugal. V. 1.
15. Мурашов В.В. Исследование и совершенствование акустических низкочастотных методов контроля изделий из слоистых пластиков и многослойных клееных конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 4 (53). С. 87—93.
16. Саидова З., Грахов В.П., Яковлев Г., Гордина А., Захаров А. Thermal analysis of glass-fiber reinforced polymer rebars // Engineering Structures and Technologies. 2017. V. 9. No 3. P. 142—147. EDN ZMLLZZ.
17. Shpil'noi V.Yu. , Vavilov V.P. , Derusova D.A., Druzhinin N.V., Yamanovskaya A.Yu. Specific Features of Nondestructive Testing of Polymer and Composite Materials Using Air-Coupled Ultrasonic Excitation and Laser Vibrometry // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 8. P. 647—655. [Шпильной В.Ю., Вавилов В.П., Дерусова Д.А., Дружинин Н.В., Ямановская А.Ю. Особенности проведения неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов с использованием бесконтактной ультразвуковой стимуляции и лазерного вибросканирования // Дефектоскопия. 2021. № 8. С. 14—23. DOI: 10.31857/S0130308221080029. EDN TLCADA.]
18. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С., Смотров С.А., Иванов В.И. Контроль образцов из полимерных композиционных материалов с использованием ультразвуковых антенных решеток // Дефектоскопия. 2022. № 6. С. 3—16. DOI: 10.31857/S013030822206001X. EDN BMGAYP.

19. Качанов В.К., Соколов И.В., Первушин В.В., Тимофеев Д.В. Структуроскопия изделий из полимерных материалов с помощью анализа мгновенного спектра ультразвуковых сигналов // Дефектоскопия. 2019. № 6. С. 3—10. DOI: 10.1134/S0130308219060010. EDN VSJDCV.
20. Derusova D.A., Vavilov V.P., Shpil'noi V.Y., Nekhoroshev V.O., Druzhinin N.V. Features Of Laser-Vibrometric Nondestructive Testing of Polymer Composite Materials Using Air-Coupled Ultrasonic Transducers // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 12. P. 1060—1071. [Дерусова Д.А., Вавилов В.П., Нехорошев В.О., Шпильной В.Ю., Дружинин Н.В. Особенности лазерно-виброметрического неразрушающего контроля полимерных композиционных материалов с использованием воздушно-связанных ультразвуковых преобразователей // Дефектоскопия. 2021. № 12. С. 26—38. DOI: 10.31857/S0130308221120034. EDN AGHGZZ.]
21. Смотрова С.А., Смотров А.В., Иванов В.И. Сравнение выявляемости малозаметных ударных повреждений по результатам выполнения ультразвукового неразрушающего контроля и оптической профилометрии поверхности образцов полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2021. № 4 (164). С. 43—50. DOI: 10.52190/2073-2562_2021_4_43. EDN SHMKEJ.
22. Муравьева О.В., Стрижак В.А., Злобин Д.В., Мурашов С.А., Пряхин А.В., Мышкин Ю.В. Акустический волноводный контроль элементов глубиннонасосного оборудования // Нефтяное хозяйство. 2016. № 9. С. 110—115.
23. Мурашов В.В., Генералов А.С. Контроль многослойных клееных конструкций низкочастотными акустическими методами // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 2 (31). С. 59—67.
24. Евлампиев А.И., Попов Е.Д., Сажин С.Г., Федосенко Ю.К., Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Останин Ю.Я. Неразрушающий контроль / Справочник. В 8 т. Под общ. ред. Клюева В.В. Изд. 2-е, перераб. и испр. М., 2006. 829 с.
25. Muravieva O.V., Khasanov R.R., Strizhak V.A., Mkrtchyan S.S. Water absorption effect on the propagation velocity of normal waves in composite rebars // Materials Science Forum. 2019. V. 970. P. 202—209. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.970.202. EDN IZDGLO.
26. Стрижак В.А., Хасанов Р.Р., Пряхин А.В. Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 159—166. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-159-166. EDN XPTZXX.
27. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Стрижак В.А., Мурашов С.А., Пряхин А.В. Акустический волноводный контроль линейно протяженных объектов: монография. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2017. 234 с. ISBN 978-5-7692-1560-5.
28. Солодов И.Ю., Кройцбрук М. Резонансные дефекты: новый подход к повышению чувствительности методов НК с использованием ультразвуковой стимуляции дефектов // В мире неразрушающего контроля. 2016. Т. 19. № 4. С. 8—12.
29. Добровольский Д.С. Влияние надрезов стержней на коэффициенты интенсивности напряжений кольцевых трещин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2016. Т. 19. № 2. С. 6—8. DOI: 10.22213/2413-1172-2016-2-6-8
30. Ганзий Ю.В. Идентификация опасностей получения некачественной продукции из полимерного композитного материала на примере строительной композитной арматуры // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 3. С. 13—19. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-3-13-19
31. Бучкин А.В., Степанова В.Ф., Стрижак В.А., Юрин Е.Ю., Никушов Е.И. Неразрушающий контроль композитной полимерной арматуры // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2021. № 4 (267). С. 59—66. EDN KCDDDL.
32. Mahmoud M., Zaghoul Y., Karen Steel K., Martin Veidt M., Heitzmann M.T. Wear behaviour of polymeric materials reinforced with man-made fibres: A comprehensive review about fibre volume fraction influence on wear performance // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2021. № 10. P. 215—241.
33. Karakoc A., Bulota M., Hummel M., Sriubaitė S., Hughes M., Sixta H., Paltakari J. Effect of single-fiber properties and fiber volume fraction on the mechanical properties of Ioncell fiber composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2021. No. 3. P. 741—748.
34. Муравьева О.В., Стрижак В.А., Пряхин А.В. Оценка чувствительности метода акустической рефлектометрии к дефектам теплообменных труб // Дефектоскопия. 2017. № 3. С. 27—34.
35. Муравьева О.В., Злобин Д.В. Акустический тракт метода многократных отражений при дефектоскопии линейно протяженных объектов // Дефектоскопия. 2013. № 2. С. 43—51.
36. Стрижак В.А. Искусственный отражатель для настройки дефектоскопа, реализующего акустический волноводный метод контроля композитной арматуры // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 2. С. 5—15. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-5-15. EDN NZFFOP.
37. Стрижак В.А., Пряхин А.В., Хасанов Р.Р., Мкртчян С.С. Дефектоскопия композитной арматуры акустическим волноводным методом // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 1. С. 78—88. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-1-78-88. EDN ZBAFKH.

ОЦЕНКА ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ГАЗОПРОВОДОВ, ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ CO₂-СОДЕРЖАЩУЮ ПРОДУКЦИЮ

© 2022 г. Р.К. Вагапов^{1,*}, К.А. Ибатуллин¹

¹ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Россия 142717 Московская обл., г.о. Ленинский, п. Развилка,
пр-д Проектируемый № 5537, зд. 15, стр. 1
E-mail: *R_Vagapov@vniigaz.gazprom.ru

Поступила в редакцию 18.07.2022; после доработки 31.08.2022
Принята к публикации 02.09.2022

Выполнен визуально-измерительный контроль дефектов язвенного характера на вырезанных из газосборного коллектора патрубках. Это позволило сопоставить и определить точность измерений ранее проведенной на них внутритрубной дефектоскопии газопроводов, которые эксплуатировались в условиях присутствия коррозионно-агрессивного CO₂ в транспортируемом газе. Определено, что присутствие ферромагнитных продуктов коррозии в локальных дефектах негативно влияет на измерение толщины стенки трубы: глубина локального дефекта получается на 20-30 % ниже, чем реальное значение. После удаления продуктов коррозии было установлено, что многие дефекты представляют собой кластеры объединенных друг с другом коррозионных язв.

Ключевые слова: внутритрубная дефектоскопия, коррозионные язвы, продукты коррозии, визуально-измерительный контроль.

DOI: 10.31857/S0130308222100050, EDN: BPIERD

ВВЕДЕНИЕ

Важную роль при обеспечении безопасной и надежной эксплуатации газопроводов играет диагностика их технического состояния. В наибольшей степени диагностические обследования развиты для магистральных трубопроводов, когда коррозионное воздействие носит наружный характер, и для нефтепроводов, эксплуатационные условия которых отличаются от транспорта газа, что влияет на закономерности развития коррозионных дефектов. В гораздо меньшей степени исследованы явления, возникающие при транспортировке коррозионных газов, когда опасность повреждений на газопроводе связана с внутренней коррозией [1, 2].

Основными коррозионно-опасными газами, воздействующими на стальные газопроводы, являются сероводород или диоксид углерода. Их воздействие на сталь носит различный характер. При воздействии сероводорода, помимо утонения стенки трубы, наиболее опасным является наводороживание стали, которое развивается интенсивно [3]. Поэтому данный вид коррозии сложно и нецелесообразно детектировать методами внутритрубной дефектоскопии (ВТД). Для этого используются другие методы коррозионного мониторинга (датчики коррозии и проникновения водорода, имитационные испытания, анализ коррозионных параметров и др.).

Основным опасным проявлением при углекислотной коррозии являются локальные дефекты, которые могут быть обнаружены дефектоскопическими методами контроля [4]. Актуальность исследования результатов ВТД в CO₂-средах объясняется не только промышленной транспортировкой, например на Бованенковском [5, 6], Юбилейном [7], Уренгойском (ачимовские отложения) [8] и других месторождений, но и новыми перспективными объектами, которые эксплуатируют в условиях с повышенным количеством CO₂. К таким объектам можно отнести случаи технологического использования CO₂ [9]: его отделение (для снижения углеродного следа), транспортировка и последующее захоронение в подземных резервуарах [10, 11], использование в подземных хранилищах газа в качестве буферного газа [12] и др.

К сожалению, отчеты ВТД по газопроводам, эксплуатируемым в условиях внутренней коррозии, обычно не анализируются с учетом особенностей протекания коррозионных процессов. Например, углекислотная коррозия протекает с образованием опасных локальных повреждений. На рекомендованных по результатам ВТД к замене участках газопровода после их вырезки редко проводится сопоставление данных по толщине трубы с реальными дефектами. На газовых объектах ВТД проводится обычно на газосборных коллекторах (ГСК) подземного расположения, для оценки коррозионного состояния которых толщинометрия является единственным способом контроля. Учитывая, что ВТД является затратной и редко проводимой процедурой, актуальным и важным является всесторонний анализ полученных данных по остаточной толщине стенки газопроводов и наличию коррозионных поражений.

Таким образом, приведенный в данной статье анализ данных ВТД с последующим визуальным измерительным контролем (ВИК) выделенных локальных дефектов на вырезанных участках газопроводов представляет интерес и дает уникальную возможность провести их сравнение между собой.

МЕТОДИКА

В работе были использованы данные по толщине стенки трубы ГСК из отчетов ВТД (методом рассеяния магнитного потока, MFL). В ходе сопоставления данных ВТД с ВИК были исследованы 3 вырезанных из ГСК патрубка.

На рис. 1 представлен участок трубы ГСК, из которого в рамках шурфования были вырезаны патрубки 1 и 2 (после проведения на нем ВТД).

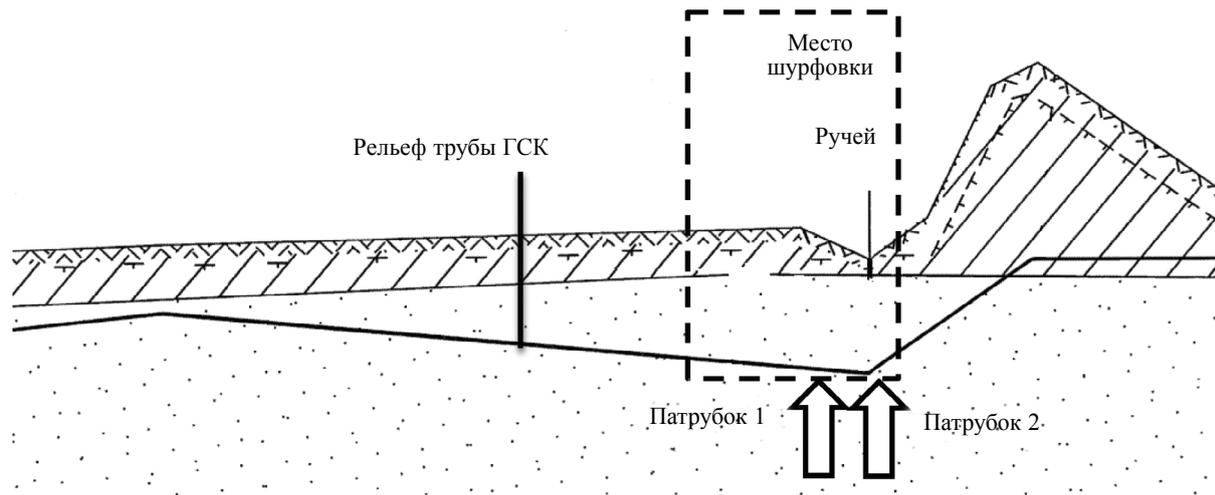


Рис. 1. Профиль ГСК на участке перехода через ручей.

На патрубке 3 не было выявлено глубоких питтингов, но обнаружено воздействие движения потока среды (рис. 2).



Рис. 2. Вид изнутри патрубка 3.

Продукты коррозии с поверхности патрубков удаляли с помощью травильных растворов по ГОСТ 9.907—2007 [13]. Глубину дефектов (после удаления продуктов коррозии) при ВИК измеряли по ГОСТ 9.908—85 [14] механическим индикатором. Скорость локальной коррозии определяли по глубине питтингов по формуле:

$$K = \delta/t, \quad (1)$$

где δ — глубина питтинга, мм; t — время эксплуатации ГСК, из которых были вырезаны патрубки, год.

Анализ состава продуктов коррозии, отобранных с внутренней поверхности патрубка 3, был выполнен методом рентгеновской дифракции [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Получаемые данные по толщине требуют обработки и идентификации. В условиях транспортировки CO_2 -содержащего газа одним из способов контроля локальных дефектов на протяженных газопроводах является ВТД [16—18]. Несмотря на то, что методы обработки результатов ВТД постоянно развиваются, пока не существует оптимальных решений, моделирующих развитие локальных дефектов на внутренней поверхности трубы при воздействии агрессивных сред [19—21].

На рис. 1 примерное положение шурфовки отмечено прямоугольником, а примерное положение вырезок патрубков 1 и 2 — стрелками. Направление потока сред по газопроводу слева направо. Вырезанные патрубки (диаметр ГСК 325 мм) располагались до и после ручья. Патрубок 1 соответствовал концу спуска (≈ 18 м) ГСК, далее — патрубок 2 отличался началом подъема (≈ 2 м) ГСК от точки, расположенной в самой нижней части ГСК (см. рис. 1). При невысоких скоростях потока возможно стекание и сбор в нижней точке жидкой фазы. При постоянном контакте воды со сталью будут создаваться условия для развития локальных дефектов (питтингов, язв и др.).

В табл. 1 приведены характеристики выявленных при ВТД на патрубок 1 коррозионных аномалий. По результатам данных из отчета ВТД нами были выполнены расчеты «потери толщины» и «скорости коррозии». Распределение аномалий по высоте стенки трубопровода (по часам) очень близко к нижней образующей, что позволяет их отнести к так называемой «шестичасовой

Таблица 1

Коррозионные аномалии, которые были отмечены в отчете ВТД и могут присутствовать на патрубок 1 с ГСК

Измеренное при ВТД расстояние, м	Ориентация по диаметру трубы, ч	Длина, мм	Ширина, мм	Макс. глубина, %	Средняя глубина, %	Потери в толщине, мм	Скорость коррозии, мм/год
554,193	6:42	16	24	7	4	0,98	0,107
554,248	5:48	51	65	16	4	2,24	0,244
554,324	5:36	124	52	30	6	4,2	0,458
554,326	6:27	13	24	8	5	1,12	0,122
554,541	5:40	30	27	42	17	5,88	0,642
554,612	5:49	82	36	16	4	2,24	0,244
554,734	6:23	24	24	18	8	2,52	0,275
554,800	5:53	16	24	6	3	0,84	0,091
554,838	7:04	13	24	8	5	1,12	0,122

коррозии». При ВТД была использована проектная толщина стенки трубы ГСК (14 мм). Однако замеры толщины стенки трубы на вырезанных патрубках показали, что она на 10 % больше и в среднем составляла 15,4 мм. Поэтому собственные расчеты по измеренным дефектам были выполнены, исходя из данного уточненного значения.

ВИК патрубка 1 показал (рис. 3) наличие ряда дефектов на внутренней поверхности трубы. Дефект № 1 (см. рис. 3) соответствует наиболее глубоким потерям 5,88 мм (см. табл. 1).

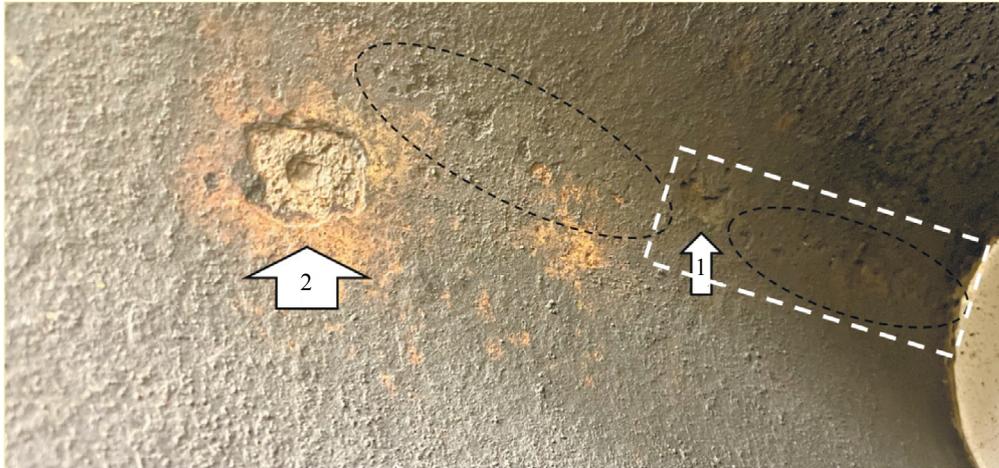


Рис. 3. Расположение видимых коррозионных повреждений в направлении дна патрубка 1 на ГСК: дефект № 1 и кластер дефектов № 2.

Кластер дефектов № 2 (выделен штриховой линией в виде прямоугольника) был исследован более подробно и представлен на рис. 4, где отдельно были рассмотрены два сегмента с коррозионными дефектами, которые были вырезаны для дополнительного исследования.

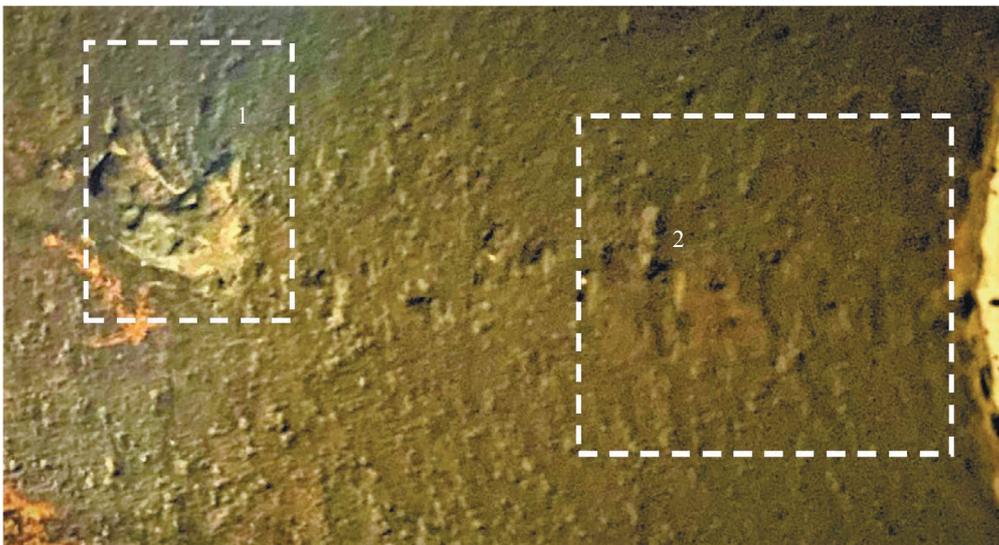


Рис. 4. Расположение вырезанных сегментов № 1 и № 2 с локальными дефектами для дальнейших исследований.

Все коррозионные повреждения были заполнены продуктами коррозии, что затрудняло их оценку. Для их удаления на сегменте № 1 потребовались два этапа травления, чтобы увидеть вид и рельеф дефекта на стальной поверхности (рис. 5). Полное удаление продуктов коррозии потребовало механической очистки от твердых и плотносцепленных с поверхностью отложений с последующим травлением соляной кислотой с ингибитором кислотного травления в течение 20 мин. На сегменте № 1 видно, что он представляет собой объединенное скопление коррозионных



Рис. 5. Внешний вид вырезанного сегмента № 1 на патрубке 1 с коррозионной аномалией: *а* — после первого травления; *б* — после второго травления и полного удаления продуктов.

язв.

Измерение остаточной толщины на сегменте № 1 показало, что минимальное значение в месте дефекта достигает 7,3—7,7 мм. При средней толщине стенки трубы (без коррозионного воздействия) 15,4 мм утонение составляло 47—50 %. А при 14-миллиметровой толщине трубы, как это было принято при ВТД, уменьшение стенки трубы будет достигать 52—55 %, что превышает все замеренные значения (см. табл. 1).

Вероятно, что причинами отличия реальной глубины коррозионного дефекта от измеренной при ВТД являются отложения продуктов коррозии, заполняющие язвы, которые содержат ферромагнитные частицы, вносящие искажения в магнитное поле при диагностических замерах ВТД магнитным методом MFL.

Известно [22], что наличие продуктов коррозии может негативно повлиять на сигнал, получаемый при ВТД исследовании. Это связано с тем, что если среди продуктов коррозии/отложений на внутренней поверхности трубы будут соединения железа, например, оксиды/гидроксиды железа, обладающие магнитными свойствами, то они будут снижать магнитуду сигнала дефектоскопа, использующего магнитный метод. В наибольшей степени данный эффект проявляется для одиночных локальных дефектов (типа коррозионных язв) [23].

На сегменте № 2 патрубка 1 для выявления глубины дефектов также потребовалось механическая очистка продуктов коррозии с последующим травлением в ингибированной соляной кислоте. На рис. 6 приведен внешний вид локальных дефектов на сегменте № 2. Видно, что глубина язв находится в диапазоне от 1,6 до 5,15 мм, а их количество превышает определенные при ВТД (см. табл. 1). Это может быть объяснено несколькими причинами: мешающим влиянием продуктов коррозии, малой глубиной дефектов (ниже погрешности толщиномера или замеряемого порога, установленного для минимальной глубины дефекта, чтобы не засорять информацией об аномалиях, не представляющих опасности и не влияющих на ресурс трубопровода), множественным

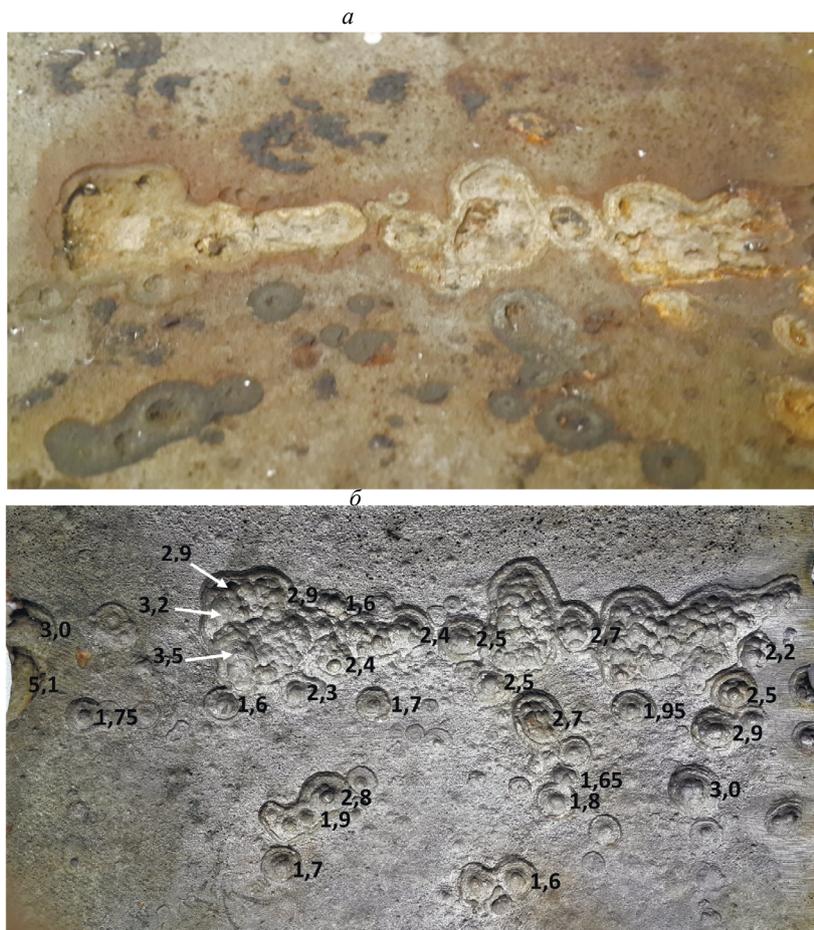


Рис. 6. Внешний вид сегмента № 2 после травления (глубина дефектов указана в мм).

характером и их совмещением в протяженные язвенные кластеры.

Если сравнивать, то коррозионные аномалии с малым утонением (7—8 %) под слоем продуктов коррозии практически неопределимы (сегмент № 2 на рис. 4). Это видно при сравнении их (серии небольших углублений) с изображениями на рис. 6 после травления. После удаления продуктов коррозии при ВИК обнаружилось множество коррозионных аномалий, которые было трудно выявить при ВТД.

Движение потока водной среды может привести к повреждениям по нижней составляющей трубы на ГСК. На рис. 2 представлен такой пример вида изнутри на трубном патрубке 3 с другого участка ГСК (с указанием нумерации областей отбора отложений для анализа). По виду дефектов видно (см. рис. 2), что они образованы движущимся потоком. Образцы отложений были отобраны из трех областей: 1 — на границе раздела жидкости с газовой фазой (с сильными дефектами); 2 — на дне потока (на «6 часов», без дефекта); 3 — на верхней образующей трубы (на «3 часа», без дефекта). Как отмечалось ранее [1], при таких условиях коррозионные повреждения локализуются не в самой жидкой фазе, а по краю поверхности жидкости, где «обычная» коррозионная агрессивность среды дополнительно осложняется краевым углом смачивания при колебаниях уровня жидкой фазы.

С патрубка 3 были отобраны образцы образовавшихся продуктов коррозии для проведения их рентгеновской дифракции. Данный анализ позволяет определить их морфологию для оценки влияния отложений на развитие коррозионных процессов в присутствии CO_2 [1, 15]. Соотношение кристаллических фаз и аморфных веществ порошка отложения с патрубка 3 представлено в табл. 2.

Отличительной особенностью состава кристаллических веществ в области 1 (с наибольшей степенью повреждения по границе раздела фаз потока жидкости) является присутствие кварца. В остальных областях (2 и 3) частицы кварца не были обнаружены. Механические частицы кварца

Таблица 2

Фазовый состав порошка отложения с патрубка 3

Область на патрубке 3	Соотношение кристаллических / рентгеноаморфных фаз в образце, %	Соотношение кристаллических фаз, %			
		Магнетит Fe ₃ O ₄	Сидерит FeCO ₃	Гётит FeO(OH)	Кварц SiO ₂
1	65 / 35	13	21	–	31
2	100 / 0	19	73	8	–
3	100 / 0	7	93	–	–

могут усиливать влияние потока и создавать коррозионно-эрозионный износ на внутренней стенке трубы. При этом в условиях карбонатных отложений при углекислотной коррозии кварцевые частицы способны внедряться в состав продуктов коррозии [24]. При дефектоскопии внутренней поверхности газопровода следует учитывать возможное влияние и других эксплуатационных факторов (температуры, давления и т.д.) на возможность и места образования локальных дефектов [25, 26]. Комплексный характер и учет других данных коррозионного мониторинга при интерпретации результатов ВТД являются важными и способны повысить достоверность информации о техническом состоянии трубопроводов.

ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ дефектов, установленных при ВТД методом рассеяния магнитного потока, показал, что на их детектирование влияет наличие продуктов коррозии, которые, обладая ферромагнитными свойствами, могут вносить искажения в сигналы, получаемые MFL-датчиками. Проведенный после удаления этих отложений визуально-измерительный контроль дефектов подтвердил, что их глубина на 20-30 % выше, чем у значений, полученных при ВТД. Кластеры наложенных друг на друга коррозионных язв, в отличие от отдельных локальных повреждений, могут создавать препятствия для их дефектоскопического определения методами ВТД. Дополнительную сложность в определение их глубины вносит многоступенчатый сложный рельеф объединенных повреждений, который был установлен при ВИК после удаления продуктов коррозии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vaganov R. K.* Comparing and Interpreting Results of Processing In-Line Inspection Data for Corrosive Gas Transportation Conditions // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 8. P. 717—726. [*Vaganov P.K.* Сравнение и интерпретация результатов обработки данных внутритрубной диагностики для условий транспортировки коррозионно-агрессивного газа // Дефектоскопия. 2021. № 8. С. 62—71. DOI: 10.31857/S0130308221080066.]
2. *Hedges B., Papavinasam S., Knox T., Sprague K.* Monitoring and Inspection Techniques for Corrosion in Oil and Gas Production // NACE Corrosion conference. 2015. Paper 5503.
3. *Кантюков Р.Р., Запелалов Д.Н., Ваганов Р.К.* Оценка влияния эксплуатационных условий на стойкость сталей, применяемых в H₂S-содержащих средах на объектах добычи углеводородов // Металлург. 2021. № 12. С. 24—31. DOI: 10.52351/00260827_2021_12_24
4. *Vaganov P.K.* Стойкость сталей в эксплуатационных условиях газовых месторождений, содержащих в добываемых средах агрессивный CO₂ // Материаловедение. 2021. № 8. С. 41—47. DOI: 10.31044/1684-579X-2021-0-8-41-47
5. *Меньшиков С.Н., Полозов В.Н.* Особенности организации диагностического, технического обслуживания и ремонта Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения // Газовая промышленность. 2017. Т. 754. С. 16—20.
6. *Слугин П.П.* Повышение эффективности эксплуатации объектов добычи газа и газового конденсата на Бованенковском нефтегазоконденсатном месторождении. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 53 с.
7. *Байдин И.И., Харитонов А.Н., Величкин А.В., Ильин А.В., Подольский Е.С.* Влияние углекислоты в природном газе газоконденсатной залежи нижнемеловых отложений Юбилейного нефтегазоконденсатного месторождения на эксплуатацию УКПГ-НТС // Наука и техника в газовой промышленности. 2018. Т. 74. № 2. С. 23—35.
8. *Артеменков В.Ю., Корякин А.Ю., Дикамов Д.В., Шустов И.Н., Шишков Э.О., Юсупов А.Д.*

Организация коррозионного мониторинга на объектах второго участка Ачимовских отложений Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения // Газовая промышленность. 2017. Т. 754. С. 74—79.

9. Кантюков Р.Р., Запевалов Д.Н., Вагапов Р.К. Анализ применения и воздействия углекислотных сред на коррозионное состояние нефтегазовых объектов // Записки Горного института. 2021. Т. 250. № 4. С. 578—586. DOI:10.31897/PMI.2021.4.11

10. Ильинова А.А., Ромашева Н.В., Стройков Г.А. Перспективы и общественные эффекты проектов секвестрации и использования углекислого газа // Записки Горного Института. 2020. Т. 244. С. 493—502. DOI: 10.31897/pmi.2020.4.12

11. Bazhenov S., Chubokсарov V., Maximov A., Zhdaneev O. Technical and economic prospects of CCUS projects in Russia // Sustainable Materials and Technologies. 2022. V. 33. Art. e00452. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00452>

12. Хан С.А., Дорохин В.Г., Бондаренко Н.П. Использование особенностей агрегатных состояний диоксида углерода для замещения части буферного объема подземных хранилищ газа // Газовая промышленность. 2016. № 4. Т. 736. С. 50—54.

13. ГОСТ 9.907—2007 Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний.

14. ГОСТ 9.908—85 Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости.

15. Михалкина О.Г. Применение метода рентгеновской дифракции для исследования зерна и техногенных продуктов // Научно-технический сб.: Вести газовой науки. 2016. Т. 28. № 4. С. 96—107.

16. Vanaei H.R., Eslami A., Egbewande A. A review on pipeline corrosion, in-line inspection (ILI), and corrosion growth rate models // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2017. V. 149. P. 43—54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.11.007>

17. Liu H., Liu Z., Taylor B., Dong H. Matching pipeline In-line inspection data for corrosion characterization // NDT and E International. 2019. V. 101. P. 44—52. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.10.004>

18. Тимашев С.А., Тырсин А.Н., Макарова Т.А. Повышение достоверности результатов измерений внутритрубных дефектоскопов // Контроль. Диагностика. 2012. № 6. С. 13—17.

19. Danna M.R., Dann C. Automated matching of pipeline corrosion features from in-line inspection data // Reliability Engineering and System Safety. 2017. V. 162. P. 40—50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2017.01.008>

20. Khana F., Yarveysya R., Abbassi R. Cross-country pipeline inspection data analysis and testing of probabilistic degradation models // Journal of Pipeline Science and Engineering. 2021. V. 1. P. 308—320. <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.09.004>

21. Канайкин В.А., Матвиенко А.Ф., Повагин В.А. Автоматизация экспертного анализа диагностических данных в дефектоскопии газопроводов методом MFL // Дефектоскопия. 2007. № 8. С. 25—31.

22. Загидуллин Р.В., Мужичицкий В.Ф., Ефимов А.Г., Загидуллин Т.Р., Шубочкин А.Е. Исследование влияния продуктов коррозии магистрального нефтепродуктопровода на сигнал вихретокового дефектоскопа ВД-12НФП // Контроль. Диагностика. 2007. № 9. С. 42—46.

23. Ефимов А.Г. К влиянию продуктов коррозии металла и отложений на выявляемость дефектов сплошности при электромагнитном контроле стальных изделий. Часть 1 // Контроль. Диагностика. 2012. № 1. С. 26—33

24. Li J.L., Zhu S. D., Qun C. T. Abrasion resistances of CO₂ corrosion scales formed at different temperatures and their relationship to corrosion behaviour // Corrosion Engineering, Science and Technology. 2014. V. 49. № 1. P. 73—79. <https://doi.org/10.1179/1743278213Y.0000000117>

25. Вагапов Р.К., Прокопенко А.Ю., Томский И.С. Оценка зависимости скорости коррозии стали на объектах инфраструктуры углеводородных месторождений от минерализации и температуры // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 6. С. 41—44. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-6-41-44

26. Федоров А.С., Алексеева Е.Л., Альхименко А.А., Шапошников Н.О., Ковалев М.А. Исследование влияния параметров испытаний на оценку стойкости сталей к углекислотной коррозии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 12. С. 36—41. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-12-42-47

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИКЛЕИВАЕМОГО И ПРИМАГНИЧИВАЕМОГО ЦТС-ДАТЧИКОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА В ЦЕЛЯХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

© 2022 г. С.К. Сингх^{1,*}, Р. Шанкер^{1,**}

¹Национальный технологический институт Мотилала Неру в Аллахабаде,
Праяградж, 211004 Индия
E-mail: *sachin6738@gmail.com; **ramashanker@mnnit.ac.in

Поступила в редакцию 08.07.2022; после доработки 09.08.2022
Принято к публикации 12.08.2022

Метод электромеханического импеданса (ЭМИ) является одним из важных методов в области мониторинга состояния конструкций. Повреждение на начальном этапе может быть легко обнаружено с помощью этого метода по сравнению с другими. Исследователями были предложены различные конфигурации ЦТС-датчиков для метода ЭМИ, которые имеют свои преимущества и недостатки. В данной работе приклеиваемый ЦТС-датчик (КЦД) и примагничиваемый ЦТС-датчик (МЦД) используются для контроля дефектов в стальной балке двутаврового сечения. В балке создаются повреждения, и с помощью статистических методов производится их количественная оценка. При анализе результатов было обнаружено, что МЦД имеет большую зону чувствительности, чем КЦД. Это связано с отсутствием эффекта сдвигового запаздывания в МЦД, чего нет в случае КЦД. Задержка сдвига влияет на механизм передачи деформации между ЦТС-датчиком и объектом, на котором данный датчик и располагается. Область чувствительности МЦД достигает 3,5 м, в то время как область чувствительности КЦД составляет менее 2,0 м в случае стальной балки.

Ключевые слова: контроль состояния конструкций, метод электромеханического импеданса, приклеиваемый ЦТС-датчик, примагничиваемый ЦТС-датчик.

DOI: 10.31857/S0130308222100062, EDN: BTKVCC

ВВЕДЕНИЕ

Многие гражданские инженерные сооружения (такие как мосты, высотные здания, плотины, железные дороги и метро) играют значительную роль для транспортных сетей, социальной жизни и экономики. Срок службы многих из этих сооружений подходит к концу из-за экономической нецелесообразности их реконструкции. Исследователи и инженеры-строители в последнее время уделяют большое внимание контролю состояния конструкций (КСК) для долгосрочного мониторинга и обнаружения потенциальной деградации конструкций. Были разработаны различные методы КСК [1—6], которые должны использоваться в соответствии с требованиями, из которых хорошо зарекомендовал себя метод электромеханического импеданса (ЭМИ) при контроле зарождающихся повреждений, обладая высокой точностью.

Датчики, используемые в методе ЭМИ, обычно приклеиваются к объектам контроля эпоксидной смолой для выявления структурных дефектов. Такие датчики, с другой стороны, уязвимы к повреждениям. Диагностика датчиков — это область исследования, которая сосредоточена на поиске неисправных датчиков. Хотя очевидно, что продолжение создания систем КСК необходимо как по соображениям безопасности, так и по экономическим причинам, создание сенсорной диагностики для этих методов КСК можно считать не менее важным. Диагностика датчиков позволяет системе мониторинга определять целостность датчиков и отличать повреждения датчиков от дефектов конструкции.

Существуют различные типы датчиков, разработанные для решения конкретных задач. Для мониторинга ранней гидратации бетона и состояния конструкций была создана концепция многоцветового ЦТС-датчика. Такая схема датчика состоит из ЦТС-элемента, соединенного с корпусом двумя болтами, которые затем затягиваются в отверстиях, просверленных в корпусе [7]. Аналогичный многоцветовый датчик был создан с использованием болта, металлического стержня и ЦТС-пластины, которая крепится на болт, который в свою очередь крепится к металлическому стержню. Стержень вставляется в бетон во время заливки, что может быть использовано для мониторинга гидратации цемента. Этот датчик можно использовать повторно, удалив болт [8]. Также был предложен беспроводной датчик, который можно поместить в бетон во время заливки и использовать для мониторинга прочности бетона и его разрушения [9]. Для оценки прочности высокопрочного бетона был предложен встраиваемый ЦТС-датчик, изготовленный из полого

полусферического стирола [10]. Для мониторинга раннего нарастания показателей механической прочности цементных материалов был разработан датчик на основе интеллектуального зонда, использующий металлическую полосу с ЦТС-датчиком, приклеенным с одной стороны [11]. Другой датчик был изготовлен в форме кольцевого диска и встроен в конец стального прута для распознавания повреждений вследствие коррозии и образования трещин [12]. Было установлено, что пьезоэлектрический цементный датчик, состоящий из цемента и пьезоэлектрического композита, работает лучше, чем обычный ЦТС-датчик, поскольку у него больше изменение электрического импеданса [13].

Большинство методов обнаружения дефектов требуют большого количества датчиков, рассредоточенных по всей конструкции для достаточного охвата области контроля. Большинство из этих датчиков могут работать в неблагоприятных условиях эксплуатации и окружающей среды. Механические воздействия, аварии или другие непредвиденные чрезвычайные происшествия способны повредить даже датчики, подключенные в безопасном месте. Если датчик, подключенный к системе мониторинга, не выдает никаких выходных сигналов как от окружающей среды, так и от внешнего воздействия, то, скорее всего, датчик был выведен из строя. Даже если датчик каким-то образом повредился, он все равно в некоторой степени работоспособен, может реагировать на внешнее воздействие и выдавать, как кажется, достаточный отклик. Датчик с поломками или недостаточным сцеплением, которые могут быть вызваны воздействием растворителя, ударами и усталостью, может существенно изменить свойства сигнала и привести к ошибочным заключениям о наличии повреждения. Перед каждым измерением состояние каждого датчика должно быть проверено для максимального обеспечения представление о целостности конструкции. Поэтому для преодоления этого недостатка исследователями был предложен примагничиваемый ЦТС-датчик (МЦД), который может применяться, если известно состояние конструкции. Крепление МЦД не требует наличие связующего слоя из эпоксидной смолы, а работа датчика SMPS объясняется в другом разделе.

Влияние связующего слоя на измерения импеданса было изучено рядом исследователей. Bhalla и Soh [4] исследовали влияние сдвига через связующий слой на электромеханические модели импеданса, такие как пьезоэлектрическая активация и зондирование, созданные Crawley и de Luis [5] и Sirohi и Chopra [6] соответственно. Bhalla и Soh [4] показали, что связующий слой может оказывать существенное влияние на наблюдаемые сигналы электрического сопротивления, добавляя эффекты потерь на сдвиг через клей и расширяя предыдущие модели до 2D. Чтобы уменьшить влияние пограничного слоя на регистрируемые данные, авторы рекомендовали использовать тонкий слой клея с высоким модулем сдвига и как можно меньший пьезоэлектрический слой.

В данной работе как КЦД, так и МЦД используются на стальной балке двутаврового сечения, искусственные повреждения создаются в балке путем разрезания в одной точке. Получены зависимости проводимости от частоты в исходном состоянии и на различных стадиях повреждения. Количественная оценка повреждений была выполнена на основе статистического анализа.

МЕТОД ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА

Пьезоэлектрик обладает свойством изменять форму при приложении к нему электрического потенциала, что называется обратным пьезоэффектом, и, наоборот, генерировать электрический заряд при наведении в нем деформации, что называется прямым пьезоэффектом. Это свойство пьезоэлектрического материала делает его пригодным для использования в качестве датчика и актуатора в области контроля состояния конструкций. Они имеют небольшие размеры, малый вес и обеспечивают лучшую чувствительность.

Согласно данной методике, датчик цирконата-титаната свинца (ЦТС) приклеивается к участку конструкции, данный участок электрически возбуждается с помощью LCR-метра напряжением 1 В в широком диапазоне частот 30—400 кГц, одновременно с этим регистрируется характеристики сигнала для каждой частоты в этом диапазоне. Характеристики сигнала записываются в виде зависимости сопротивления ЦТС-датчика от частоты. Адмиттанс ЦТС-пластины определяет сопротивление объекта, к которому он приклеен, которое зависит от массы, жесткости и демпфирующих свойств материала конструкции. При подаче электрического потенциала на ЦТС-датчик индуцируется деформация, которая далее передается конструкции. После передачи деформации упругие волны распространяются через материал и отражаются от дефектов, границ и любых других препятствий. Возвращаясь обратно, упругие волны собирают информацию о материале, что, в свою очередь, приводит к вибрациям ЦТС-датчика, в котором благодаря прямому воздействию генерируется электрический заряд, регистрируемый в различных диапа-

зонах частот с помощью LCR-метра. Эта последовательность действий повторяется всякий раз, когда необходимо узнать состояние объекта. Любое изменение в форме сигнала по сравнению с ранее полученной свидетельствует о повреждении конструкции. Для количественной оценки повреждений, определения местоположения повреждений и оценки оставшегося срока службы конструкции были проведены многочисленные исследования [14—20]. За последние два десятилетия такая методика получила большее развитие для комплексного использования в данной области [21—26]. Начальный уровень трещин или любые незначительные изменения в конструкции легко обнаруживаются. Более поздние исследования также показали его эффективность для глобальных повреждений, а также для более низкого диапазона частот [27]. Эти сигналы уникальны для конструкции, если только конструкция не претерпела физических изменений, таких как изменение температуры, жесткости, массы или демпфирования, во время которых формы сигналов не остаются такими же и изменяются. В результате любое повреждение конструкции вызывает изменения в связанных с ней структурных параметрах, которые впоследствии могут быть замечены как изменение параметров адмиттанса конструкции. Метод ЭМИ очень чувствителен к ранним признакам повреждения. В результате раннее обнаружение и быстрое реагирование могут предотвратить его дальнейшее распространение и полное разрушение конструкции.

Liang [28] впервые предложил одномерную импедансную модель электромеханической системы. ЦТС-датчик считается бесконечно малым по сравнению со всей конструкцией, поэтому его масса и жесткость не учитываются. Переменное электрическое поле прикладывается в направлении '3', как показано на рис. 1, что приводит к колебаниям ЦТС в направлении '1'. ЦТС-датчик закреплен с одной стороны, а другая сторона испытывает импеданс Z от объекта. ЦТС-пластина действует как тонкий стержень, испытывающий осевые колебания. Электромеханическая модель показана на рис. 1. Ее комплексный коэффициент передачи определяется согласно уравнению:

$$\bar{Y} = 2\omega j \frac{wl}{h} \left[\left(\bar{\epsilon}_{33}^T - d_{31}^2 \bar{Y}^E \right) + \left(\frac{Z_a}{Z + Z_a} \right) d_{31}^2 \bar{Y}^E \left(\frac{\tan \kappa l}{\kappa l} \right) \right], \quad (1)$$

где \bar{Y} — адмиттанс (обратный импеданс); \bar{Y}^E — модуль Юнга; d_{31} представляет пьезомодуль; $\bar{\epsilon}_{33}^T$ — комплексная диэлектрическая постоянная ЦТС в отсутствии механических напряжений соответственно; d — это тангенс угла диэлектрических потерь ЦТС; Z и Z_a — механический импеданс конструкции и ЦТС-пластины соответственно.

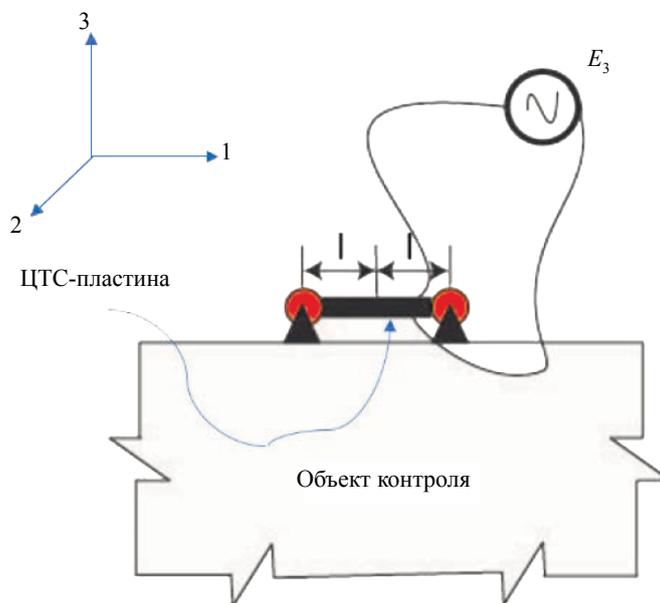


Рис. 1. ЦТС-пластина, приклеенная к объекту.

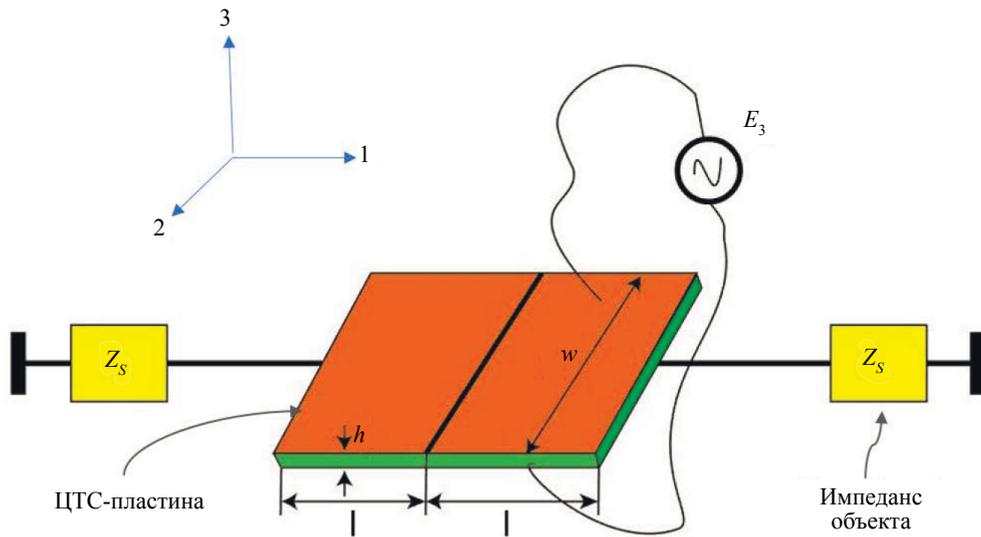


Рис. 2. 2D-модель импеданса между ЦТС-пластиной и объектом.

В этой точечной модели основным недостатком было то, что ЦТС-пластина считалась приклеенной только на внешней граничной поверхности, в то время как ЦТС-датчик приклеивается к поверхности структуры полностью, что приводит к дальнейшему совершенствованию модели.

Далее Bhalla и Soh [4] предложили 2D-модель импеданса, которая показана на рис. 2, используя идею «эффективного импеданса» и получая следующее выражение для адмиттанса ЦТС-пластины:

$$\bar{Y} = G + Bj = 4\omega j \frac{l^2}{h} \left[\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_{33}^T} - \frac{2d_{31}^2 Y^E}{(1-\nu)} + \frac{2d_{31}^2 Y^E}{(1-\nu)} \left(\frac{Z_{a,eff}}{Z_{s,eff} + Z_{a,eff}} \right) \bar{T} \right], \quad (2)$$

где \bar{T} — комплексная касательная, а l — половина длины пластины. В свою очередь, адмиттанс, рассчитываемый по уравнению (2), можно разбить на две части:

$$\bar{Y} = \bar{Y}_p + \bar{Y}_A, \quad (3)$$

где \bar{Y}_A — «активная» компонента и \bar{Y}_p — «пассивная» компонента. \bar{Y}_p можно разделить на действительную и мнимую части:

$$\bar{Y}_p = G_p + B_p j; \quad (4)$$

$$G_p = \frac{4\omega l^2}{h} \{ \delta \epsilon_{33}^T + K \eta \}; \quad (5)$$

$$B_p = \frac{4\omega l^2}{h} \{ \epsilon_{33}^T - K \}; \quad (6)$$

$$K = \frac{2d_{31}^2 Y^E}{(1-\nu)}. \quad (7)$$

Такая разработанная аналитическая модель показывает хорошую корреляцию с экспериментом.

ЭФФЕКТ СДВИГОВОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ НА МОДЕЛЬ ИМПЕДАНСА

Для моделирования эффекта сдвигового запаздывания на импеданс рассматривался ЦТС-датчик, который показан на рис. 3 и 4. Датчик прикрепляется к объекту с помощью клея и возбуждается источником переменного напряжения. На рис. 4 показана правая половина симметричной системы ЦТС-пластины. Сама пластина считается бесконечно малой. Используя принцип д'Аламбера, уравнение для ЦТС можно записать как

$$\tau w_p dx + (dm) \frac{\partial^2 u_p}{\partial t^2} = \frac{\partial T_p}{\partial x} t_p w_p dx. \quad (8)$$

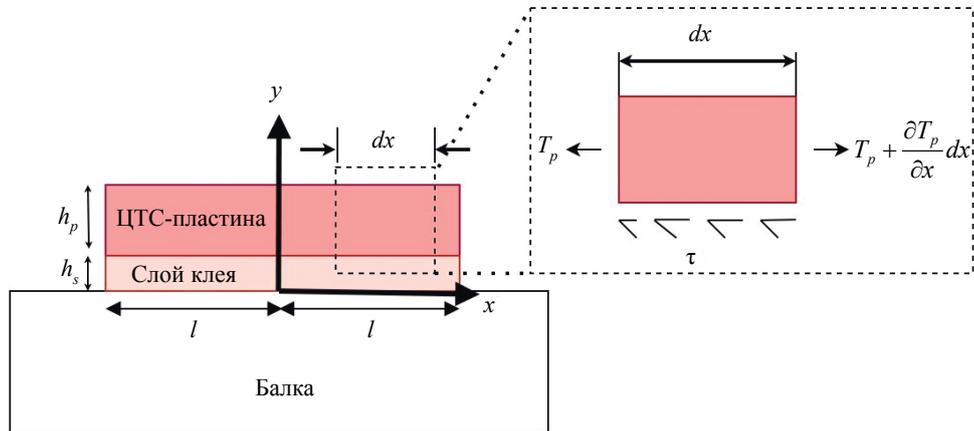


Рис. 3. ЦТС-пластина, приклеенная к балке с помощью клея.

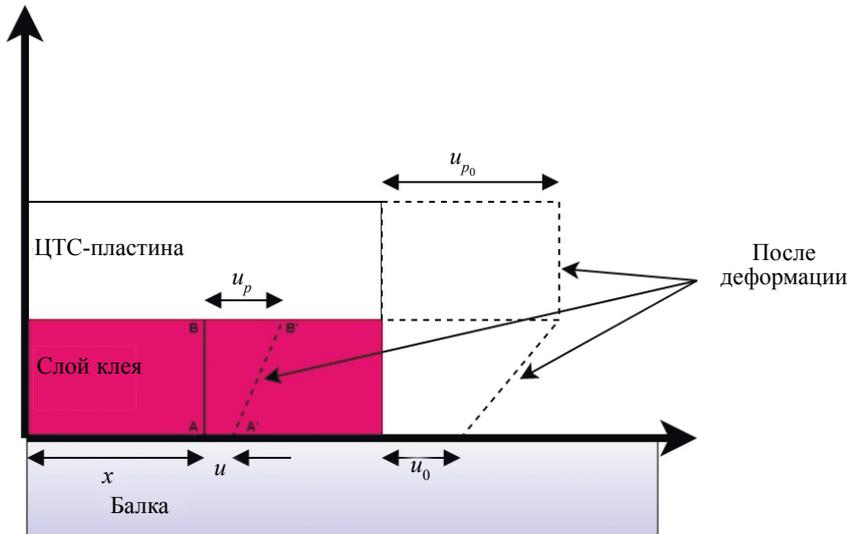


Рис. 4. Деформация слоя клея и пластины.

Пластина имеет полудлину l , ширину w_p , толщину h_p , а связующий слой обладает толщиной h_s . Балка имеет глубину h_b и ширину w_b . Пусть T_p — осевое напряжение в ЦТС-пластине; τ — напряжение межфазного сдвига; dm — бесконечно малая масса; u_p обозначает смещение между ЦТС-пластиной и слоем клея; u — смещение между слоем клея и материалом основы. Инерциальным членом пренебрегаем из-за преобладания члена напряжения сдвига в уравнении (8), такое предположение может привести уравнение (8) к виду:

$$\tau = \frac{\partial T_p}{\partial x} t_p. \quad (9)$$

Допуская деформацию чистого сдвига в связующем слое:

$$\tau = \frac{\overline{G}_s (u_p - u)}{t_s}, \quad (10)$$

где $\overline{G}_s = G_s (1 + \eta' j)$ — комплексный модуль сдвига связующего слоя, а η' — тангенс угла механических потерь, связанный с наличием связующего слоя. Осевое напряжение в ЦТС-пластине определяется как

$$T_p = \overline{Y}^E (u'_p - \Lambda), \quad (11)$$

где \overline{Y}^E — комплексный модуль Юнга ЦТС-пластины; u'_p — деформация ЦТС; $\Lambda = E_3 d_{31}$ — свободная пьезоэлектрическая деформация. Подставляя уравнение (10) и (11) в уравнение (9), мы получим:

$$u_p - u = \left(\frac{\overline{Y}^E t_p t_s}{\overline{G}_s} \right) u''_p. \quad (12)$$

Сила, которая направлена на объект, связана с полным входным сопротивлением Z объекта следующим образом:

$$F = -Z \dot{u}, \quad (13)$$

где \dot{u} — полная скорость на поверхности объекта. Далее уравнение (13) может быть упрощено как

$$T_p w_p t_p = -Z u j \omega. \quad (14)$$

Подставляя уравнение (11) и дифференцируя его по переменной x , получаем:

$$u''_p = - \left(\frac{Z j \omega}{w_p t_p \overline{Y}^E} \right) u'. \quad (15)$$

В уравнении (12) выразим u''_p :

$$u''_p = \left(\frac{\overline{G}_s}{\overline{Y}^E t_p t_s} \right) (u_p - u). \quad (16)$$

Подставим уравнение (16) в уравнение (15) и преобразуем его:

$$u_p - u = - \left(\frac{Z t_s j \omega}{\overline{G}_s w_p} \right) u'. \quad (17)$$

Продифференцировав уравнение (17) дважды по переменной x , получаем:

$$u''_p = u'' - \left(\frac{Z t_s j \omega}{\overline{G}_s w_p} \right) u'''. \quad (18)$$

Подставим уравнения (17) и (18) в уравнение (12), затем продифференцируем его по переменной x :

$$u'''' + \left(- \frac{w_p \overline{G}_s}{Z t_s j \omega} \right) u'''' - \left(\frac{\overline{G}_s}{\overline{Y}^E t_s t_p} \right) u'' = 0. \quad (19)$$

Пусть

$$\bar{p} = -\frac{w_p \overline{G_s}}{Z t_s j \omega}. \quad (20)$$

Подставим $Z = x + yi$, $(\overline{G_s}) = G_s(1 + \eta'j)$ и упростим:

$$\bar{p} = a + bj, \quad (21)$$

где

$$a = \frac{w_p G_s (y - \eta'x)}{\omega t_s (x^2 + y^2)} \quad \text{и} \quad b = \frac{w_p G_s (y + \eta'x)}{\omega t_s (x^2 + y^2)}. \quad (22)$$

Поскольку η и η' — очень малые величины, коэффициент перед u_p'' можно записать как

$$q = \frac{\overline{G_s}}{Y^E t_s t_p} \approx \frac{G_s}{Y^E t_s t_p}. \quad (23)$$

Результирующее дифференциальное уравнение (19) можно выразить:

$$u'''' + \bar{p}u''' - qu_p'' = 0. \quad (24)$$

Характеристическое уравнение:

$$\lambda^4 + \bar{p}\lambda^3 - q\lambda^2 = 0. \quad (25)$$

Решив его, получим корни характеристического уравнения:

$$\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = \frac{-\bar{p} + \sqrt{\bar{p}^2 + 4q}}{2}, \lambda_4 = \frac{-\bar{p} - \sqrt{\bar{p}^2 + 4q}}{2}. \quad (26)$$

Следовательно, решение дифференциального уравнения (24) можно записать как

$$u = A_1 + A_2x + B e^{\lambda_3x} + C e^{\lambda_4x}. \quad (27)$$

Константы A , B и C определяются, исходя из начальных условий.

Дифференцируя по переменной x , получаем:

$$u' = A_2 + B\lambda_3 e^{\lambda_3x} + C\lambda_4 e^{\lambda_4x}. \quad (28)$$

Подставляя уравнения (27) и (28) в уравнение (17), имеем:

$$u_p = (A_1 + A_2x + B e^{\lambda_3x} + C e^{\lambda_4x}) - \left(\frac{Z t_s j \omega}{w_p \overline{G_s}} \right) (A_2 + B\lambda_3 e^{\lambda_3x} + C\lambda_4 e^{\lambda_4x}). \quad (29)$$

Обозначив $\left(\frac{Z t_s j \omega}{w_p \overline{G_s}} \right) = \frac{1}{\bar{p}}$ величиной \bar{p} и преобразовав, получаем:

$$u_p = (A_1 + \bar{p}A_2) + A_2x + B(1 + \bar{p}\lambda_3)e^{\lambda_3x} + C(1 + \bar{p}\lambda_4)e^{\lambda_4x}. \quad (30)$$

Дифференцируя по переменной x , можно выразить деформацию ЦТС-пластины как

$$S_p = A_2 + B\lambda_3(1 + \bar{p}\lambda_3)e^{\lambda_3x} + C\lambda_4(1 + \bar{p}\lambda_4)e^{\lambda_4x}. \quad (31)$$

При $x = 0$, $u = 0$ из уравнения (27) получаем:

$$A_1 = -(B + C). \quad (32)$$

При $x = 0$, $u_p = 0$ из уравнения (30) выводим:

$$A_2 = -(B\lambda_3 + C\lambda_4). \quad (33)$$

Подставим уравнение (33) в уравнение (31), получаем:

$$S_p = B[\lambda_3(1 + \bar{n}\lambda_3)e^{\lambda_3 x} - \lambda_3] + C[\lambda_4(1 + \bar{n}\lambda_4)e^{\lambda_4 x} - \lambda_4]. \quad (34)$$

При $x = +l$ и $x = -l$ осевая деформация в ЦТС-пластине равна свободной пьезоэлектрической деформации или Λ , благодаря чему из уравнения (34) получаем:

$$B[\lambda_3(1 + \bar{n}\lambda_3)e^{-\lambda_3 l} - \lambda_3] + C[\lambda_4(1 + \bar{n}\lambda_4)e^{-\lambda_4 l} - \lambda_4] = \Lambda, \quad (35)$$

$$B[\lambda_3(1 + \bar{n}\lambda_3)e^{\lambda_3 l} - \lambda_3] + C[\lambda_4(1 + \bar{n}\lambda_4)e^{\lambda_4 l} - \lambda_4] = \Lambda. \quad (36)$$

После решения уравнений (35) и (36) определяются константы B и C :

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \frac{\Lambda}{(k_1 k_4 - k_2 k_3)} \begin{bmatrix} k_4 - k_2 \\ k_1 - k_3 \end{bmatrix}, \quad (37)$$

где

$$k_1 = \lambda_3(1 + \bar{n}\lambda_3)e^{-\lambda_3 l} - \lambda_3; \quad (38)$$

$$k_2 = \lambda_4(1 + \bar{n}\lambda_4)e^{-\lambda_4 l} - \lambda_4; \quad (39)$$

$$k_3 = \lambda_3(1 + \bar{n}\lambda_3)e^{\lambda_3 l} - \lambda_3; \quad (40)$$

$$k_4 = \lambda_4(1 + \bar{n}\lambda_4)e^{\lambda_4 l} - \lambda_4. \quad (41)$$

Благодаря толстому связующему слою $u_{(x=l)} \neq u_{p(x=l)}$, используя уравнение (17), может быть получено следующее уравнение:

$$\frac{u_{(x=l)}}{u_{p(x=l)}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{zt_s j\omega}{w_p \bar{G}_s} \right) \frac{u'_{(x=l)}}{u_{(x=l)}}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{\bar{p}} \frac{u'_0}{u_0} \right)}. \quad (42)$$

Сила, которая направлена на объект, может быть выражена следующим образом:

$$F = -Z u_{(x=l)}; \quad (43)$$

$$F = \frac{-Z}{\left(1 + \frac{1}{\bar{p}} \frac{u'_0}{u_0} \right)} j\omega u_{p(x=l)} = Z_{eq} j\omega u_{p(x=l)}, \quad (44)$$

где

$$Z_{eq} = \frac{Z}{\left(1 + \frac{1}{\bar{p}} \frac{u'_0}{u_0} \right)} \quad (45)$$

— «эквивалентный импеданс» с учетом сдвигового запаздывания для одномерного случая.

Схожим образом, «эквивалентный импеданс» с учетом явления сдвигового запаздывания для 2D-модели, основанной на эффективном импедансе, получается как [29]:

$$z_{eff,eq} = \frac{Z_{eff}}{1 + \frac{1}{P_{eff}} \frac{u_{eff}(x=l)}{u_{eff}(x=0)}} \quad (46)$$

ПРИМАГНИЧИВАЕМЫЙ ЦТС-ДАТЧИК (МЦД)

Для исследования стальных конструкций такой датчик был разработан сравнительно недавно. Он состоит из высокопрочного магнита, листа перспекса (оргстекла), гайки-болта и ЦТС-пластины [30], как показано на рис. 5 и рис. 6. Расположение выполнено таким образом, что ЦТС-пластина

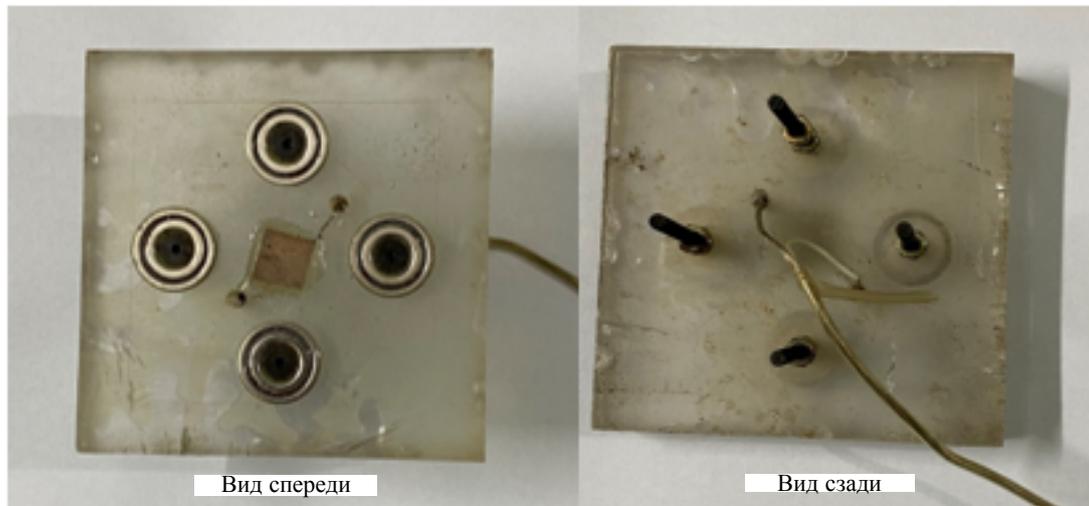


Рис. 5. Вид спереди и вид сзади поверхности примагничиваемого ЦТС-датчика (МЦД).

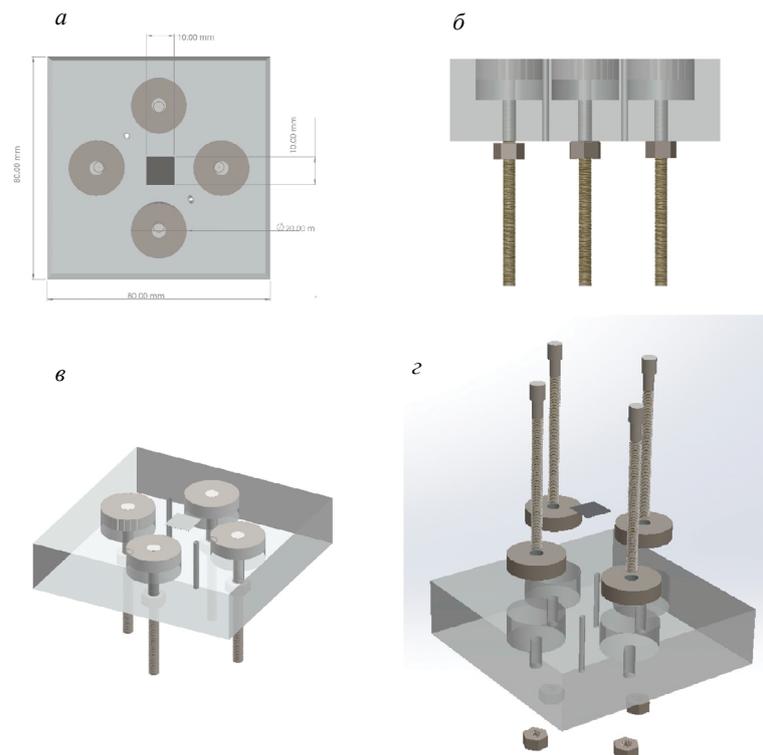


Рис. 6. Модель МЦД: вид сверху(а); вид сбоку (б); изометрическая проекция (в); сборочный чертеж (z).

прикреплена к листу перспекса с помощью клея, а магниты имеют форму круглого диска, закрепленного гайкой и болтом. Они расположены таким образом, что МЦД удерживается на конструкции за счет магнита. ЦТС-пластина находится только в контакте с конструкцией, в то время как магниты левитируют в воздухе. Такое расположение исключает использование эпоксидной смолы или клеящего материала для приклеивания ЦТС-пластины к конструкции. Следовательно, исчезает эффект задержки сдвига, возникающий из-за использования эпоксидной смолы. Этот датчик является хорошим решением для метода ЭМИ, так как для приклеивания ЦТС-пластины в традиционном методе требуется достаточная квалификация, чего нельзя сказать о МЦД. МЦД можно использовать повторно, поскольку его можно легко монтировать и демонтировать на конструкции. В то же время, как при использовании обычного ЦТС-датчика, после того как он приклеен к конструкции, его невозможно отсоединить.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данном исследовании для эксперимента была взята стальная балка двутаврового сечения достаточно большой длины 5,5 м (как показано на рис. 7, 8), с глубиной полотна, шириной фланца и толщиной 0,140 м, 0,170 м и 0,005 м соответственно. Балка находилась в состоянии простой опоры, размещаясь на бетонных блоках без боковых сил, действующих на нее. ЦТС- датчики были

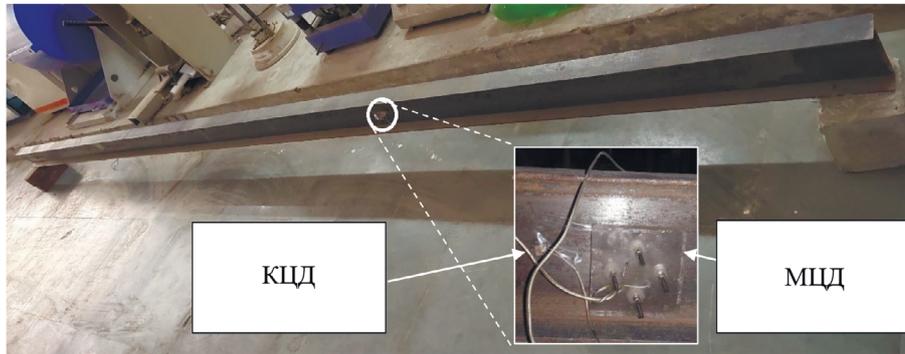


Рис. 7. Стальная двутавровая балка длиной 5.5 м.



Рис. 8. Экспериментальная установка.

Для применения метода ЭМИ требуется следующее оборудование: LCR-метр Hioki IM3536 и персональный компьютер (установка показана на рис. 8). ЦТС-пластина возбуждается при помощи LCR-метра, затем эти ЦТС-пластины создают волны напряжения в конструкциях, которые возвращаются от границ или дефектов, присутствующих в деталях конструкции, обратно к ЦТС-пластине. Затем сигналы регистрируются с помощью LCR-метра в виде проводимости с изменяющейся частотой. Первое показание измерялось на начальной стадии, а затем после создания повреждений в конструкции. Эта операция была повторена для всех конфигураций датчиков, то есть для КЦД и МЦД. Все графики зависимости проводимости от частоты показаны на рис. 11—16.

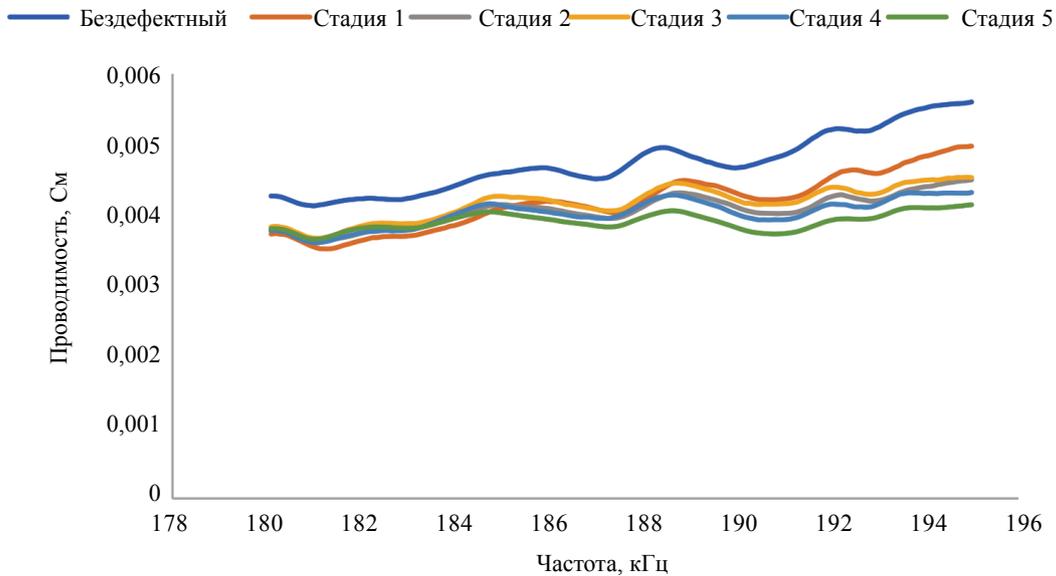


Рис. 11. Зависимость проводимости от частоты для МЦД в положении 1.

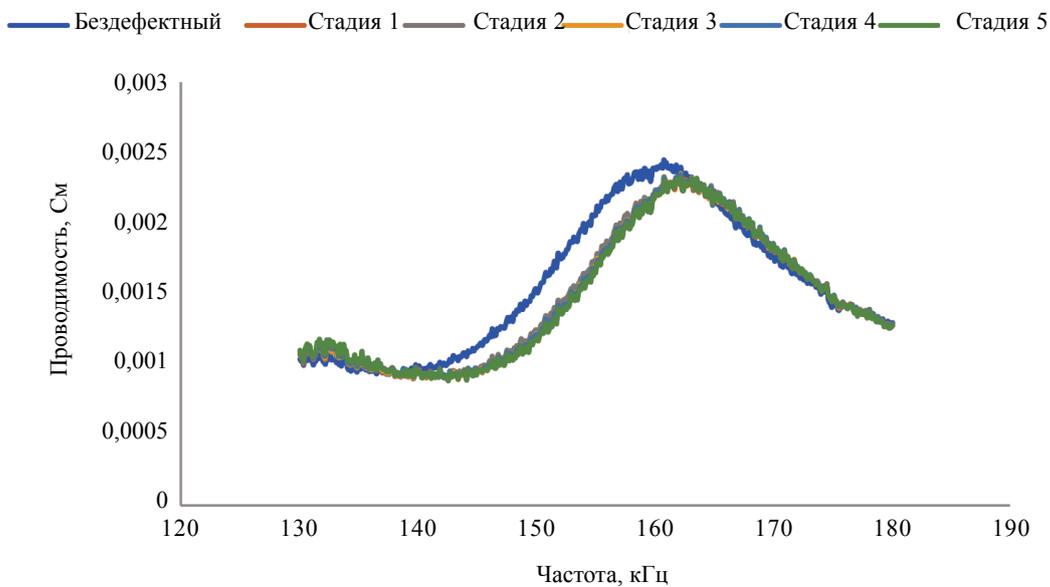


Рис. 12. Зависимость проводимости от частоты для КЦД в положении 1.

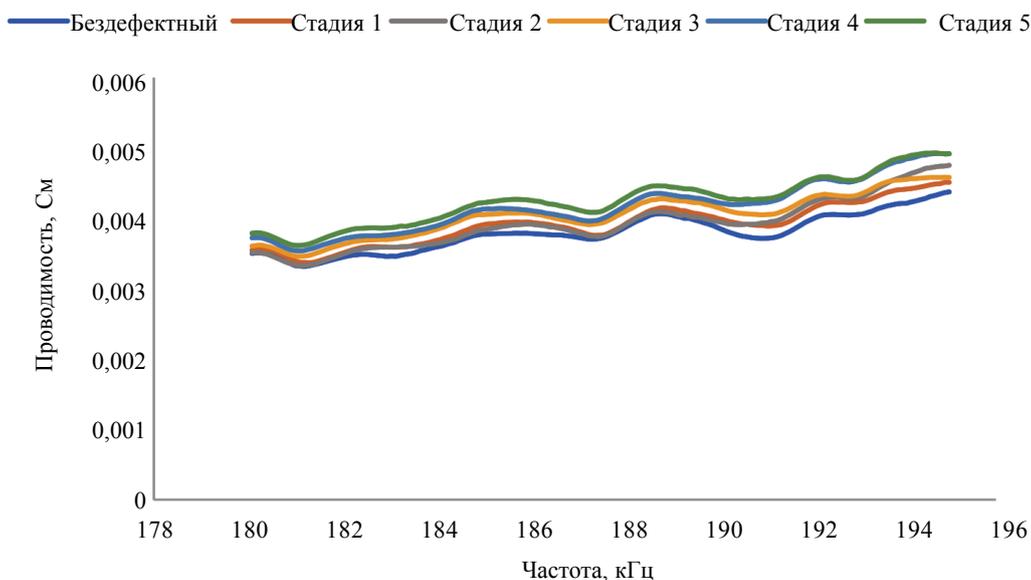


Рис. 13. Зависимость проводимости от частоты для МЦД в положении 2.

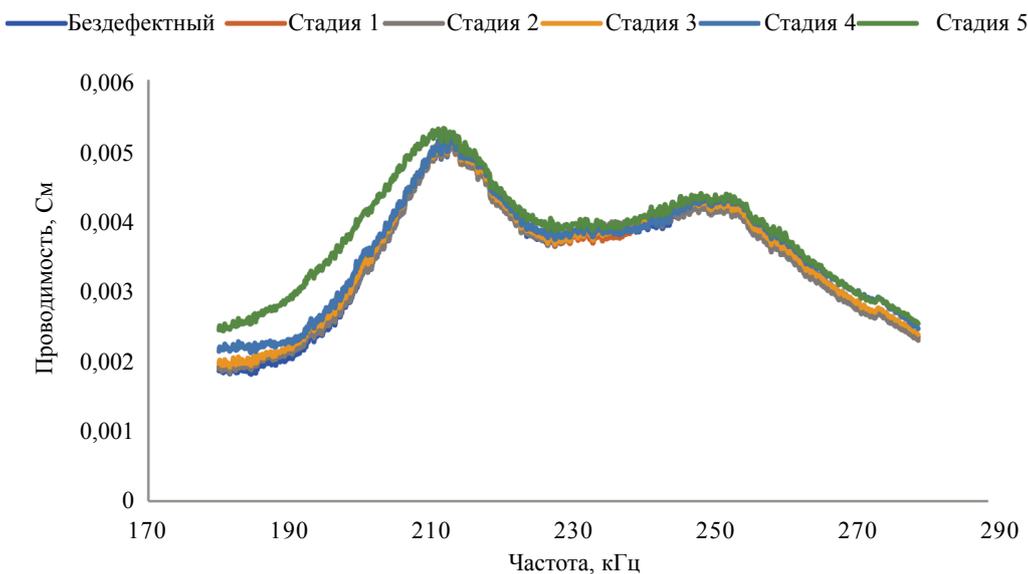


Рис. 14. Зависимость проводимости от частоты для КЦД в положении 2.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕНИЙ

Среднее квадратическое отклонение (СКО) используется для расчета разницы в значениях между исходным значением характеристики адмиттанса и при каждом из пяти состояний повреждения. СКО используют в качестве признака повреждения для количественной оценки изменений в характеристиках адмиттанса в процессе развития повреждения:

$$СКО = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_i^1 - G_i^0)^2}{\sum_{i=1}^n (G_i^0)^2}} \times 100, \quad (46)$$

где G_i^1 — величина проводимости после создания в объекте i -го дефекта и G_i^0 — проводимость объекта в исходном состоянии, n обозначает количество измерений.

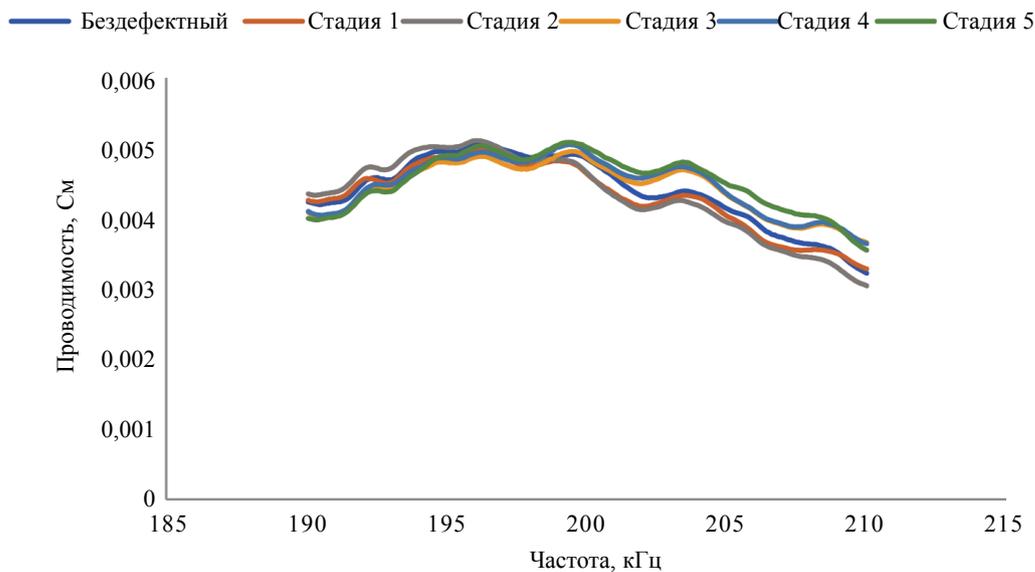


Рис. 15. Зависимость проводимости от частоты для МЦД в положении 3.

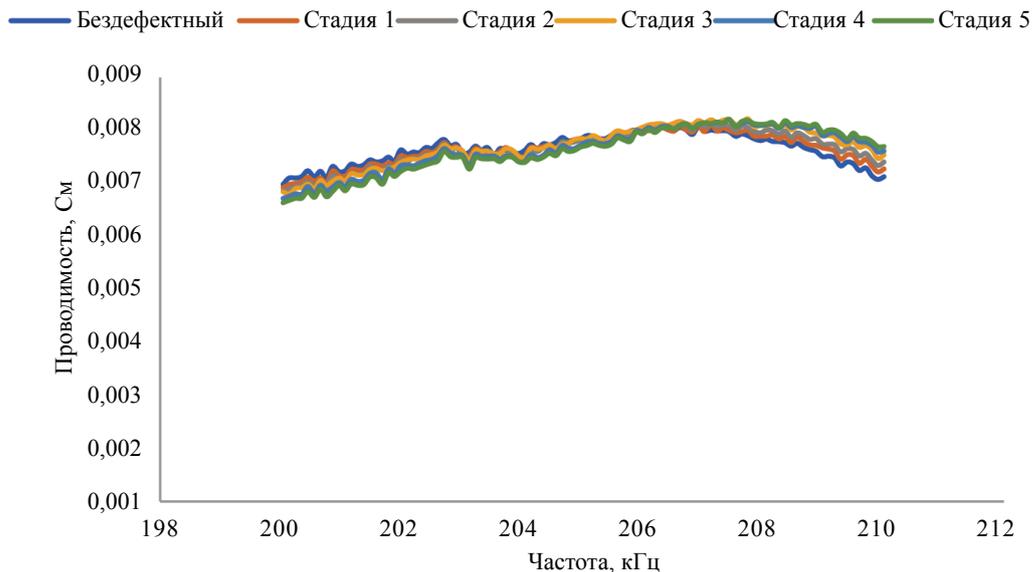


Рис. 16. Зависимость проводимости от частоты для КЦД в положении 3.

Обнаружение дефектов с помощью МЦД оказывается более надежным по сравнению с КЦД, так как значения СКО во всех случаях оказываются выше. В точке 1 рассматриваемый диапазон частот КЦД составляет 180—195 кГц, а для МЦД рассматриваемый диапазон частот составляет 130—180 кГц, сравнение гистограммы СКО показано на рис. 17. В точке 1, которая находится на расстоянии 0,5 м от места дефекта, изменения в характеристиках ЭМИ больше, что отражено на гистограмме СКО. Начальный уровень повреждений легко обнаруживается методом ЭМИ, при дальнейшем увеличении степени повреждения значение СКО увеличивается не так сильно. Для точки 2 диапазон частот КЦД составляет 180—195 кГц, а для МЦД — 185 — 280 кГц, сравнение гистограмм СКО показано на рис. 18. В точке 2, которая находится на расстоянии 2 м от места дефекта, значение СКО уменьшается для МЦД и КЦД по сравнению с показаниями датчиков в точке 1. В точке 3 диапазон частот КЦД составляет 190—210 кГц, а диапазон частот МЦД—200—210 кГц, сравнение гистограмм СКО показано на рис. 19. Аналогично для точки 3, которая находится на расстоянии 3,5 м от места дефекта, значения СКО датчика уменьшаются

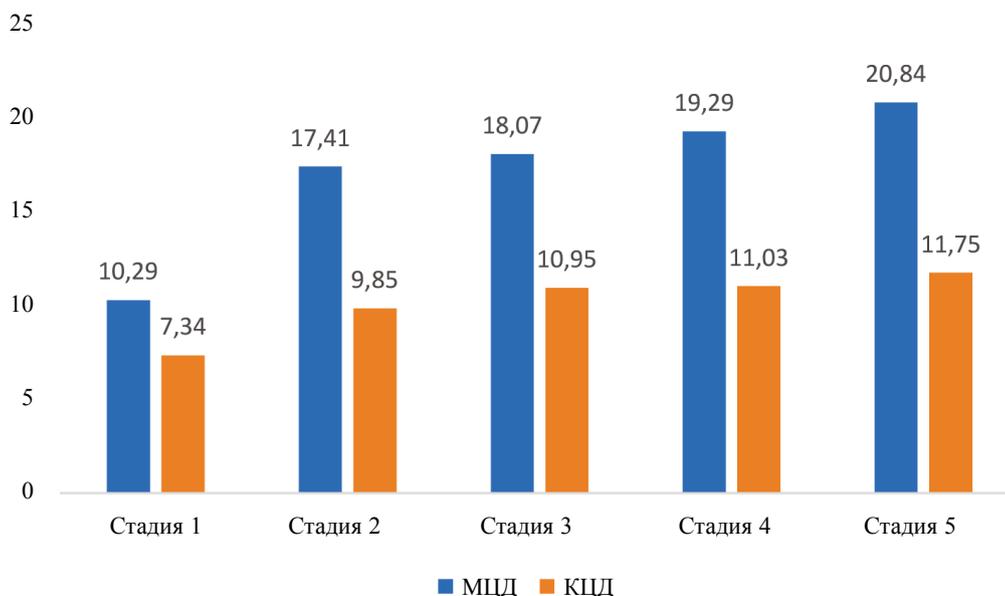


Рис. 17. SKO для обоих датчиков в положении 1 при наличии дефекта.

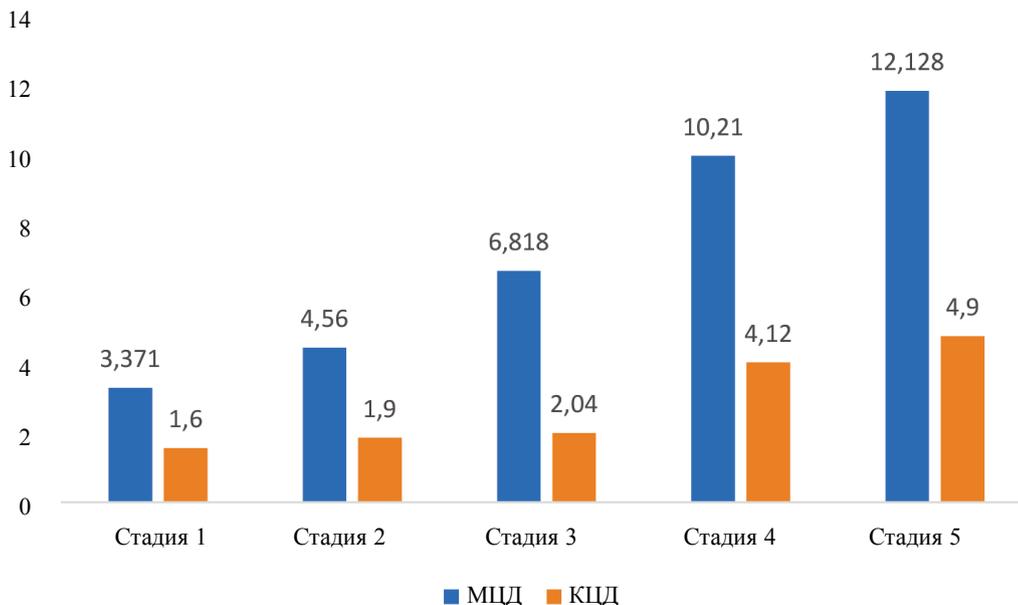


Рис. 18. SKO для обоих датчиков в положении 2 при наличии дефекта.

по сравнению с датчиками, установленными в точках 1 и 2. По мере увеличения расстояния от места дефекта чувствительность датчика снижается, а для КЦД она снижается еще больше из-за эффекта сдвигового запаздывания. В этом случае между датчиком и объектом не происходит полной передачи деформации. В случае КЦД чувствительность снижается в точках 2 и 3 гораздо сильнее, поэтому для обнаружения повреждений с помощью КЦД датчик должен быть прикреплен не ближе 2 м от места повреждения. В то же время, как и в случае МЦД, чувствительность датчика снижается незначительно, поэтому его можно использовать на расстоянии до 3,5 м от места дефекта.

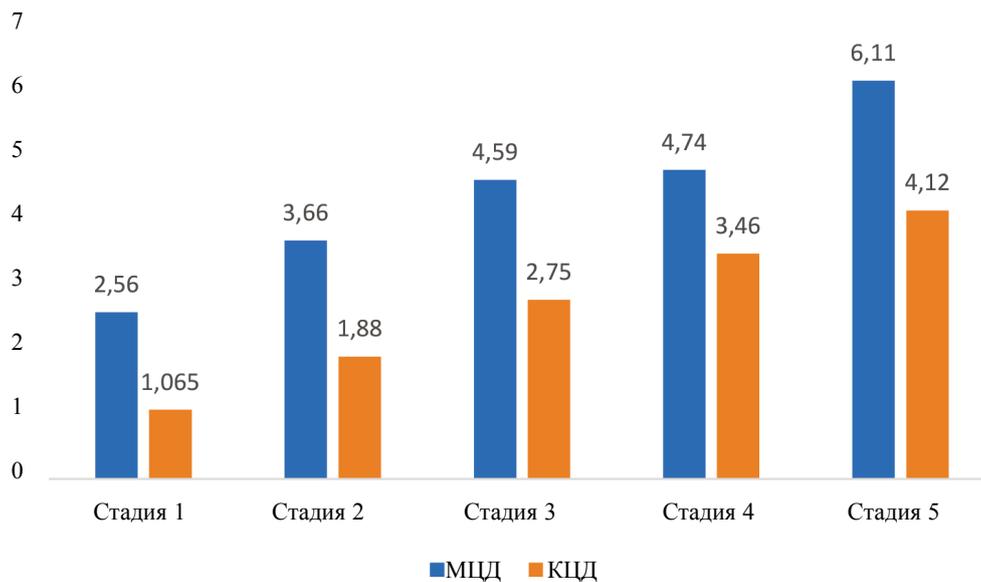


Рис. 19. СКО для обоих датчиков в положении 3 при наличии дефекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В методе ЭМИ исследователями были предложены различные датчики. Они имеют свои преимущества и недостатки. В данной работе сравниваются эффективность и диапазон чувствительности КЦД и МЦД. Эффективность МЦД выше, чем КЦД, из-за отсутствия эпоксидного слоя между ЦТС-пластиной и конструкцией. Из-за эпоксидного слоя в КЦД возникает эффект задержки сдвига, деформация, передаваемая ЦТС-пластиной на объект контроля и обратно, уменьшается. Область чувствительности МЦД достигает 3,5 м, в то время как область чувствительности КЦД составляет менее 2,0 м при контроле стальной балки.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kostin V., Vasilenko O., Filatenkov D. Y., Chekasina Y. A., Serbin E.* Magnetic and magnetoacoustic testing parameters of the stressed-strained state of carbon steels that were subjected to a cold plastic deformation and annealing // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015. V. 51. No. 10. P. 624—632.
2. *Kostin V., Nichipuruk A., Nikolaeva L., Sokolova S., Smorodinskii Y. G., Vasilenko O.* Magnetic testing of hardness of cast railcar steel 32X06Л after quenching and high-temperature tempering // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. V. 52. No. 12. P. 716—721.
3. *Kostin V., Vasilenko O., Mikhailov A., Lukinykh N., Ksenofontov D.* On the advantages of local measurement of coercive force of ferromagnetic objects based on internal field // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 7. P. 574—580.
4. *Bhalla S., Soh C. K.* Electromechanical impedance modeling for adhesively bonded piezo-transducers // *Journal of intelligent material systems and structures*. 2004. V. 15. No. 12. P. 955—972.
5. *Crawley E.F., De Luis J.* Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures // *AIAA Journal*. 1987. V. 25. No. 10. P. 1373—1385.
6. *Sirohi J., Chopra I.* Fundamental understanding of piezoelectric strain sensors // *Journal of intelligent material systems and structures*. 2000. V. 11. No. 4. P. 246—257.
7. *Yang Y., Divsholi B.S., Soh C.K.* A reusable PZT transducer for monitoring initial hydration and structural health of concrete // *Sensors*. 2010. V. 10. No. 5. P. 5193—5208.
8. *Tawie R., Lee H.-K.* Characterization of cement-based materials using a reusable piezoelectric impedance-based sensor // *Smart Materials and Structures*. 2011. V. 20. No. 8. P. 085023.
9. *Quinn W., Kelly G., Barrett J.* Development of an embedded wireless sensing system for the monitoring of concrete // *Structural Health Monitoring*. 2012. V. 11. No. 4. P. 381—392.
10. *Kim J., Kim J.-W., Park S.* Early-age concrete strength estimation technique using embedded piezoelectric self-sensing impedance / In *EWSHM-7th European workshop on structural health monitoring*, 2014. Inria.

11. Lu X., Lim Y.Y., Soh C.K. Investigating the performance of «Smart Probe» based indirect EMI technique for strength development monitoring of cementitious materials—Modelling and parametric study // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 172. P. 134—152.
12. Liu P., Hu Y., Chen Y., Geng B., Xu D. Investigation of novel embedded piezoelectric ultrasonic transducers on crack and corrosion monitoring of steel bar // *Construction and Building Materials*. 2020. V. 235. P. 117495.
13. Pan H. H., Huang M.-W. Piezoelectric cement sensor-based electromechanical impedance technique for the strength monitoring of cement mortar // *Construction and Building Materials*. 2020. V. 254. P. 119307.
14. Wang D., Zhu H. Monitoring of the strength gain of concrete using embedded PZT impedance transducer // *Construction and Building Materials*. 2011. V. 25. No. 9. P. 3703—3708.
15. Na S., Lee H.-K. A multi-sensing electromechanical impedance method for non-destructive evaluation of metallic structures // *Smart materials and structures*. 2013. V. 22. No. 9. P. 095011.
16. Wang T., Wei D., Shao J., Li Y., Song G. Structural stress monitoring based on piezoelectric impedance frequency shift // *Journal of Aerospace Engineering*. 2018. V. 31. No. 6. P. 04018092.
17. Priya C.B., Saravanan T.J., Balamonica K., Gopalakrishnan N., Rao A.R.M. EMI based monitoring of early-age characteristics of concrete and comparison of serial/parallel multi-sensing technique // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 191. P. 1268—1284.
18. Moharana S., Bhalla S. Development and evaluation of an external reusable piezo-based concrete hydration-monitoring sensor // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2019. V. 30. No. 18—19. P. 2770—2788.
19. Chen D., Huo L., Song G. EMI based multi-bolt looseness detection using series/parallel multi-sensing technique // *Smart Struct. Syst.* 2020. V. 25. P. 423—432.
20. Kocherla A., Subramaniam K.V. Embedded electrical impedance-based PZT sensor for monitoring hydrating concrete: development and evaluation // *Smart Materials and Structures*. 2020. V. 29. No. 5. P. 055038.
21. Negi P., Chhabra R., Kaur N., Bhalla S. Health monitoring of reinforced concrete structures under impact using multiple piezo-based configurations // *Construction and Building Materials*. 2019. V. 222. P. 371—389.
22. Li W., Wang J., Liu T., Luo M. Electromechanical impedance instrumented circular piezoelectric-metal transducer for corrosion monitoring: modeling and validation // *Smart Materials and Structures*. 2020. V. 29. No. 3. P. 035008.
23. Li L., Xia Y., Chen G. Experimental and numerical studies of debonding monitoring of FRP shear-strengthened beams using EMI technique // *Journal of Aerospace Engineering*. 2018. V. 31. No. 5. P. 04018048.
24. Liang Y., Li D., Parvasi S. M., Kong Q., Song G. Bond-slip detection of concrete-encased composite structure using electro-mechanical impedance technique // *Smart Materials and Structures*. 2016. V. 25. No. 9. P. 095003.
25. Fan S., Li W., Kong Q., Feng Q., Song G. Monitoring of pin connection loosening using electromechanical impedance: Numerical simulation with experimental verification // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2018. V. 29. No. 9. P. 1964—1973.
26. Guo B., Chen D., Huo L., Song G. Monitoring of grouting compactness in tendon duct using multi-sensing electro-mechanical impedance method // *Applied Sciences*. 2020. V. 10. No. 6. P. 2018.
27. Shanker R., Bhalla S., Gupta A., Praveen Kumar M. Dual use of PZT patches as sensors in global dynamic and local electromechanical impedance techniques for structural health monitoring // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2011. V. 22. No. 16. P. 1841—1856.
28. Liang C., Sun F.P., Rogers C.A. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems—determination of the actuator power consumption and system energy transfer // *Journal of intelligent material systems and structures*. 1997. V. 8. No. 4. P. 335—343.
29. Bhalla S., Soh C. K. Electromechanical impedance modeling for adhesively bonded piezo-transducers // *Journal of intelligent material systems and structures*. 2004. V. 15. No. 12. P. 955—972.
30. PI Ceramic 2021 Product Information Catalogue (Germany: Lindenstrabe) <http://www.piceramic.com>

МОСКВА
ЦВК ЭКСПОЦЕНТР

24-26 ОКТЯБРЯ 2022

IX МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ
ИСПЫТАНИЯ · ДИАГНОСТИКА



ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова»
приглашает принять участие в выездном повышении квалификации
по программе

«Современные тенденции развития неразрушающего контроля, технической диагностики и их метрологическое обеспечение»

Повышение квалификации будет организовано в рамках **IX Международного промышленного форума «TERRИТОРИЯ NDT»**, который будет проходить 24—26 октября 2022 в Москве, ЦВК ЭКСПОЦЕНТР.

Темы учебного плана повышения квалификации

- Переход от неразрушающего контроля к мониторингу технического состояния и технической диагностике
- Цифровизация неразрушающего контроля
- Проблемы подготовки специалистов в области НК в системе высшего и среднего профессионального образования
- Автоматический и автоматизированный неразрушающий контроль объектов повышенной опасности
- Проблемы нормативного регулирования и метрологического обеспечения средств и методов НК
- Методы неразрушающего контроля и антитеррористическая техника
- Методы и приборы биомедицинской диагностики
- Современные оптические методы НКНК композиционных материалов в авиастроении

Повышение квалификации рекомендовано руководителям организаций и специалистам в области неразрушающего контроля, а также профессорско-преподавательскому составу ВУЗов, ведущих обучение по направлению 12.03.01 Приборостроение, по профилю «Приборы и методы контроля качества и диагностики».

Срок образовательной программы **24 часа**. **Форма** обучения: **очная**
Стоимость курса повышения квалификации составляет **7 500р.**

Заявки и вопросы направлять по адресу:

426069 г. Ижевск, ул. Студенческая, д.7
Научно-образовательный центр
«Приборы и методы неразрушающего контроля»

Контактное лицо: Логунова Мария Григорьевна
Тел.: (3412) 77-60-55, доб. 7-110

E-mail: logunova_mariya@bk.ru, omtc11@mail.ru

Директор НОЦ «ПМНК»
М.А. Синцов