Российская академия наук

# *ДЕФЕКТОСКОПИЯ*

Журнал ежемесячный Основан в феврале 1965 года Екатеринбург № 9 2021

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Акустические методы

А.Е. Базулин, Е.Г. Базулин, А.Х. Вопилкин, Д.С. Тихонов. Восстановление изображения	
отражателей на границе основного металла и сварного соединения с использованием ультразвуковых	
антенных решеток	3
<b>Л.Н. Степанова, М.М. Кутень, А.Л. Бобров.</b> Использование амплитудного анализа сигналов акустической эмиссии при циклическом и статическом нагружении стальных образцов	18
М. Дж. Ранджбар, Сина Содагар. Исследование применимости при контроле дефектов высокочастотных мод направленных волн с помощью фазированных решеток	27
Ю.Г. Матвиенко, И.Е. Васильев, Д.В. Чернов, В.И. Иванов, С.В. Елизаров. Проблемы локации источников акустической эмиссии	35
Радиационные методы	
А.А. Демидов, О.А. Крупнина, Н.А. Михайлова, Е.И. Косарина. Рентгенотомографическое исследование объемной доли пор в образцах из полимерных композиционных материалов. Сканирование и реконструкция томографических данных	45

#### Электромагнитные методы

B.A.	Сясько,	А.Ю.	Васильев.	Импульсный	магнитный	контроль	толщины	металлических	
покрытий.									63

УДК 620.179.162 : 534.87

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ НА ГРАНИЦЕ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА И СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

© 2021 г. А.Е. Базулин<sup>1</sup>, Е.Г. Базулин<sup>1,\*</sup>, А.Х. Вопилкин<sup>1</sup>, Д.С. Тихонов<sup>1</sup>

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

Поступила в редакцию 22.05.2021; после доработки 15.07.2021 Принята к публикации 21.07.2021

Предлагается эффективный способ замены зональной фокусировки антенной решеткой, традиционно используемый при автоматизированном ультразвуковом контроле сварных соединений с узкой разделкой для выявления дефектов на границе сплавления. Этот способ, основанный на применении многосхемной технологии цифровой фокусировки антенной (ЦФА), позволяет получать и анализировать высококачественные изображения отражателей. Предлагаемый метод по сравнению с зональной фокусировкой, сделанной по технологии фазированных антенных решеток (ФАР), менее чувствителен к точности позиционирования антенной решетки относительно оси шва и к изменению толщины объекта контроля, позволяет выполнять оценку высоты дефектов не по амплитудному признаку, а по размерам бликов отражателей.

Ключевые слова: антенная решетка, двойное сканирование, FullMatrixCapture (FMC), тройное сканирование, C-SAFT, TotalFocusingMethod (TFM), цифровая фокусировка антенной (ЦФА), зональная фокусировка.

**DOI:** 10.31857/S0130308221090013

## 1. ВВЕДЕНИЕ

При монтаже сварных соединений магистральных трубопроводов, кроме соблюдения требований достоверности контроля, необходимо обеспечивать высокую скорость ультразвукового контроля, сопоставимую со скоростью выполнения сварки. При использовании автоматической сварки для трубы диаметром 800 мм и толщиной 25 мм в смену могут быть готовы к контролю 20 сварных швов и более, поэтому актуально применение методов и систем автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК), позволяющих выполнять контроль, включая проверку настроек, сбор данных и расшифровку данных для одного сварного шва в среднем за 10—15 мин.

Обзор стандартов на применение АУЗК сварных швов трубопроводов с применением зонального контроля приведен, например, в [1]. Общие требования к такому контролю таковы:

контроль выполняется за один проход сканера вокруг трубы;

обеспечивается выявление плоскостных дефектов по границам сплавления (обычно имитируемых плоскодонными отверстиями (ПДО) диаметром 2-3 мм и пазами, выходящими на поверхность) и объемных дефектов в наплавленном металле (имитируемых боковыми цилиндрическими или плоскодонными отверстиями диаметром порядка 1 мм);

высокие требования к позиционированию пьезопреобразователей (ПЭП) относительно кромки (± 1 мм) и к допуску на толщину стенок трубы (± 1 мм);

применение раздельных схем контроля типа «тандем» с отражением от донной поверхности (и в ряде случаев наружной) для выявления дефектов на границе сплавления швов с узкой (менее 15—20 град) разделкой;

выполнение калибровки в динамическом режиме на образце, содержащем калибровочные отражатели, расположенные по всей зоне контроля.

Системы зонального контроля, реализующие такой подход с применением множества традиционных преобразователей, были разработаны и применялись с 1980-х годов. В 2000-х с развитием многоканальной электроники стала возможной быстродействующая реализация тех же схем контроля, но с применением антенных решеток (АР). Пример применения моделирования зонального контроля при аттестации методики и системы контроля в соответствии с требованиями стандарта DNV OS F101 с технологией лучевых трубок приведен в работе [2].

В настоящее время для восстановления изображения отражателей в объекте контроля используются две технологии: технология фазированных антенных решеток (ФАР) [3], которая на сегодняшний день является наиболее распространенной, и технология цифровой фокусировки антенной (ЦФА) [4, 5]. В статье [6], посвященной сравнению возможностей ФАР- и ЦФА-дефектоскопов, сделан вывод, что ЦФА-технология более перспективна с алгоритмической точки зрения.

Эффективным способом обнаружения плоскостных дефектов является работа с эхосигналами, отраженными от поверхности трещины, которые формируются при нечетном количестве отражений импульса от границ объекта контроля. Такие импульсы возникают при падении на трещину импульса на прямом луче, а прием происходит при однократном отражении от дна объекта контроля (схема контроля типа «тандем»). При использовании для контроля ФАРдефектоскопов возникает проблема секторной визуализации для нечетных схем контроля. Поэтому применение технологии зональной ФАР-фокусировки предполагает, что граница сварного соединения разбивается на несколько зон для которых рассчитывается законы фокусировки на излучение и прием [7—9]. С помощью стробов происходит селекция нужных эхосигналов по каждой зоне, максимальная амплитуда которых выводится на экран ФАР-дефектоскопа при сканировании вдоль сварного соединения АР. Для оценки высоты отражателей анализируются амплитуды эхосигналов (кривые амплитуда-высота), в том числе при совместном анализе данных, полученных по соседним зонам. На практике сложности при использовании ФАРзонального контроля заключаются в высоких требованиях к позиционированию АР, недопустимости внутренних проточек, разнотолщинности не более чем  $\pm 1$  мм и обширной программой квалификации системы контроля. Также подобный метод контроля чувствителен к изменениям температуры трубы и призмы, это приводит к изменению законов фокусировки и необходимости их тщательного подбора, чтобы динамическая калибровка прошла успешно.

Использование ЦФА-технологии позволяет восстановить изображения несплавления по границе сварного соединения, размеры которого определяется как расстояние между маркерами, установленными на границы блика несплавления [10—13]. В отличие от методов, основанных лишь на анализе амплитуды эхосигнала, ЦФА-технология снижает влияние ориентации и формы дефекта на результат измерения [14].

# 2. ЦФА-ТЕХНОЛОГИЯ, КАК ЗАМЕНА ЗОНАЛЬНОЙ ФАР-ТЕХНОЛОГИИ

Восстановление изображения отражателей методом ЦФА происходит в два этапа. На первом этапе AP измеряются эхосигналы в режиме двойного сканирования [15] для любой пары излучатель—приемник. В зарубежной литературе такой режим регистрации эхосигналов называется Full Matrix Capture (FMC) [16]. На втором этапе по измеренным эхосигналам изображение отражателей восстанавливается методом комбинированного SAFT (C-SAFT) [17]. Метод C-SAFT в литературе, посвященной ультразвуковому контролю, называется Total Focusing Method (TFM) [18].

Для того чтобы восстановить изображение границы отражателя методом C-SAFT нужно зарегистрировать эхосигналы, отраженные от его границы. Для вертикально ориентированных трещин работа на прямом луче не позволяет измерить эхосигналы, зеркально отраженные от ее поверхности. Удается измерить только дифракционные сигналы от краев трещины и в результате ее изображение (образ) будет представлен двумя бликами с относительно малыми амплитудами, соответствующими ее краям. Зарегистрировать эхосигналы от поверхности трещины можно в случае, когда импульс отражается нечетное число раз от границ объекта контроля. В этом случае методом C-SAFT можно восстановить изображение поверхности трещины в заданной области (OBИ). На рис. 1 показана AP на призме на расстоянии  $x_w$  от центра сварного соединения, объект контроля и трещина с углом наклона  $\alpha$ , изображение которой нужно восстановить. Граница сварного соединения показана пунктирной линией черного цвета. Стрелками красного цвета<sup>1</sup> показаны лучи, по которым распространяются поперечные волны, при излучении и после однократного отражения от дна образца. Путь распространения продольной волны в призме показан стрелками зеленого цвета. В дальнейшем цветовое соответствие продольной (зеленый цвет) и поперечной (красный цвет) волны будет сохранено.

Под акустической схемой, которую обозначим как *as*, будем подразумевать описание лучевой траектории распространения импульса от излучателя до приемника при отражении от неровных границ объекта контроля с учетом трансформации типа волны. Акустическая схема будет определяться последовательностью букв L (продольная волна), T (поперечная волна) и буквы d (отражение от несплошности). Обозначение акустической схемы, показанной на рис. 1, будет следующим — TdTT.

Изображение отражателей по измеренным эхосигналам  $p(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t)$  можно получить методом C-SAFT [17] по формуле:

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Использование цвета для пояснения рисунков доступно только в электронном варианте статьи или в ее печатном издании журнала «Дефектоскопия».



Рис. 1. Схематическое изображение луча по нечетной акустической схеме TdTT (одно отражение от границы объекта контроля).

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}(\mathbf{r}_{i};as) = \int_{S_{t}} \int_{S_{r}} p(\mathbf{r}_{r},t-t_{del}(\mathbf{r}_{r},\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{i};as)+t_{\max}) d\mathbf{r}_{r} d\mathbf{r}_{t}, \qquad (1)$$

где  $S_t$  и  $S_r$  — апертура излучения и приема;  $t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i; as)$  — время пробега импульса от излучателя  $\mathbf{r}_t$  до точки  $\mathbf{r}_i$  и к приемнику  $\mathbf{r}_i$  для заданной акустической схемы as;  $t_{max}$  — время нарастания импульса. Для расчета времени пробега импульса по лучевой траектории можно воспользоваться вариационным принципом Ферма [19] или методом трассировки [20].

Парциальные изображения, восстановленные для  $N_{as}$  акустических схем по формуле (1), можно объединить в итоговое изображение как сумму или медиану модулей:

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}(\mathbf{r}_i) = \sum_{n=1}^{N_{as}} |\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}(\mathbf{r}_i; as_n)|, \qquad (2)$$

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}(\mathbf{r}_{i}) = \bigwedge_{\delta=1}^{N_{as}} \left( T(|\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}(\mathbf{r}_{i};as_{n}),l)|) \right), \text{ где } l = \left\langle |\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}(\mathbf{r}_{i};as_{n}))| \right\rangle,$$
(3)

где M — операция медианы для  $N_{as}$  парциальных изображений, T — операция отсечки по уровню l, равному среднему значению парциального изображения. Следует отметить, что получение объединенного изображения по формуле (3) особенно эффективно для точечных отражателей или для краев трещин. И, конечно, эти два способа объединения не исчерпывают все варианты работы с парциальными изображениями.

# 2.1. Влияние на качество контроля смещения призмы от центра сварного соединения и толщины образца

ЦФА-технология позволяет избавиться от некоторых ограничений зональной ФАР-фокусировки. Так, при изменении расстояния  $x_w + \Delta x_w$  установки призмы от центра сварного соединения блики отражателя на ЦФА-изображении только сместятся по оси *x* на расстояние  $\Delta x_w$ , не потеряв своей фокусировки. При использовании зональной ФАР-фокусировки импульсы от отражателя могут выйти за пределы строба и отражатель будет пропущен. Если увеличить длину строба, в его пределы могут попасть эхосигналы от других отражателей и может случиться так, что будет обнаружен отражатель, которого нет на границе разделки. В разделе 3 показано, что изменение расстояния от призмы до центра сварного соединения в пределах ±5 мм приводят к отклонению амплитуды изображения имитатора дефекта на более чем на ±2 дБ. При изменении толщины объекта контроля  $h + \Delta h$  блики отражателя на ЦФА-изображении сместятся на разные расстояния для разных акустических схем — чем больше отражений от границ объекта контроля, тем больше сместится блик от своего правильного положения. Блик отражателя на ЦФА-изображении для одной акустической схеме незначительно исказит свою форму, что позволит выявить отражатель и достаточно точно измерить его размеры. Но при объединении нескольких ЦФА-изображений, восстановленных по разным акустическим схемам, блик отражателя существенно изменит свою форму, и размеры отражателя будут определены с большой ошибкой, сопоставимой со степенью отклонения толщины трубы от номинального значения. Влияние толщины трубы и наличия проточек для зональной ФАР-фокусировки принципиально опять же в силу требования попадания сигнала от дефекта в пределы заданного строба.

# 2.2. Автоматизация выбора акустических схем

Для случая двух максимально возможных отражений импульсов от границ объекта контроля и с учетом эффекта трансформации типа волны полное число акустических схем при излучении будет равно 14: из них 2 акустические схемы на прямом луче, 4 схемы для случая одного отражения, и 8 акустических схем для двух отражений от границ. Полное число акустических схем на излучение и на прием будет равно  $14 \times 14 = 196$ . Так как для восстановления изображения вертикально ориентированных трещин нужно использовать нечетные схемы, то число акустических схем сократится до 80, а если брать только верхний или нижний треугольник матрицы  $14 \times 14$ , то акустических схем остается только 40. Понятно, что из-за разных углов преломления и отражения, для которых будут разные по величине коэффициенты преломления и отражения, далеко не все схемы позволяют получить качественное изображение дефектов. Вручную просматривать 40 изображений довольно трудоемкая задача, поэтому для автоматического определения значимых акустических схем применялся следующий корреляционный алгоритм. Базовым изображением  $\hat{\mathbf{\varepsilon}}(\mathbf{r}_i; as)$  полагалось изображение, восстановленное по акустической схеме TdTT (см. рис. 1). Его корреляция с изображениями  $\hat{\mathbf{\varepsilon}}(\mathbf{r}_i; as_n)$  на других схемах рассчитывалась как

$$C(\Delta x, \Delta z; as_n) = \int \hat{\mathbf{\varepsilon}}(x_i, z_i; \mathrm{T}\mathrm{d}\mathrm{T}\mathrm{T}) \hat{\mathbf{\varepsilon}}^*(x_i - \Delta x, z_i - \Delta z; as_n) dx_i dz_i, \tag{4}$$

где значком \* обозначена операция комплексного сопряжения. Анализ амплитуды корреляционной функции  $C(\Delta x, \Delta z; as_n)$  и величины смещения ( $\Delta x, \Delta z$ ) ее максимума позволяет автоматизировать выбор значимых акустических схем по заданному уровню. Как будет показано в разделе 3, количество значимых акустических схем для ПДО на разных глубинах оказалось равным от 4 до 6, что почти на порядок меньше полного числа 40. Работа только со значимыми акустическими схемами примерно на порядок повысит скорость расчета изображения отражателей и повысит отношение сигнал/шум.

#### 2.3. Повышение качества изображения

Для дополнительного повышения качества изображения использовался следующий прием. При известном угле  $\alpha$  границы сварного соединения для каждой точки  $\mathbf{r}_i$  ОВИ можно рассчитать количество пар  $\mathbf{M}(\mathbf{r}_i; as_n)$  излучатель—приемник, для которых луч, зеркально отразившись от границы несплавления в пределах допуска  $\Delta \alpha$ , будет принят АР. Если рассчитанную маску  $\mathbf{M}(\mathbf{r}_i; as_n)$  умножить на восстановленное изображение

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{M}(\mathbf{r}_{i};as_{n}) = \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}(\mathbf{r}_{i};as_{n})\mathbf{M}(\mathbf{r}_{i};as_{n}), \tag{5}$$

то это уменьшит количество ложных бликов в изображении  $\hat{\mathbf{\varepsilon}}_{M}(\mathbf{r}_{i};as_{n})$ . Используя изображения  $\hat{\mathbf{\varepsilon}}_{M}(\mathbf{r}_{i};as_{n})$  в формулах (2) и (3), можно повысить качество объединенного изображения. При практической реализации предлагаемого алгоритма, когда важна скорость проведения контроля, можно использовать не все пары излучатель—приемник, а только те, которые регистрируют зер-кально отраженный от границы сварного соединения луч.

#### 3. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные эксперименты проводили с использованием дефектоскопа «АВГУР АРТ», разработанного и изготовляемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [21]. Наклон дна ПДО



Рис. 2. Фотография образца со стороны грани с четырьмя ПДО диаметром 3,5 мм. АР установлена для измерения эхосигналов от ПДО № 2.

был равен 7 град, что является характерным значением угла наклона разделки для технологий автоматической сварки, применяемой при монтаже трубопроводов.

# 3.1. ПДО диаметром 3,5 мм, антенная решетка из 32 элементов

Эхосигналы регистрировались AP (5 МГц, 32 элемента, размеры пьезоэлемента  $0,9 \times 10$  мм, зазор между элементами 0,1 мм), установленной на рексолитовую 35-градусную призму со стрелой 29 мм. В стальном образце толщиной 20 мм были ПДО диаметром от 2 до 3,5 мм, расположенные на разных глубинах. На рис. 2 приведена фотография образца и AP на призме, находящийся на расстоянии  $x_w = -17$  мм от ПДО № 2. Ось *у* направлена вдоль «сварного соединения».

# 3.1.1. ПДО № 4

На рис. За показано изображение дна ПДО № 4, полученное как сумма всех 40 парциальных изображений, восстановленных по нечетным акустическим схемам по формуле (1), а на рис. Зб — как сумма, но с учетом маски  $\mathbf{M}(\mathbf{r}_i; as_n)$  согласно формуле (5). Уровень шума уменьшился более чем на 8 дБ и число ложных бликов сократилось. Изображение на рис. Зб более пригодно для анализа либо оператором, либо программой автоматического распознавания и определения размеров отражателя.



Рис. 3. ЦФА-изображение дна ПДО № 4 по полному набору нечетных акустических схем: a — по формуле (2);  $\delta$  — по формуле (5).



Рис. 4. ЦФА-изображения, восстановленные по акустическим схемам: TdTT (a), TTdLTL (б) и LTdTTT (в).

Как упоминалось в разделе 2.2, не все акустические изображения представляют интерес. На рис. 4 для примера показаны ЦФА-изображения, полученные по трем акустическим схемам: TdTT (*a*), TTdLTL ( $\delta$ ) и LTdTTT (*b*), которые выбирались согласно методике изложенной в разделе 2.2. В левом верхнем углу каждого изображения схематически показан ход лучей каждой акустической схемы. Условные амплитуды бликов соответственно равны: 2,9, 4,3 и 1,9. Исходя из максимальной амплитуды блика и уровня шума, изображение, восстановленное по акустической схеме TTdLTL (рис. 4 $\delta$ ), можно признать лучшим из трех представленных.

На рис. 5*а* показано представлены значимые амплитуды корреляционной функции  $C(\Delta x, \Delta z; as_n)$ , полученные по 40 нечетным акустическим схемам согласно формуле (4). Как и предполагалось из 40 акустических схем значимые амплитуды бликов имеют только изображения для 6 акустических схем: TdTT, TdLL, LdLT, TTdTTL, TTdLLT и LTdTTT. Уровень отсечки показан на рисунках горизонтальной пунктирной линией красного цвета. Так как корреляционные функции не нормировались к единице, то на рис. 5*a* они имеют условные значения. Понятно, что для другого удаления  $x_w$  от центра сварного соединения или при изменении угла кромки набор акустических схем может измениться.



Рис. 5. Амплитуды бликов ЦФА-изображений дна ПДО № 4 для разных акустических схем (*a*); полученное по формуле (3) ЦФА-изображение по значимым схемам (*б*).

На рис. 56 показано изображение дна ПДО, полученное по формуле (3) по списку значимых акустических схем. Объединенное изображение на рис. 56 (по сравнению с изображениями на рис. 36) практически не имеет ложных бликов. Однако парциальные изображения на рис. 4*a* и 46 достаточно высокого качества для обнаружения несплошности и для оценки ее размеров, и каждое из них может быть получено в несколько раз быстрее, чем изображение на рис. 56.

#### 3.1.2. ПДО № 3

На рис. 6а представлены значимые амплитуды корреляционной функции для всех нечетных акустических схем, из которых целесообразно использовать только 5. На рис. 66 показано изображение дна ПДО, полученное по формуле (3) по списку значимых акустических схем. Восстановленное изображение имеет отношение сигнал/шум больше 20 дБ и позволяет уверено решить задачу обнаружения несплошности и оценить ее размеры.



Рис. 6. Амплитуды бликов ЦФА-изображений дна ПДО № 3 для разных акустических схем (*a*); полученное по формуле (3) ЦФА-изображение по значимым схемам (*б*).

# 3.1.3. ПДО № 2

На рис. 7*а* показаны значимые амплитуды корреляционной функции для всех нечетных акустических схем, из которых целесообразно использовать только 5. На рис. 7*б* показано изображение дна ПДО, полученное по формуле (3) по списку значимых акустических схем. Восстановленное изображение позволяет уверено решить задачу обнаружения несплошности и оценить ее размеры.



Рис. 7. Амплитуды бликов ЦФА-изображений дна ПДО № 2 для разных акустических схем (*a*); полученное по формуле (3) ЦФА-изображение по значимым схемам (*б*).

# 3.1.4. ПДО № 1

На рис. 8*а* представлены значимые амплитуды корреляционной функции для всех нечетных акустических схем, из которых целесообразно использовать только 4. На рис. 8*б* показано изображение дна ПДО, полученное по формуле (3) по списку значимых акустических схем. Амплитуда блика по акустической схеме TdTT уменьшилась более чем в 2,5 раза по сравнению бликами ПДО 4, 3 и 2. Тем не менее объединенное изображение позволяет уверено решить задачу обнаружения несплошности и оценить ее размеры.



Рис. 8. Амплитуды бликов ЦФА-изображений дна ПДО № 1 для разных акустических схем (*a*); полученное по формуле (3) ЦФА-изображение по значимым схемам (б).

# 3.1.5. Выбор акустических схем

На рис. 9 показаны амплитуды бликов четырех ПДО для значимых акустических схем. Анализ этого графика позволяет для заданного значения  $x_w$  выбрать набор акустических схем для получения изображений бликов всех четырех ПДО примерно одинаковой амплитуды.



Рис. 9. Амплитуды бликов четырех ПДО для значимых акустических схем.

#### 3.1.5.1. Набор акустических схем номер 1

В табл. 1 приведен набор акустических схем для проведения контроля образца толщиной 20 мм с углом наклона разделки сварного соединения 7 град при отступе от центра шва –17 мм. Только для обнаружения ПДО № 4 расположенного у самой поверхности эффективнее использовать аку-

Таблица 1

Номер ПДО	Акустическая схема	Амплитуда	Разница, дБ
4	TdTT	2,85E+06	-1,25
3	TdTT	3,29E+06	0,00
2	TdTT	2,69E+06	-1,77
1	LTdTTT	3,18E+06	-0,30

Набор акустических схем номер 1 для зонального контроля

стическую схему LTdTTT. Обнаружить остальные ПДО можно по изображению, восстановленному по схеме TdTT. Отметим, что максимальный разброс амплитуд бликов четырех ПДО около 1,8 дБ.

На рис. 10 показан график амплитуд бликов ПДО диаметром 3,5 мм, определенных по ЦФАизображениям, восстановленным по акустической схеме TdTT, в зависимости от расстояния от призмы  $x_w$  от центра сварного соединения, изменяющегося в диапазоне от -58 до -3 мм. Видно, что амплитуда ПДО № 1, расположенного у поверхности, на 12 дБ меньше, чем амплитуды бликов остальных ПДО. На графиках для амплитуд ПДО № 4, 3 и 2 виден провал, который объясняется особенностью поведения коэффициента отражения поперечной волны в поперечную за третьим критическим углом. До третьего критического угла ( $x_w > -10$  мм) коэффициент отражения имеет фазу равную 180 град и формирование изображения по формуле (1) происходит по эхосигналам одинаковой фазы, а после третьего критического угла ( $x_w < -10$  мм) фаза коэффициента отражения меняется в зависимости от угла падения, что приводит к изменению фазы отраженного эхосигнала. Причем сразу за третьим критическим углом фаза меняется особенно быстро. В результате чего формула (1) работает не эффективно. Для устранения этого эффекта нужно учитывать изменение фазы эхосигналов при преломлении и отражении эхосигналов [13]. Это особенно важно, если общее количество отражений от границ объекта контроля больше трех.



Рис. 10. График амплитуды бликов ПДО диаметром 3,5 мм в зависимости от положения призмы (схема TdTT).

Для подготовки изображения отражателей с целью его дальнейшей автоматизированной обработки (распознавания типа отражателя и определения его размеров) в теории обработки изображений разработано множество текстурных фильтров. Основная идея применения текстурного фильтра — это выделение областей с отражателями и без оных. Один из текстурных фильтров — это адаптивный анизотропный диффузный фильтр (AADF) [22]. Авторам этого алгоритма удалось провести аналогию между текстурной обработкой изображения и процессом диффузии (распространения тепла). АADF проводит селекцию бликов по крутизне фронтов и по сути бинаризует изображение отражателей, позволяя сконцентрировать внимание на бликах, за которыми скрываются потенциальные дефекты [23].

На рис. 11*а* показано изображение дна ПДО № 1, восстановленное по акустической схеме LTdTTT, и результат его обработки текстурным фильтром AADF (рис. 11*б*). В верхней левой части рисунка показана пиктограмма акустической схемы.



Рис. 11. ЦФА-изображение дна ПДО № 1, восстановленное по акустической схеме LTdTTT (*a*), и результат применения текстурного фильтра AADF (*б*).

# 3.1.5.2. Набор акустических схем номер 2

В табл. 2 приведен второй вариант возможного набора акустических схем. Максимальный разброс амплитуд бликов четырех ПДО уже около 1 дБ. Использование этого набора позволяет проводить настройку чувствительности по образцу с одним ПДО.

Таблица 2

Набор акустических схем номер 2 для зонального контроля

Номер ПДО	Акустическая схема	Амплитуда	Разница, дБ
4	TTdLLT	4,28E+06	-0,56
3	TTdLLT	4,57E+06	0,00
2	TTdLLT	4,07E+06	-1,01
1	TTdTTT	4,42E+06	-0,29

На рис. 12*а* показано ЦФА-изображение дна ПДО № 1, восстановленное по акустической схеме TTdTTT. В верхней правой части рисунка показана пиктограмма акустической схемы. На ЦФА-изображении на нулевой глубине хорошо заметен ложный блик. Его появление связано с тем,



Рис. 12. ЦФА-изображение (*a*) дна ПДО № 1, восстановленное по акустической схеме TTdTTT, и результат применения текстурного фильтра AADF (*б*).

что дно ПДО находится близко к поверхности образца и время прихода эхосигналов по акустическим схемам TLdTTT, TTdLTT и им подобным примерно одинаковы. В результате происходит когерентное сложение бликов по нескольким акустическим схемам. По этой же причине блик дна ПДО №1 имеет несимметричную форму (в отличие от блика на рис. 11*a*). В случае ПДО № 2, 3 и 4 блики по указанным схемам разделяются в пространстве из-за большей глубины залегания. На ААDF-изображении ложного блика нет, но форма блика по-прежнему не симметричная (рис. 12*б*), если сравнивать его с изображением на рис. 11*a*.

# 3.1.6. Оценка размеров диаметров ПДО

При оценке диаметров ПДО по изображениям следует обратить внимание на следующее обстоятельство. Так как АР имеет размеры элементов вдоль сварного соединения 10 мм, то будем считать, что в пределах ближней зоны она будет излучать цилиндрическую волну. Поэтому, строго говоря, для оценки точности определения размеров отражателей нужно использовать не ПДО диаметром 3,5 мм, а паз длиной более 15 мм и шириной 3,5 мм. Или работать с антенной матрицей, формирующей 3D-изображение дна ПДО, что позволит математически сфокусировать поле как вдоль оси *x*, так и вдоль оси *y*. Размеры бликов вдоль границы сварного соединения оценивались как ширина среза ЦФА-изображения вдоль границы сварного соединения по уровню 0,7 от его максимума. В табл. 3 приведены оценки размеров четырех ПДО для рассмотренных выше трех случаев: по объединенным ЦФА-изображениям по значимым акустическим схема, по ЦФАизображениям по акустическим схемам согласно табл. 1 и 2. Так как в табл. 2 используются акустические схемы с тремя отражениями от границ, то размеры дна ПДО из-за уменьшения фронтальной разрешающей способности будут завышены. Минимальный разброс оценки размеров получился при работе с объединенным изображением.

Таблица З

Оценка размеров ПДО диаметром 3,5, мм

Номер ПДО	Объединенное изображение	Первый набор (см. табл. 1)	Второй набор (см. табл. 2)
4	3,8	2,8	3,2
3	2,6	2,6	3,2
2	3,0	3,2	3,2
1	3,4	4,5	5,0

# 3.2. ПДО диаметром 2 мм, антенная решетка из 64 элементов

На рис. 13 показана фотография образца со стороны грани с пятью ПДО диаметром 2 мм. В отличие от модельного эксперимента, рассмотренного в разделе 3.1, 35-градусную рексолитовую призму со стрелой 40 мм зажимали в прижим и ее можно было прецизионно перемещать по поверхности образца системой сканирования с шаговыми двигателями. Эхосигналы измерялись АР (5 МГц, 64 элемента, размеры пьезоэлемента 0,55×10 мм, зазор между элементами 0,05 мм) в 31 положении с шагом 2 мм, начиная с минус 40 мм в пяти положениях по оси у напротив каждо-го ПДО. Выбор 64-элементной АР объяснялся тем, что чем больше ее апертура, тем выше разрешающая способность изображения, особенно для нечетных схем.

Используя изложенный в разделе 3.1 принцип формирования объединенных изображений по заново определенным значимым акустическим схемам, было получено пять ЦФА-изображений ПДО диаметром 2 мм при размещении передней грани призмы в точке  $x_w = -17$  мм. Для определения размеров блика каждое изображение было подвергнуто операции отсечки по уровню 0,7 от максимума. На рис. 14 показано изображение, полученное при выборе максимума из пяти ЦФА-изображений ПДО. Разброс амплитуд бликов — около 6 дБ, а размеры бликов можно оценить как 2±0,2 мм. Такая хорошая оценка диаметра ПДО получилась благодаря удачно выбранным размерам AP, толщины образца и координаты  $x_w$ .

На рис. 15*а* показано изображение, полученное при выборе максимума из пяти ЦФА-изображений ПДО, но при размещении передней грани призмы в точке  $x_{y} = 1,5$  мм. Разброс амплитуд бликов около



Рис. 13. Фотография образца со стороны грани с пятью ПДО диаметром 2 мм. АР установлена в положение для измерения эхосигналов от ПДО № 3.



Рис. 14. Объединенное ЦФА-изображение дна пяти ПДО при размещении призмы в точке  $x_{u} = -17$  мм.

–1,4 дБ, что существенно меньше, чем для изображения на рис. 14. Однако блики ПДО № 5, 4 и 3 сместились по обеим осям примерно на 1 мм от своих правильных положений. Одна из причин такого эффекта заключается в том, что скорости продольной и поперечной волны в образце точно не известны, а AP и призма не были подвергнуты процедуре калибровки [24] для уточнения таких параметров как скорость продольной волны в призме, угол ее наклона и путь центрального луча. Использование нескольких значимых акустических схем приведет к тому, что блики по каждой схеме будут смещается от своего истинного положения (см. раздел 2.1). И чем больше отражений для заданной схемы, тем больше сместится блик дна ПДО. В результате чего форма блика исказится и он может сдвинуться от своего истинного положения, как это видно на рис. 126. На рис. 156 показано объединенное ЦФА-изображение, полученное при выборе максимума из пяти ЦФА-изображений ПДО, восстановленных по одной акустической схеме TdTT. Так как для данной схемы длина пути луча минимальна, то и ошибка задания скорости звука в образце будет приводить к минимальным смещениям блика. Разброс амплитуд бликов дна ПДО стал больше 6 дБ, но блики стали ближе к истинному положению, а разрешающую способность можно оценить как 1,7±0,2 мм.



Рис. 15. Объединенное ЦФА-изображение дна пяти ПДО при размещении призмы в точке  $x_w = 1,5$  мм: при использовании набора значимых схем (*a*); по акустической схеме TdTT (*б*).

На рис. 16 показан график амплитуд бликов ПДО диаметром 2 мм, определенных по ЦФАизображениям, восстановленным по акустической схеме TdTT, в зависимости от расстояния призмы  $x_w$  от центра сварного соединения, изменяющегося в диапазоне от –40 до 20 мм. Объяснение эффекта уменьшения амплитуды бликов в области  $x_w \approx -5$  мм предложено в разделе 3.1.5. При сравнении графика на рис. 16 с тем, что показан на рис. 10, нужно иметь в виду, что стрела призмы были равны 29 мм для рис. 10 и 40 мм для рис. 16. Видно, что для акустической схемы TdTT для разных AP амплитуда бликов дна ПДО, расположенных у поверхности объекта контроля, примерно на 10 дБ меньше, чем у дна объекта контроля. При размещении призмы на расстоянии  $x_w \approx$  $\approx -3$  мм (точка отмечена вертикальной пунктирной линией красного цвета) амплитуды всех пяти бликов будут иметь примерно одинаковую амплитуду, но при этом блики не будут достаточно сфокусированы, так как при этом положении призмы изображение будет формироваться лучами с углами падения, близкими к третьему критическому углу.



Рис. 16. График амплитуды бликов ПДО диаметром 2 мм в зависимости от положения призмы (схема TdTT).

#### 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Основная проблема применения многосхемной ЦФА-фокусировки на практике заключается в достаточно большом времени вычисления изображения отражателей по формуле (1) на одной или на нескольких значимых акустических схемах. Однако эти расчеты хорошо распараллеливается, и

для их ускорения можно воспользоваться технологией NVIDIA CUDA<sup>TM</sup> [25] или можно проводить вычисления с помощью технологии программируемых логических матриц (ПЛИС) на аппаратном уровне [26]. Для повышения скорости получения изображения отражателей можно оптимизировать форму ОВИ, для чего ее нужно выбирать не избыточно большой и прямоугольной, как на рисунках данной статьи. В зависимости от допустимого смещения  $\Delta x_w$  призмы при сканировании вдоль сварного соединения, ОВИ можно сделать в форме параллелограмма шириной  $\Delta x_w$ , как показано на рис. 1 полупрозрачным четырехугольником красного цвета.

Как видно из табл. 3, минимальный разброс оценки размеров дна ПДО получился при работе с объединенным изображением. При таком подходе время расчета увеличится в пять-шесть раз по сравнению с работой по одной акустической схеме согласно табл. 1 и табл. 2. Однако оптимизация расчетов и использование технологий проведения параллельных расчетов должна обеспечить формирование изображений отражателей на границе сварного соединения с частотой более 30 Гц. Это в сочетании с более высокой точностью определения размеров по сравнению с технологией зональной ФАР-фокусировки делает предлагаемую технологию контроля весьма перспективной.

#### 5. ВЫВОДЫ

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

1. ЦФА-фокусировка устойчива к смещениям призмы  $\Delta x_w$  поперек сварного соединения, которые могут возникнуть при сканировании вдоль сварного соединения. При зональной ФАР-фокусировки может импульс от отражателя может выйти за пределы строба, так как время его прихода изменится.

2. Предложен корреляционный способ автоматического определения значимых акустических схем. С его помощью из 40 акустических схем удалось выделить около 5 значимых. Это позволяет практически на порядок ускорить время получения объединенного изображения по формулам (2) или (3).

3. Точность оценки размеров ПДО составляет около ±0,2 мм при работе с антенной решеткой с рабочей частотой 5 МГц. Для дополнительного обоснования оценки размеров реальных дефектов потребуется применение моделирования и экспериментов на испытательных образцах.

4. Для повышения качества изображения и перехода к автоматическому анализу результатов контроля перспективно применение текстурных фильтров, например, адаптивного диффузного фильтра (AADF).

5. Набор акустических схем для формирования изображения, место размещения призмы и способ совместного представления данных, полученных по разным схемам контроля, должны быть определены при разработке методики контроля конкретного объекта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mirmajid G*. Codes for Automatic Ultrasonic Testing (AUT) of Pipeline Girth Welds / 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Prague 2014, Oct 6-11. URL: https://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/338\_Ghaemi.pdf (дата обращения: 09.01.2021).

2. Ginzel E., Stewart D. CIVA Modelling for Pipeline Zonal Discrimination // E-journal NDT.net 04-2011. URL: www.ndt.net/?id=10619 (дата обращения: 09.01.2021).

3. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications // Publisher: Waltham, MA : Olympus NDT, 2007. URL: https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-advances/ (дата обращения: 09.01.2021).

4. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 64—70.

5. Базулин Е.Г., Вопилкин А.Х., Тихонов Д.С. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 1. Определение типа несплошности при проведении ультразвукового контроля антенными решетками // Контроль. Диагностика. 2015. № 8. С. 7—22.

6. *Базулин Е.Г.* Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—75.

7. DNV-OS-F101:2013, Offshore Standard for Submarine Pipeline Systems, Appendix E, 2013.

8. Automated Ultrasonic Testing of Pipeline Girth Welds. URL: https://eclipsescientific.com/Textbooks/ AUT%20for%20Pipeline%20Girth%20Welds%202nd%20Edition%20-%20Sample.pdf (дата обращения: 16.05.2021).

9. Putsherry D., Durgamadhaba M. Project Specific AUT Automatic Ultrasonic Testing Validation to Determine Height Sizing Accuracy for Pipeline Girth Weld ECA Acceptance Criteria // Paper presented at

the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, November 2018. DOI: https://doi.org/10.2118/193170-MS

10. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Возможности оценки характера несплошности металла ультразвуковым томографом с цифровой фокусировкой антенной решетки // Контроль. Диагностика. 2011. № 10. С. 63—70.

11. Chatillon S., Fidahoussen A., Iakovleva E., Calmon P. Time of flight inverse matching re-construction of ultrasonic array data exploiting forwards models / 6th Int'l Workshop. NDT Signal Processing. August 25—27. 2009. London. Ontario. Canada.

12. Budyn N., Bevan R., Zhang J., Croxford A.J., Wilcox P.D. A Model for Multiview Ultra-sonic Array Inspection of Small Two-Dimensional Defects // IEEE Transactions on Ultra-sonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2019. V. 66. № 6. DOI: 10.1109/TUFFC.2019.2909988

13. Базулин Е.Г. Восстановление изображения отражателей методом C-SAFT при многократном отражении эхосигналов от границ цилиндрического объекта контроля // Дефектоскопия. 2013. № 2. С. 23—42.

14. Van der Ent Jan, Fandika Ardian, Brisac Gaspard, Pinier Ludovic, Pomie Laurent. Validation and Qualification of IWEX 3D Ultrasonic Imaging for Girth Weld Inspection / Rio Pipeline Conference & Exhibition, 2017.

15. Nahamoo D., Pan B.X., Kak A.S. Synthetic aperture diffraction tomography and its inter-polation free implementation // IEEE Trans. Sonics Ultrason. 1984. V. SU-31. P. 218–229.

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. V. 55 (11). 2008. 2450—2462. DOI:10.1109/tuffc.952

17. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхометод при контроле бетона. Помехиипространственнаяселекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.

18. Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmitreceive array data for non-destructive evaluation // NDT&E International. 2005. V. 38. P. 701-711.

19. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.

20. *Базулин Е.Г.* Учет анизотропных свойств сварного соединения при восстановлении изображения отражателей по эхосигналам, измеренным ультразвуковой антенной решеткой // Дефектоскопия. 2017. № 1. С. 11—25.

21. Официальный сайт фирмы «ЭХО+»: URL: http://www.echoplus.ru/ (дата обращения: 09.01.2021).

22. 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.

23. *Базулин Е.Г.* Применение адаптивного анизотропного диффузного фильтра для повышения качества изображения отражателей при проведении ультразвукового неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 3—12.

Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 3—12. 24. Базулин Е.Г. Калибровка ультразвуковой антенной решетки, установленной на призму // Дефектоскопия. 2014. № 4. С. 50—63.

25. Технология NVIDIACUDA™. URL: https://www.nvidia.com/ru-ru/technologies/cuda-x/ (дата обращения: 21.11.2020).

26. Угрюмов Е.П. Глава 7. Программируемые логические матрицы, программируемая матричная логика, базовые матричные кристаллы / Цифровая схемотехника. Учеб. пособие для вузов. Изд. 2. БХВ-Петербург, 2004. С. 357.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АМПЛИТУДНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ И СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

# © 2021 г. Л.Н. Степанова<sup>1,\*</sup>, М.М. Кутень<sup>1,\*\*</sup>, А.Л. Бобров<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет путей сообщения Россия 630049 Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191 E-mail: \*stepanova@stu.ru; \*\*mariabychkova94@mail.ru; \*\*\*beaver@stu.ru

Поступила в редакцию 17.03.2021; после доработки 07.07.2021; Принято к публикации 13.07.2021

Приведены результаты амплитудного анализа сигналов дискретной акустической эмиссии от развивающихся источников типа усталостных трещин. Исследования проводили на трех группах образцов с концентраторами напряжений. Образцы были изготовлены из конструкционных низкоуглеродистых сталей обыкновенного качества, качественной стали и низколегированной литой стали и нагружались растягивающей статической и комбинированной нагрузкой, включающей статическую и циклическую нагрузки. Установлена степенная зависимость плотности распределения амплитуды сигналов с высоким коэффициентом корреляции для источников акустической эмиссии, которая слабо изменяется на разных этапах роста трещины, за исключением стадии, предшествующей разрушению. Исследования позволили использовать амплитудное распределение сигналов для определения числа сигналов акустической эмиссии от источников типа трещин, находящихся на разном расстоянии от приемников и с учетом ослабления энергии волн.

*Ключевые слова*: акустическая эмиссия, амплитудный анализ, усталостная трещина, плотность вероятности появления сигналов, суммарный счет, коэффициент интенсивности напряжений.

DOI: 10.31857/S0130308221090025

#### введение

Обеспечение непрерывной и безопасной работы технологического оборудования (трубопроводов, сосудов, работающих под давлением, резервуаров и т.д.) является одной из приоритетных практических задач при контроле различных промышленных объектов. К числу перспективных методов мониторинга таких объектов относится акустическая эмиссия (АЭ) [1, 2]. Благодаря генерации и распространению упругих колебаний, полученных в результате деформации материала, находящегося в нагруженном состоянии, метод АЭ позволяет выявлять наиболее опасные дефекты на стадии их зарождения и развития, такие как усталостные трещины [3], коррозионные поражения [4] и повышенные напряжения около несплошностей [5]. Наряду с существующими методами неразрушающего контроля (НК) метод АЭ обладает высокой чувствительностью к процессам разрушения, происходящим в различных материалах, в том числе в низколегированных и низкоуглеродистых сталях [6, 7].

К недостаткам метода АЭ контроля можно отнести не только потребность в нагружении контролируемой конструкции, но и высокий уровень помех, которые составляют значительную долю информации и требуют применения способов их идентификации и исключения их рассмотрения при оценке состояния объекта.

Информация, полученная от развивающегося дефекта через параметры АЭ сигналов, является основной для определения типа источника, что важно для осуществления операции браковки. Повышение надежности оценки состояния опасных развивающихся дефектов в металлических конструкциях при АЭ-контроле является актуальной задачей.

Критерии оценки технического состояния объекта в нормативных источниках всегда основываются на анализе параметров сигналов АЭ, таких как амплитуда, суммарный счет, активность, суммарная энергия и т.д. При регистрации АЭ сигналов часть из них, которая имеет относительно малые амплитуды и большое расстояние между ПАЭ и источником, теряется в шумах, так как выровнять чувствительность каналов аппаратными средствами к сигналам, находящимся на разном расстоянии от источника, в этом случае можно только для зарегистрированных сигналов. При этом исследователями предполагается, что активность источника излучения [5] и величина амплитуды [3, 10], выделяемая при формировании сигналов АЭ, с развитием дефекта возрастает. Таким образом, например, идентичные источники, находящиеся на разных расстояниях от приемников, будут иметь не только разный набор амплитуд, но и разное число зарегистрированных сигналов. Известны физико-механические модели эволюции материалов под нагрузкой, например, такие как мезомеханическая модель [8, 9], которые показывают более неоднозначную связь параметров сигналов АЭ с параметрами, характеризующими общее состояние объекта контроля.

Поскольку анализу подвергается неполное количество сигналов АЭ в силу естественного ограничения порога чувствительности каналов и различного расстояния от источников до ПАЭ, то искажается результат технической диагностики даже при оценке состояния объекта по числу сигналов и активности источника. Это может привести к необратимым последствиям, таким как внезапное разрушение конструкций или, напротив, к их преждевременной утилизации или дополнительному ремонту. Между тем ГОСТ Р ИСО 12716—2009 для анализа предполагает использовать статистические распределения параметров АЭ, которые успешно применил С. И. Буйло для анализа потоков сигналов АЭ при исследовании поведения материала в упругой и пластической области деформирования (см. работы С.И. Буйло [10] и в этом журнале за 2018 г.). Однако данных по исследованию амплитудного распределения для сигналов от развивающейся трещины и использования этих данных для практических целей в исследовательской литературе нет. Между тем распределения параметров АЭ, например, во времени [11, 12] успешно используется для получения дополнительной информации о состоянии источников.

Цель работы — разработка методики амплитудного анализа сигналов АЭ от реальных источников для повышения достоверности оценки степени опасности дефектов.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Испытывались образцы с концентраторами напряжений, изготовленные из низколегированных и низкоуглеродистых сталей (20ГФЛ, Ст3пс, сталь 20). Образцы сначала нагружались циклической нагрузкой с частотой 5 Гц до начала образования усталостных трещин, после чего к ним прикладывалась статическая нагрузка и выполнялся контроль АЭ за развитием усталостной трещины. При этом образцы из низкоуглеродистой стали нагружались двумя способами. Первая группа состояла из шести образцов, выполненных из стали Ст3пс. Их нагружали статической растягивающей нагрузкой с равномерной деформацией (рис.1 а) до разрушения. Вторую группу из четырех образцов из стали 20 предварительно нагружали растягивающей циклической нагрузкой, обеспечивающей на максимумах циклов напряжение 0,95—0,98602 от предела текучести для данной марки стали. После выращивания усталостной трещины прикладывали статическую нагрузку до разрушения. Третью группу, состоящую из шести образцов, выполненных из стали  $20\Gamma \Phi \Pi$  (рис. 16), нагружали циклически на изгиб приложением силы в 25 кН с частотой 5 Гц, где число циклов составило (3—15)·10<sup>3</sup>. Таким образом, выращивали усталостную трещину глубиной 8—12 мм. Затем измерялась длина усталостной трещины и проводились статические испытания, при которых нагрузка превышала нагрузку циклической фазы на 25 %. После этого повторялись описанные стадии нагружения до разрушения образца.



Рис. 1. Геометрические размеры образцов и места установки преобразователей при статических испытаниях на растяжение (*a*); при циклических испытаниях на изгиб (*б*).

Регистрацию сигналов, возникающих при нагружении образцов, осуществляли системой АЭ СЦАД-16.03 (зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений № 78816-20). Порог

чувствительности измерительных каналов составлял 5 мкВ. Коэффициент усиления каждого измерительного канала был равен 1000. Для приема информации использовались четыре ПАЭ типа ПК 01-07, работающие на частоте (100—700) кГц. При этом ПАЭ располагали на образце так, чтобы выделять сигналы АЭ, связанные с ростом усталостной трещины.

Для выравнивания чувствительности измерительных каналов системы датчик имитатора сигналов АЭ с амплитудой, равной 1 В, ставился в середину зоны пьезоантенны, образованной четырьмя ПАЭ, и определялись выходные сигналы каждого канала, разброс амплитуд которых не должен был превышать 3 дБ. Выравнивание выходных сигналов АЭ измерительных каналов проводилось за счет изменения их коэффициентов усиления.

Следует отметить, что при выбранных размерах образцов основная энергия актов АЭ передавалась волнами Лэмба, и регистрируемые сигналы несли информацию, в том числе от переотражений от границ. Поэтому прямое переложение результатов исследований на реальные объекты, которые, как правило, имеют существенно большие размеры, будет некорректно, что требует дополнительных исследований в условиях, соответствующих испытаниям объектов реальных размеров и форм.

В процессе контроля с каждого ПАЭ записывались сигналы АЭ. Координаты локализованных источников определялись аналитически по методике, рассмотренной в [13]. Сигналы локализовались из области деформаций в вершине развивающейся усталостной трещины. Коэффициент интенсивности напряжений (КИН) для развивающейся трещины рассчитывался в соответствии с методикой, приведенной в п. 5.1 стандарта ГОСТ 25.506—85. Погрешность расчета КИН составляет менее 1 %.

Как следует из исследований [14], погрешность определения амплитуды сигналов, основная энергия которых сосредоточена на частотах до 500 кГц для использованной регистрирующей системы, не превышает 0,5 %.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При циклическом нагружении образцов был отмечен значительный разброс основных параметров дискретных сигналов АЭ от времени, таких как суммарный счет, активность, средняя амплитуда, суммарная энергия. Эти параметры являются информативными при нагружении объектов с развивающимися источниками разрушения [3, 15]. Одной из основных характеристик источника сигналов АЭ является их амплитуда [8]. На рис. 2 приведена динамика изменений средней амплитуды сигналов АЭ, полученных при развитии усталостных трещин в образцах (см. рис. 16), в зависимости от КИН. Следует отметить, что в работе приведены характерные результаты для групп образцов, и остальные результаты в основном близки к представленным на рисунках.



Рис. 2. Зависимость средней амплитуды сигналов АЭ от КИН при испытании образцов второй (образцы 2, 3) и третьей (образцы 1, 4) групп.

Анализ изменений средней амплитуды сигналов АЭ из зоны развивающейся усталостной трещины показывает, что с увеличением КИН данный параметр становится нестабильным. Средняя амплитуда сигналов, а также средняя суммарная энергия практически не связаны с основными механическими параметрами развивающейся трещины. Колебания средней амплитуды связаны с неоднородностью структуры материала образцов, связь изменений параметров АЭ с которой показана в работе [15].

За счет намеренного увеличения чувствительности измерительных каналов системы АЭ при испытаниях второго образца третьей группы (см. рис. 16) было заметно общее повышение энергетических параметров на всех этапах увеличения КИН. Полученные результаты испытаний образцов из низкоуглеродистой стали 20 и низколегированной стали 20ГФЛ показали, что амплитудный критерий обладает недостаточно выраженной корреляционной связью с параметрами развивающейся усталостной трещины (см. рис. 2). Поэтому использование амплитудных и энергетических параметров для оценки степени развития усталостных трещин возможно только при длительных режимах накопления информации АЭ.

Как показала локационная картина источников (рис. 3) с учетом погрешности определения координат, реальным источником является область в вершине трещины, которая увеличивается с ростом трещины, что логично, так как область повышенных напряжений в окрестности вершины трещины также увеличивается [16], и должна увеличиваться вероятность появления сигналов в более обширной области у вершины.



Рис. 3. Локация сигналов в образце 5 третьей группы образцов при КИН, равном 55,2 МПа·мм<sup>-0,5</sup> (а) и 62,0 МПа·мм<sup>-0,5</sup> (б).

При этом, как видно из рис. 3, с увеличением числа сигналов АЭ и развитием трещины объем металла, испытывающий напряженное состояние и генерирующий акты АЭ, увеличивается и, следовательно, снижается чувствительность к размеру дефекта по критерию, содержащему концентрацию источника.

Для расширения информативности метода АЭ после регистрации сигналов АЭ от источников типа усталостных трещин были проанализированы амплитудные распределения зарегистрированных сигналов. На первом этапе анализа получаются гистограммы частоты попадания этих сигналов в каждый диапазон амплитуд. Чтобы понять закономерность этого распределения, данные для большого числа сигналов можно представить в виде непрерывного распределения плотности вероятности попадания сигналов в тот или иной диапазон амплитуд. Для этого определялось среднее экспериментальное значение плотности вероятности p(U) появления сигналов АЭ в каждом интервале амплитуд как отношение числа зарегистрированных сигналов в этом амплитудном интервале. Из полученных гистограмм распределения амплитуд рассчитали мгновенное значение плотности вероятности появления  $N_{U_i-U_{i-1}}$  сигналов в интервале амплитуд для каждого среднего значения амплитуды в каждом из этих диапазонов от  $U_{i-1}$  до  $U_i$ :

$$p_i(U) = \frac{N_{U_i - U_{i-1}}}{U_i - U_{i-1}}.$$
(1)

После этого по полученным рассчитанным мгновенным значениям плотности вероятности  $p_i(U)$  для каждого значения амплитуды были построены распределения сигналов по амплитудам для всех образцов на разных стадиях развивающейся трещины, а результаты представлены на рис. 4. При этом величину трещины в данном случае может характеризовать КИН.



Рис. 4. Зависимость плотности вероятности появления сигналов АЭ от амплитуды образцов второй и третьей групп: образец 1 при КИН = 63,93 МПа·мм<sup>-0,5</sup>; образец 2 при КИН = 63,12 МПа·мм<sup>-0,5</sup>; образец 3 при КИН = 62,02 МПа·мм<sup>-0,5</sup>; образец 4 при КИН = 59,77 МПа·мм<sup>-0,5</sup>.

Для анализа умышленно были выбраны активные локализованные источники, от которых было зарегистрировано более 300 сигналов АЭ, что позволило получить более точные параметры распределения. При построении графиков зависимости плотности вероятности появления сигналов АЭ от амплитуды не учитывались сигналы, амплитуды которых меньше 10 мкВ и которые не были локализованы из окрестности развивающейся трещины.

Полученное распределение сигналов по амплитудам можно было описать степенной функцией, каждая кривая имела коэффициент корреляции выше 0,97, что видно из рис. 4, по формуле:

$$p(U) = A \cdot U^n, \tag{2}$$

где *A*, *n* — соответственно безразмерные множитель и показатель степенной зависимости.

Далее был проведен анализ связи параметров степенного распределения (множителя A и показателя степени n) от КИН, рассчитанного с учетом размеров развивающихся усталостных трещин (рис. 5).



Рис. 5. Динамика изменения параметров степенного распределения *n* (*a*) и множителя *A* (б) в зависимости от КИН для разных образцов.

Показатель степени *n* изменялся в диапазоне от -3 до -1,5 и не имел выраженной тенденции к изменению при увеличении КИН, особенно хорошо это заметно, если все данные представить для нескольких образцов (рис. 5*a*). Исключение составил только случай, предшествующий разрушению образца № 3, с самым высоким КИН, полученным перед его разрушением. В распределении плотности вероятности сигналов от амплитуды показатель степени *n* был выше (-1,0).

Аналогично с ростом КИН параметр *A* изменялся достаточно сильно и был чувствителен к количеству сигналов в каждой анализируемой выборке (рис. 56), что следует из свойств исследуемой степенной зависимости.

Подводя итоги исследованию связи параметров степенной зависимости с КИН, можно сказать, что величины амплитуд, а значит и энергий сигналов АЭ, формируемые при развитии усталостных трещин в каждый конкретный момент статических испытаний образца с трещиной, носят, в большой степени, случайный характер. Это, видимо, во многом связано с достаточно неоднородными структурным и напряженным состояниями в области вершины развивающейся трещины.

Однако дальнейший анализ параметров степенной зависимости показал, что между показателем степени *n* и множителем степенной зависимости *A* для различных образцов наблюдалась связь с коэффициентом корреляции, равным 0,96 (рис. 6). Такая устойчивая связь между параметрами степенной зависимости связана с математическими свойствами степенной зависимости и, возможно, физические свойства разрушающегося материала на них влияют слабо. Перераспределение сигналов в сторону сигналов с повышенной амплитудой приводит к увеличению *n* и снижению параметра *A* при одном и том же их количестве. Смещение связи этих параметров между собой может происходить только за счет изменения числа сигналов в испытании.



Рис. 6. Зависимость показателя степенного распределения *n* от множителя *A*.

При контроле реальных объектов можно отметить, что за исключением стадии их критического состояния, находящегося перед разрушением, степень опасности развивающихся усталостных трещин практически невозможно оценивать по таким параметрам как амплитуда или энергия.

Очевидно, что в этом случае критерии оценки развивающихся трещин можно основывать на количественных показателях активности источника либо на динамике изменений индивидуальных характеристик сигналов АЭ. Для первого случая характерна существенная зависимость полученной информации от чувствительности измерительных каналов системы АЭ. Лабораторные испытания образцов с усталостными трещинами подтверждают увеличение суммарного числа сигналов и их активности с ростом длины усталостных трещин и их КИН (рис. 7). При этом следует отметить, что для образцов из литой стали (образец 1 и 4) связь числа регистрируемых в ходе испытаний сигналов АЭ с КИН менее очевидна, что является следствием макроструктурной неоднородности такого материала (наличия ликваций, пористостей и других дефектов, обнаруженных в данных образцах).

Различная чувствительность измерительных каналов, связанных с ПАЭ, находящихся на разных участках объекта контроля или для источников, находящихся на разном расстоянии от ПАЭ, существенно изменяет число зарегистрированных сигналов, так как максимальное число сигналов с малой амплитудой и энергией может быть получено при испытаниях, в которых чувствительность каналов высокая. Еще одной особенностью является то, что при нагружении образцов, приведенных на рис. 1*a*, количество сигналов и их активность, зарегистрированных из зоны разрушения, на порядок меньше по сравнению с этими же параметрами, полученными при испытании образцов, приведенных на рис. 1*б*. В нашем случае это было связано с разными видами нагружения.

Проанализируем, каким образом можно стабилизировать чувствительность каналов. Если в лабораторных условиях есть достаточно много аппаратных средств для решения этой задачи, то на



Рис. 7. Зависимость суммарного числа сигналов АЭ от КИН при развитии усталостной трещины в образце 1 второй группы и образцах 3, 4 третьей группы.

реальных объектах это часто сделать практически невозможно из-за ограниченности доступа к отдельным поверхностям объекта контроля, неоднородности его акустических свойств, сложности и ряда других причин.

В этом случае возникает задача методического выравнивания чувствительности измерительных каналов с возможностью корректировки результатов после проведения испытаний. Полученные и обработанные экспериментальные данные можно использовать для анализа состояния источников сигналов АЭ от размеров усталостных трещин. При наличии большого числа сигналов (например, более 100) их можно разделить на амплитудные диапазоны, аналогично показанным на рис. 4. Дальнейшая обработка данных позволяет получить эмпирическую зависимость плотности вероятности сигналов АЭ от их амплитуды, представленной в логарифмических координатах на рис. 8, у которой порог чувствительности канала приводит к снижению числа низкоамплитудных локализованных сигналов. Поэтому именно число низкоамплитудных сигналов будет определено с погрешностью.

Далее, для устранения недочета низкоамплитудных сигналов находился минимальный порог срабатывания по амплитуде  $U_n$ , при котором плотность вероятности является степенной функцией и не отклоняется от нее (рис. 8). По данным правой части графика (при  $U > U_n$ ) определялись параметры степенной зависимости (множитель A, показатель n). Затем в зависимости от местонахождения источника относительно приемных преобразователей ПАЭ и экспериментально определенного для данного образца затухания ультразвуковых волн на пути от источника до преобразователей определялось значение минимальной амплитуды зарегистрированного сигнала  $U_k$ .



Рис. 8. Зависимость плотности вероятности распределения частоты попадания сигналов АЭ в интервал со средней амплитудой U.

Сигналы, превышающие амплитудный порог регистрации  $U_{\kappa}$ , подлежат учету и использованию для определения степени опасности источника разрушения. Сигналы, амплитуды которых ниже максимального порога регистрации  $U_{\kappa}$ , в дальнейшей обработке информации не учитываются. Расчет восстановленного числа сигналов АЭ  $N_{\kappa}$  от источника определялся по формуле:

$$N_B = \int_{U_\kappa} p(U) dU.$$
(3)

Рассмотренный амплитудный анализ сигналов АЭ применим при мониторинге конструкций, когда массив зарегистрированных сигналов большой и позволит надежно проводить такие расчеты. При этом повышается достоверность оценки степени развития усталостных трещин, находящихся на разных стадиях развития.

Основным ограничением для использования методики корректировки данных параметров сигналов АЭ является их малое число, что обычно характерно для пассивных источников. Однако при увеличении числа зарегистрированных сигналов прогноз о состоянии объекта контроля будет более объективным.

#### выводы

 Исследования показали, что некоторые традиционные критерии, используемые для оценки состояния материала конструкции, такие как средняя амплитуда или энергия, концентрация источника малоэффективны для оценки развивающейся усталостной трещины. Для определения степени опасности такого типа дефекта нужны другие подходы к анализу сигналов АЭ, регистрируемых в процессе испытаний.

2. В исследовании предложена методика анализа амплитудного распределения зарегистрированных от источника сигналов и прогнозирования числа сигналов на заданном уровне чувствительности для источников, находящихся на большем расстоянии от приемников.

3. Анализ процесса развития усталостных трещин методом АЭ при циклическом и статическом нагружении образцов из низколегированных и низкоуглеродистых сталей показал, что усталостные трещины на всех стадиях излучают поток актов, амплитудное распределение которых можно характеризовать степенной зависимостью с достаточно устойчивыми параметрами такой связи, которая нарушается только на стадии, предшествующей разрушению образца.

4. При анализе степени опасности усталостных трещин целесообразно использовать суммарное число сигналов АЭ или их активность. Для этого, исходя из числа полученных сигналов от источников, находящихся, например, на разных расстояниях от ПАЭ, можно построить амплитудное распределение и определить параметры этого распределения. Затем на основе этих параметров можно определить число сигналов от источника на заданном уровне чувствительности по амплитуде с учетом затухания и расхождения ультразвуковой волны в объекте. Использование данной методики целесообразно при достаточно большом числе зарегистрированных сигналов АЭ, полученных при разрушении конструкции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90090.

Авторы выражают благодарность доктору физико-математических наук, профессору Сергею Ивановичу Буйло за сделанные замечания и предложения по содержанию статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чаусов Н.Г., Недосека С.А., Лебедев А.А. Исследование кинетики разрушения сталей на заключительных стадиях деформирования методом акустической эмиссии // Проблемы прочности. 1996. № 1. С.82—90.

2. *Wang H.-J., Lin Z., Zhao D.-Y.* Application and prospect of acoustic emission technology in engineering structural damage monitoring // Journal of Vibration and Shock. 2007. № 6 (26). P. 157—161.

3. Chernov D.V., Matyunin V.M., Barat V.A., Marchenkov A.Y., Elizarov S.V. Investigation of Acoustic Emission in Low-Carbon Steels during Development of Fatigue Cracks // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. № 9. P. 638–647.

4. *Бигус Г.А., Попков Ю.С.* Определение глубины язвенной (питтинговой) коррозии и слежение за ее развитием методом акустической эмиссии // Сварка и диагностика. 2011. № 3. С. 57—60.

5. Носов В.В., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвиян И.В. Оптимизация акустико-эмиссионного контроля прочности сварных соединений // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2017. № 2. С. 96—101.

6. Merson E., Vinogradov A., Merson D.L. Application of acoustic emission method for investigation of hydrogen embrittlement mechanism in the low-carbon steel // Journal of Alloys and Compounds. 2015. T. 645.  $N_{2}$  1. P.460—463.

7. Никулин С.А., Ханжин В.Г., Никитин А.В., Турилина В.Ю., Заболотникова В.И. Анализ кинетики и механизмов разрушения стали 20ГЛ различной прочности по параметрам акустической эмиссии // Деформация и разрушение материалов. 2016. № 12. С. 41–45.

8. Shenao Zou, Fengying Yan, Guoan Yang, Wei Sun. The Identification of the Deformation Stage of a Metal Specimen Based on Acoustic Emission Data Analysis // Sensors. 2017. 17 (4). P. 789.

9. Башков О.В., Панин С.В., Бяков А.В. и др. Стадийность деформации поликристаллических материалов. Исследование акустико-эмиссионным и оптико-телевизионным методами. Томск: Изд-во НИУ ТПУ, 2014. 301 с.

10. *Буйло С.И*. Физико-механические, химические и статистические аспекты акустической эмиссии // Известия Алтайского государственного университета. 2019. № 1 (105). С. 11—21.

11. *Бехер С.А., Попков А.А.* Временные характеристики потока сигналов акустической эмиссии при развитии трещин в стекле при ударном нагружении // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 1. С. 62—71.

12. Nosov V.V., Grigoriev E.V., Pavlenko I.A., Gilyazetdinov E.R. Acoustic-emission diagnosis of technical objects based on the information and kinetic approach // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019. 2019. P. 012067.

13. *Stepanova L.N., Petrova E.S., Chernova V.V.* Strength tests of a cfrp spar using methods of acoustic emission and tensometry // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. T. 54. № 4. P. 243—248.

14. Козлов В.В. Определение параметров гармонических сигналов в условиях действия шумов и помех на основе метода разложения сигнала на собственные числа // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 43.

15.*Степанова Л.Н., Бобров А.Л., Канифадин К.В., Чернова В.В.* Исследования основных параметров сигналов акустической эмиссии при статических и циклических испытаниях образцов из стали 20ГЛ // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 6. С. 41—47.

16. *Pollock Adrian A*. Acoustic emission inspection, Technical report, TR-103-96-12/89, Physical Acoustics corporation., 195 Clarksville Road, Princeton Jct., NJ., 1989, USA.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ПРИ КОНТРОЛЕ ДЕФЕКТОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МОД НАПРАВЛЕННЫХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК

### © 2021 г. М. Дж. Ранджбар<sup>1,\*</sup>, Сина Содагар<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Нефтяной технологический университет, Абадан, Иран E-mail: \*m.ranjbar@put.ac.ir

# Поступила в редакцию 02.05.2021; после доработки 27.06.2021 Принята к публикации 09.07.2021

Для оценки поверхностных и внутренних дефектов в стальной пластине использовался метод сканирования с ультразвуковой фазированной решеткой. Моды ультразвуковых направленных волн от преобразователя с фазированной решеткой были промоделированы с использованием метода конечных элементов. Результаты экспериментов показали, что высокочастотная мода A0 дает приемлемую чувствительность и разрешение для малых диаметров сквозных дефектов и поверхностных дефектов. Секторное сканирование показало лучшее разрешение по оси в сравнении пространственным разрешением.

*Ключевые слова*: ультразвук, направленные волны, высокая частота, фазированная решетка. **DOI:** 10.31857/S0130308221090037

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Пластинчатые элементы из-за широкого применения в качестве компонентов промышленного применения нуждаются в надежных методах неразрушающего контроля (НК) для своевременного обнаружения дефектов. Трещины и коррозионные повреждения — это такие распространенные дефекты, контроль и обнаружение которых имеет решающее значение, особенно когда эти дефекты являются внутренними. Некоторые методы НК были изучены на предмет возможности сканирования и обнаружения локальной коррозии с точки зрения изменений толщины стенок и точечной коррозии с точки зрения кольцевых неоднородностей. Среди них ультразвуковые методы обеспечивают хорошее разрешение и обнаружение уменьшения толщины до 10 % с быстрым откликом [1]. При ультразвуковом контроле происходит передача ультразвуковых волн в образец и прием отражений для анализа предоставляемой информации [2]. Несмотря на широкое использование объемных ультразвуковых волн для контроля уменьшения толщины путем измерения времени прохождения волны, оно ограничено плохим временным разрешением в тонких пластинах и трудоемкостью при контроле на больших расстояниях [3]. В качестве альтернативы, ультразвуковые направленные волны с использованием более низких частот обладают большим диапазоном контроля, а также несут больше информации о различных типах дефектов [4]. В случае контроля коррозии Rose и Barshinger [5] исследовали возможность использования отсечки мод направленных волн в качестве функции для контроля и классификации коррозии. Silva и др. [6] работали над частотно-временным анализом сигналов коррозии в алюминиевой конструкции самолета с использованием непрерывного вейвлет-преобразования. Sargent [7] представил контроль коррозии сварных швов и зон термического влияния. Jhang и др. [8] использовали сфокусированную направленную волну, генерируемую лазером, для визуализации отверстий. Rathod и Mahapatra [9] предложили концепцию локализации и параметрической идентификации повреждений коррозионного типа с использованием кольцевой антенной решетки из пьезоэлектрических пластинчатых активных датчиков (ППАД).

С другой стороны, интерпретация результатов контроля направленными волнами (одновременного из-за их дисперсионного характера и из-за генерирования нескольких различных мод) требует наличия должной квалификации дефектоскопистов и контролле́ров [10]. С появлением преобразователей с фазированной антенной решеткой (ФАР) в качестве новой технологии в области ультразвукового контроля использование ФАР-устройств значительно расширилось. Уникальные возможности формирования лучей дает независимое управление элементами преобразователя [11].

Некоторые исследователи пытались объединить контроль направленными волнами как метод контроля больших расстояния с ФАР-визуализацией как методом локального контроля, чтобы

улучшить эффективность или получить дополнительную информацию, касающуюся выделения особенностей дефектов. Deutch и др. [12] представили новую методику самофокусировки волноводных мод с использованием линейного массива пьезоэлектрических элементов. Sicard и др. [13, 14] использовалии алгоритм синтезированной апертурной фокусировки (САФ) в области Фурье (Ф-САФ) для модификации изображения с преобразователей с фазированной антенной решеткой. Prager и др. [15] разработали модель распространения волн и селективного возбуждения мод направленных волн для дефектоскопии трещин разного размера и контроля уменьшения толщины материала.

В этой статье с целью формирования изображения с использованием ФАР (как метода локального контроля) исследуются высокочастотные моды направленных волн. ФАР-преобразователи применяют для сканирования различных поверхностных и внутренних дефектов модами направленных волн. Параметры выбранной волновой моды определяются посредством конечно-элементного анализа распространения волн с фазированной решеткой в стальной пластине. Кроме того, исследуются возможности мод направленных волн для секторных сканирований и в пространственном, и в осевом разрешении с использованием информативных изображений, таких как В- и S-сканов для оценки и интерпретации результатов.

#### 2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Распространение направленных волн в пластинчатых объектах определяется уравнением Рэлея—Лэмба [1]. Рассматривая пластину толщиной d = 2h и свободные от нагрузки граничные условия на краях, уравнение записывается как

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\left[\frac{4pqk^2}{\left(q^2 - k^2\right)^2}\right]^{-1},\tag{1}$$

где k — волновое число в направлении распространения. Порядки (+1) и (-1) определяют симметричные и асимметричные моды, которые обозначаются буквами S и A соответственно на рис. 1. С поперечными и продольными волновыми числами  $k_i$  и  $k_i$  переменные p и q задаются в виде:

$$p^2 = k_l^2 - k^2 \mathbf{u} q^2 = k_l^2 - k^2.$$
<sup>(2)</sup>

Согласно уравнению (2), многочисленные симметричные и асимметричные волновые моды могут распространяться с заданным произведением частоты и толщины fd. Моды обладают различными фазовыми и групповыми скоростями. Более того, нормальная и плоская компоненты перемещения частицы не совпадает с fd, что само по себе не очевидно из диаграмм [16].



Рис. 1. Фазовые и групповые скорости нескольких направленных волновых мод на стальной пластине: фазовая скорость (*a*), групповая скорость (*б*).

Согласно Azar и др. [17], регулирование ультразвукового ФАР-луча достигается за счет временной задержки. Для акустически изотропной и гомогенной среды постоянная задержка,  $\Delta \tau$ , для регулирования ультразвуковым полем может быть записано как

$$\Delta \tau = \frac{p \cdot \sin \theta_s}{c},\tag{3}$$

где p — расстояние между двумя смежными элементами решетки;  $\theta_s$  — угол проходящей волны; c — скорость волны. Задержки при фокусировке для любого количества элементов решетки также рассчитывается по следующему закону распределения задержек:

$$t_{n} = (F/c) \begin{cases} \left[ 1 + \left(\frac{\overline{N}p}{F}\right)^{2} + \frac{2\overline{N}p}{F}\sin\theta_{s} \right]^{1/2} \\ - \left[ 1 + \left(\frac{(n-\overline{N})p}{F}\right)^{2} - \frac{2(n-\overline{N})p}{F}\sin\theta_{s} \right]^{1/2} \end{cases},$$
(4)

где N — число элементов; F — фокусное расстояние;  $\overline{N}$  — число активных элементов;  $t_n$  — требуемое время задержки для элемента n = 0, ..., N-1 и  $\overline{N} = (N-1)/2$ .

#### 3. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Конечно-элементная (КЭ) модель состоит из однородной пластины со свойствами стали и, в частности, модулем Юнга, равным  $E = 209 \ \Gamma H/m^2$ , коэффициентом Пуассона  $\upsilon = 0,3$ ; плотностью  $\rho = 7800 \ \text{кг/m}^3$ . Данные величины приводят к продольным и поперечным скоростям волны 5940 и 3230 м/с соответственно. Толщина пластины 0,6 мм и ее общая длина 700 мм.

#### 3.1. Передатчик

Преобразователь в виде фазированной решетки, расположенный на поверхности клина, использовался для управления направлением распространения волны, используя принцип, представленный в уравнении (5). В зависимости от закона распределения задержек ФАР-устройства, угол наклона  $\alpha$  управляется электроникой таким образом, чтобы могло быть достигнуто селективное возбуждение волновой моды с фазовой скоростью  $c_{nh} = f \cdot \lambda$ , где f — частота;  $\lambda$  — длина волны.

Угол наклона ФАР-устройства [15]:

$$\alpha + \varphi_w = \beta = \sin^{-1} \left( \frac{c_w}{c_{ph}} \right).$$
<sup>(5)</sup>

Как можно видеть из рис. 2a, для конкретных сочетаний материалов клина с углом  $\phi_w$  и пластины угол ввода  $\beta$  может определяться для заданной моды и произведения *fd*.



Рис. 2. ФАР-преобразователь и клин из оргстекла: эффективные углы (а); линейные размеры (б).

Таблица 1

Размеры элементов фазированной решетки

Параметры клина	Параметры ФАР
B = 90  mm	$H_L = 40 \text{ mm}$
D = 38  mm	$(P \cdot n) = (0,6 \text{ MM} \cdot 32)$
E = 35  mm	$(P \cdot n)_{act} = (0,6 \text{ mm} \cdot 32)$

Линейные размеры элементов ФАР и клина из оргстекла, проиллюстрированных на рис. 2*б*, даны в табл. 1. Модель клина рассматривалась в виде оргстекла (акрил) со свойствами материала: модуль Юнга  $E = 9 \ \Gamma H/M^2$ , коэффициент Пуассона v = 0,39, плотность  $\rho = 1180 \ kr/M^3$ . Данные величины приводят к продольным и поперечным скоростям волны 2730 и 1430 м/с соответственно.

#### 3.2. Возбуждение волны

В КЭ-модели для симуляции пьезоэлектрического возбуждения наклонная боковая стенка клина нагружается 4-цикловой оконной функцией давления Хеннинга на центральной частоте 5 МГц.

# 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проведения экспериментов используются ультразвуковое ФАР-устройство M2M Multi2000 с мультиплексированной архитектурой  $32 \times 128$  каналов и датчик с линейной решеткой с центральной частотой 5 МГц. Общая возможная активная длина преобразователей составляет 38,3 и 76,8 мм соответственно, оба имеют одинаковые размеры элементов  $10 \times 0,5$  мм и шаг элементов 0,6 мм, что обеспечивает возможности высокого разрешения. Угловой клин  $31^{\circ}$  из рексолита используется совместно с ФАР-оборудованием. Управление лучом осуществляется в виде секторных сканирований. Секторное сканирование вычисляет последовательность в законе распределения задержек, что позволяет сканировать по порядку в диапазоне требуемых углов.

Наконец, демонстрируются потенциальные возможности сканирования фазированной антенной решетки с одним и несколькими отражателями. Расстояние между дефектом и датчиком составляет от 20 до 40 мм. Дефекты представляют собой различные поверхности и сквозные отверстия, а также крестообразное повреждение, имитирующее коррозионные язвины и трещины в стальном листе соответственно. На рис. 3 показана экспериментальная установка.



Рис. 3. Установка для ФАР-системы (*a*); датчик с линейной решеткой (128 элементов) на 31°-клине (б).

#### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### 5.1. Определение параметров мод

Перед началом экспериментов были изучены возможные различные волновые моды для отбора наиболее эффективных из них в целях контроля дефектов.



Рис. 4. Распределение нормальных напряжений для различных мод направленных волн S0, S1, A1 и A2 в стальной пластине: *f* — частота, *d* — толщина пластины.

Распределения нормальных напряжений в распространяющихся симметричных и асимметричных модах A1, A2, S0 и S1 показаны на рис. 4 при соответствующих значениях частоты и толщины. Сравнение профиля волны для различных мод показывает, что для A1 и S0 распределение напряжений является почти подповерхностным и глубинным соответственно, в то время как для более высокочастотных мод A2 и S1 напряжение распределяется по толщине.

Эквивалентные смещения также представлены на рис. 5. Что касается толщины пластины, компоненты смещения U1 и U2 представляют собой распределения горизонтального смещения (сплошная кривая) и вертикального смещения (пунктирная кривая) соответственно. Амплитуды смещения и толщина пластины нормированы на максимальное значение на каждом графике. По значениям U1<sub>max</sub>/U2<sub>max</sub> мы можем определить, какое смещение является более доминирующим в пластине.

Наконец, выбор моды волны должен быть основан на волновых модах более низкого порядка, поскольку моды более высокого порядка демонстрируют более высокую дисперсию и большее рассеяние из-за более низкой концентрации напряжений. Эти результаты также сопоставимы с предыдущими исследованиями [18].



Рис. 5. Компоненты смещения мод распространяющихся волн на различных частотах.



Рис. 6. Результат расчета методом конечных элементов: луч фазированной решетки, направленный под углом 5° в угловом клине 31°, в момент 6 мкс (*a*); распространение моды А0 направленной волны в стальной пластине в момент 40 мкс (*б*).

Метод конечных элементов, описанный в предыдущем разделе, также используется для моделирования распространения волновых мод (рис. 6a). Поскольку S0 распространяется как высокодисперсионная мода при 3 МГц · мм, она ослабляется и затухает, так что мода A0 будет единственной модой, распространяющейся на большие расстояния (рис. 6b). Анализ методом конечных элементов тестовой модели также показывает характеристики моды A0. Поскольку концентрация волновых напряжений находится в средней плоскости пластины, обеспечивается более высокая вероятность обнаружения глубоких дефектов.

# 5.2. Обнаружение дефектов

Эксперименты проводились на стальной пластине толщиной 0,63 мм с обработанными поверхностными и сквозными дефектами. Геометрия просверленных отверстий и изображение В-скана четырех близко расположенных отверстий сквозной толщины диаметром 1,5 мм показаны на рис. 7. Как можно видеть, изображения В- и S-сканов с использованием моды A0 направленной волны дают приемлемую чувствительность и разрешение для отверстий малого диаметра и близко расположенных отверстий.



Рис. 7. Изображения В- и S-сканов сквозных отверстий диаметром 1,5 мм, полученные путем секторного сканирования.

Кроме того, была изготовлена новая конфигурация поверхностных и внутренних дефектов для оценки метода секторного сканирования. Дефекты включали два отверстия диаметром 2 мм: просверленное и поверхностное, а также смоделированную поверхностную разветвленную трещину, геометрия и расположение которых показаны на рис. 8. Как видно из результатов В- и S-сканирования, секторное сканирование может четко идентифицировать смоделированную разветвленную трещину и другие отверстия, которые были расположены с большим интервалом, чем в предыдущих процедурах контроля.



Рис. 8. Изображения В- и S-сканов нескольких отражателей, включая моделируемые разветвленную трещину и две коррозионные язвы диаметром 2 мм, полученные с помощью секторного сканирования.

Секторное сканирование обеспечивает широкий диапазон углового сканирования, позволяющий сканировать такие вышеупомянутые области повреждения, и показывает лучшее осевое разрешение, а не пространственное разрешение, которое было применимо для обнаружения крестообразных дефектов. С другой стороны, рассеяние на дефектах является основным фактором затухания при контроле направленными волнами [19], который необходимо изучить для поиска подходов к устранению недостатков в будущих работах.

#### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ультразвуковая ФАР-визуализация используется для контроля дефектов в стальной пластине направленными волнами. Для этой цели высокочастотные моды направленных волн, возникающие в результате использования преобразователя с линейной фазированной решеткой, численно моделируются и экспериментально генерируются с использованием секторного сканирования. Численные результаты используются для исследования поведения высокочастотных волноводных мод. Результаты экспериментов показали, что высокочастотная мода A0 дает приемлемую чувствительность и разрешение для малых диаметров сквозных и поверхностных дефектов. Секторное сканирование также показало лучшее осевое разрешение, а не пространственное, что оказалось практически применимым для крестообразных дефектов. В будущих работах, чтобы улучшить контроль дефектов, рассеяние от них должно быть устранено путем изучения других методов визуализации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Agarwala V.S., Reed P.L., Ahmad S. Corrosion detection and monitoring-A review // CORROSION. Orlando. Florida. USA, 2000.

2. Krautkrämer J., Krautkrämer H. Ultrasonic testing of materials // Springer Science & Business Media. 2013.

3. *ZhuW., Rose J., Barshinger J., Agarwala V.* Ultrasonic guided wave NDT for hidden corrosion detection // Journal of Research in Nondestructive Evaluation. 1998. V. 10. P. 205–225.

4. *Michaels J.E., MichaelsT.E.* Guided wave signal processing and image fusion for in situ damage localization in plates // Wave Motion. 2007. V. 44. P. 482–492.

5. Rose J.L., Barshinger J. Using ultrasonic guided wave mode cutoff for corrosion detection and classification // Ultrasonics Symposium. 1998. Proceedings. 1998. IEEE. 1998. P. 851-854.

6. Silva M., Gouyon R., Lepoutre F. Hidden corrosion detection in aircraft aluminum structures using laser ultrasonics and wavelet transform signal analysis // Ultrasonics. 2003. V. 41. P. 301-305.

7. Sargent J. Corrosion detection in welds and heat-affected zones using ultrasonic Lamb waves // Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2006. V. 48. P. 160—167.

8. Jhang K.-Y., Shin M.J., Lim B.O. Application of the laser generated focused-Lamb wave for non-contact imaging of defects in plate // Ultrasonics. 2006. V. 44. P. e1265—e1268.

9. *Rathod V., Mahapatra D.R.* Ultrasonic Lamb wave based monitoring of corrosion type of damage in plate using a circular array of piezoelectric transducers // NDT & E International. 2011. V. 44. P. 628–636.

10. *Beard M., Lowe M., Cawley P.* Ultrasonic guided waves for inspection of grouted tendons and bolts // Journal of Materials in Civil Engineering. 2003. V. 15. P. 212–218.

11. Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review // NDT & E International. 2006. V. 39. P. 525-541.

12. Deutsch W., Cheng A., Achenbach J. Self-focusing of Rayleigh waves and Lamb waves with a linear phased array // Journal of Research in Nondestructive Evaluation. 1997. V. 9. P. 81-95.

13. Sicard R., Chahbaz A., Govette J. Guided Lamb waves and L-SAFT processing technique for enhanced detection and imaging of corrosion defects in plates with small depth-to wavelength ratio // Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on. 2004. V. 51. P. 1287—1297. 14. Sicard R., Goyette J., Zellouf D. A SAFT algorithm for lamb wave imaging of isotropic plate-like structures // Ultrasonics. 2002. V. 39. P. 487—494.

15. Prager J., Hoever C., Brekow G., Kreutzbruck M. Flaw detection with guided waves using phased array technique / Proceedings on the 10th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT). 2010. 16. Rose J.L. Ultrasonic waves in solid media. Cambridge university press, 2004.

17. Azar L., Shi Y., Wooh S.-C. Beam focusing behavior of linear phased arrays // NDT & E International. 2000. V. 33. P. 189-198.

18. Ranjbar Naserabadi M.J., Sodagar S. Ultrasonic High Frequency Lamb Waves for Evaluation of Plate Structures // Acoustical Physics. 2017. V. 63. P. 402–409.

19. Naserabadi M.R., Hayatgheib B., Sodagar S. A Simulation Study of Attenuation Factors in a Gas Pipeline Guided Wave Testing / 4th Iranian International NDT Conference. 2017.

# ПРОБЛЕМЫ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2021 г. Ю.Г. Матвиенко<sup>1</sup>, И.Е. Васильев<sup>1,\*</sup>, Д.В. Чернов<sup>1</sup>, В.И. Иванов<sup>2</sup>, С.В. Елизаров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Россия 101990 Москва, Малый Харитоньевский пер., 4 <sup>2</sup> ЗАО «НИИИН МНПО Спектр», Россия 119048 Москва, ул. Усачева, 35, стр. 1 <sup>3</sup>ООО «Интерюнис—ИТ», Россия 111024 Москва, шоссе Энтузиастов, 206 \*E-mail: vie01@rambler.ru

> Поступила в редакцию 18.05.2021; после доработки 15.07.2021 Принята к публикации 10.08.2021

Выполнена оценка точности локации источников акустической эмиссии (АЭ) в зонах концентраторов (центральных отверстий диаметром 5 мм), расположенных на расстоянии 40 мм от приемных преобразователей при испытаниях на разрыв плоских образцов из стали, алюминиевого сплава и композита с габаритными размерами  $550 \times 50 \times 4$  мм. Изучена зависимость расчетной скорости распространения импульсов АЭ от их амплитуды и парциальной энергии различных мод волн Лэмба. При пороговом методе регистрации сигналов погрешность локации источников АЭ, возникающая при расстоянии между источником АЭ и приемным преобразователем АЭ (ПАЭ)  $\Delta L < 0,1$  м, может превышать 10 % относительно базового размера (*B*) области локации. Для импульсов АЭ амплитудой  $u_m < 60$  дБ при уменьшении расстояния  $\Delta L < 0,05$  м уровень погрешности может достигать 20—30 % относительно базового размера антенной решетки.

*Ключевые слова*: акустическая эмиссия, локация, пороговый метод, скорость импульса, амплитуда, парциальная энергия, погрешность измерения.

DOI: 10.31857/S0130308221090049

#### введение

В настоящее время основным методом регистрации событий АЭ является фиксация превышения нарастающим фронтом принимаемого сигнала установленного порога дискриминации напряжения  $u_{th}$  на входе системы АЭ контроля [1—5]. Порог дискриминации устанавливается в зависимости от уровня возникающих помех. При этом необходимо учитывать, что компактный широкополосный акустический импульс, излучаемый источником АЭ, при прохождении акустического канала разделяется на несколько мод волн Лэмба в виде цуга отдельных импульсов различной амплитуды, распространяющихся с разной скоростью [3]. Преобразователи акустической эмиссии могут регистрировать не только моменты прихода разных мод упругих волн, но и разных фаз этих мод в зависимости от выбранных настроек АЭ системы, в том числе уровня порога дискриминации сигналов  $(u_{tb})$  и диапазона частот пропускания цифровых фильтров ( $\Delta f$ ). Стандартный алгоритм расчета скорости распространения импульсов АЭ основан на линейной зависимости между разностью времен их прихода на ПАЭ локационной группы и расстоянием между приемными преобразователями. Такой подход не учитывает многие факторы, влияющие на скорость распространения импульса в диспергирующей среде акустического канала. Для корректного вычисления скорости распространения импульсов АЭ вблизи ПАЭ при пороговом методе регистрации импульсов АЭ необходимо учитывать нелинейные изменения энергетических и частотно-временных параметров затухающих и расходящихся во времени высокочастотных мод волнового пакета при прохождении акустического канала с учетом его дисперсионных свойств.

Следовательно, при регистрации импульсов вблизи источника АЭ с использованием порогового метода момент пересечения фронтом сигнала порога дискриминации  $u_{th}$  зависит не только от уровня энергии основных низкочастотных мод, но и от доли высокочастотных составляющих мод волнового пакета, создающих дополнительные погрешности при определении разности времени прихода (РВП) импульсов на ПАЭ антенной решетки.

С целью оценки точности алгоритмов, используемых для локации АЭ событий в наиболее применяемых системах акустической эмиссии Aline-32D (РФ), PCI-2 (США), Vallen (ФРГ), были проведены эксперименты по испытанию плоских образцов из стали стЗ, алюминиевого сплава АМгЗ и многослойного полимерного композитного материала (ПКМ) на разрыв. Задача настоящих исследований состояла в выявлении основных факторов возможных погрешностей стандартного алгоритма локации источников АЭ, когда их регистрация происходит вблизи ПАЭ при  $\Delta L < 100$  мм.

#### ОБРАЗЦЫ, АППАРАТУРА ДЛЯ АЭ ДИАГНОСТИКИ И НАГРУЖАЮЩАЯ УСТАНОВКА

Габаритные размеры испытываемых образцов составляли  $550 \times 50 \times 4$  мм. На расстоянии 110 мм от их торцевых поверхностей были просверлены два отверстия диаметром 5 мм, которые служили концентраторами напряжений при испытаниях образцов на разрыв. При проведении диагностики АЭ преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) устанавливались на расстоянии 40 мм от концентраторов, так что размер линейной локации составлял B = 360 мм. На рис. 1 показана испытываемый образец (1) — полоса из сплава АМгЗ в захватах (2 и 3) нагружающей установки Instron-5982, на поверхности которого на расстоянии 40 мм от каждого концентратора с применением струбцин (5) через слой контактной смазки были установлены резонансные преобразователи R15a—SMA (4) производства фирмы Mistras (США).

Перед проведением испытаний образцов на разрыв определялись оптимальные настройки АЭ системы, включающие выбор порога дискриминации сигналов  $u_{th} = 42$  дБ, полосы пропускания фильтров  $\Delta f_p = 30$ —500 кГц, средней групповой скорости импульсов АЭ, составившей  $V_g = 3300$  м/с при максимальном размере зоны локации B = 360 мм. Групповая скорость распространения импульсов определялась с применением электронного генератора MFG-7210MA (КНР), оснащенного широкополосным преобразователем UT-1000, выпускаемого фирмой Mistras (США), при максимальной амплитуде импульсов  $u_m = 74$  и 80 дБ, регистрируемой преобразователями R15а — SMA на расстоянии 400 и 40 мм от источника АЭ.



Рис. 1. Образец (1) в захватах (2 и 3) электромеханической установки Instron-5982; преобразователи R15α—SMA (4) закреплены на образце струбцинами (5).

Испытания образцов проводили на электромеханической установке Instron-5982 (США) при автоматическом повышении нагрузки со скоростью перемещения активной траверсы стенда 1 мм/мин. Синхронно с регистрацией данных АЭ видеокамерой EOS—60D фирмы Canon (США) осуществляли видеосъемку процесса деформирования и разрушения образцов в зонах концентраторов. Для исключения шумовых сигналов, возникающих от захватов нагружающего устройства, проводили фильтрацию значений разности времен прихода импульсов АЭ по условию  $\Delta t < 250$  мкс, рассчитанному исходя из расстояния между приемными преобразователями антенной решетки.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

В ходе диагностики АЭ при испытаниях образцов на разрыв в зонах концентраторов наблюдалась неравномерное накопление повреждений, вследствие чего интенсивность процессов разрушения материала в местах расположения верхнего и нижнего отверстия заметно отличалась, что отражалось на графиках накопления событий АЭ, регистрируемых в зонах концентраторов.



Рис. 2. Картины деформирования и разрушения образцов из алюминиевого сплава АМГ-3 (*a*), стали ст3 (*б*) и ПКМ (*в*) в местах расположения отверстий диаметром = 5 мм.

Образование и развитие доминантных трещин, сопровождаемое потерей несущей способности и разрушением образцов, также происходило в одном из концентраторов. На рис. 2 приведено сравнение картин деформирования материала и разрушения образцов из сплава АМг-3 (a), стали ст3 ( $\delta$ ) и ПКМ (e) в местах расположения отверстий.

В зонах концентраторов, где происходили наиболее интенсивные локальные разрушения структуры материала, должна регистрироваться и максимальная плотность индикаций источников АЭ. Однако, как показали проведенные эксперименты, максимальная плотность индикаций источников АЭ, регистрируемая системами PCI-2 и Vallen была смещена относительно расположения концентраторов соответственно на 40—65 мм от центра отверстий. Причем система Vallen регистрировала максимальную плотность индикаций источников АЭ уже вне области локации на расстоянии 20—25 мм от ПАЭ.

На графиках рис. 3 приведены результаты локации источников АЭ и графики их накопления, зарегистрированные системами Aline-32D (a, c), PCI-2 (b, d) и Vallen (b, e), при испытаниях на разрыв образца из стали ст3.



Рис. 3. Результаты локации источников АЭ и графики их накопления, зарегистрированные системами Aline-32D (*a*, *e*), PCI-2 (*б*, *d*) и Vallen (*e*, *e*), при испытании образца из стали ст3 на разрыв.

Как следует из сравнения графиков (*a*—*в*) на рис. 3, локация источников АЭ, регистрируемых с применением системы Aline-32D в области концентраторов, характеризуется максимальным рассеянием плотности их индикаций в интервале ±40 мм относительно центра отверстий, достигающей в зоне образования трещины 250—270 ед/мм. Наибольшая плотность индикаций источников АЭ, составляющая соответственно 500 и 800 ед/мм, регистрировалась системой PCI-2 в местах установки ПАЭ № 3 и № 4 на расстоянии 40 мм от концентраторов (график  $\delta$  на рис. 3). Максимальная погрешность локации источников АЭ, достигающая 60—65 мм относительно центра отверстий, как следует из графика (*в*), регистрировалась системой Vallen. Сопоставление кривых накопления событий АЭ на графиках (*г*), (*д*) и (*е*) свидетельствует о том, что если тренд их роста, регистрируемый системами Aline-32D и PCI-2, был достаточно близок и отличался лишь количеством событий, то тренд накопления, регистрируемый системой Vallen, заметно выделялся. При этом количество событий АЭ, регистрируемый системой Aline-32D при испытаниях всех образцов на разрыв, было в 3-4 раза большим по сравнению с зарубежными аналогами.

Как правило, расчет координат источников АЭ проводится по стандартной методике [1, 2] с использованием двух параметров: разности времен прихода импульсов АЭ на преобразователи антенной решетки ( $\Delta t$ ) и скорости распространения акустических сигналов в стенке контролируемого изделия ( $V_g$ ). Согласно ПБ 03-593-03, групповая скорость  $V_g$  акустического импульса определяется следующим образом. Посредством источника Су—Нильсена или электронного имитатора, расположенного вне зоны локации на расстоянии 30—50 мм от одного из преобразователей акустической эмиссии, излучают импульсы АЭ. Исходя из известного расстояния между ПАЭ и значений разности прихода импульсов на преобразователи, рассчитывают скорость их распространения в диагностируемом изделии.

Стандартно применяемый пороговый алгоритм регистрации импульсов с использованием вычисляемого значения скорости  $V_{e}$  не учитывает многих факторов влияющих на точность локации источника АЭ, когда развивающийся дефект находится в вблизи ПАЭ, где моды волн Лэмба еще не разошлись и передний фронт импульса АЭ имеет сложную структуру. Одним из таких факторов, влияющим на точность локации в случае, когда источник АЭ расположен вблизи ПАЭ при пороговом методе регистрации сигналов, является погрешность определения момента пересечения фронтом волны установленного уровня порога дискриминации  $u_{th}$ . Как показали проведенные эксперименты, в зависимости от амплитуды принимаемого сигнала эта погрешность может достигать 60 мкс, что оказывает существенное влияние на разность времен прихода (РВП) импульсов АЭ на приемные преобразователи, а, следовательно, и уровень приведенной погрешности локации источников АЭ.

На графиках рис. 4 наглядно продемонстрирована зависимость момента  $t_{\phi}$  — превышения амплитудой сигнала порогового напряжения  $u_{th}$ , а, следовательно, и времени задержки ( $\Delta t_{\phi}$ ) его регистрации аппаратурой от крутизны фронта нарастающей волны.



Рис. 4. Влияние крутизны фронта сигнала АЭ на время его задержки при регистрации по пороговому методу.

Как отмечалось в публикациях [6—9], при малом расстоянии между ПАЭ и источником АЭ ( $\Delta X \leq 100$  мм) даже незначительные колебания приращения параметра  $\Delta t_{\phi}$  существенным образом сказываются на вычисляемых значениях  $V_g$ . По мере удаления источника АЭ от ПАЭ высокочастотные гармоники (f = 250—400 кГц) волнового пакета быстро затухают. Анализируя приведенные на рис. 5 спектрограммы сигналов, зарегистрированные на расстояниях  $\Delta L$ : 30 (a),



Рис. 5. Спектрограммы сигнала АЭ, зарегистрированные на расстоянии 30 мм (*a*), 90 мм (*б*) и 120 мм (*в*) от ПАЭ в композитной пластине [6].

90 (б) и 120 (в) мм от источника АЭ в композитной пластине [6], можно отметить, что по мере удаления ПАЭ уровень энергии регистрируемых импульсов заметно снижался за счет быстрого затухания высокочастотных гармоник. Если принять уровень энергии импульса на расстоянии  $\Delta L = 30$  мм от источника АЭ за 100 %, то, как следует из спектрограмм рис. 5, на расстоянии 90 мм он снижается более, чем в два раза, а на расстоянии 120 мм — практически в пять раз. На расстояниях, больших 150 мм, высокочастотные моды на спектрограммах фактически отсутствовали, а энергия сигналов снижалась более, чем в десять раз.

Быстрое затухание высокочастотных мод на расстояниях  $\Delta L > 100$  мм приводит к уменьшению разброса параметра  $\Delta t_{\phi}$  и, как следствие, росту и стабилизации вычисляемой групповой скорости импульса по мере удаления от источника АЭ [6—9].

Другим важным фактором, влияющим на погрешность локации источников АЭ, расположенных вблизи ПАЭ, является амплитуда регистрируемых импульсов. На рис. 6 показана гистограмма распределения амплитуды локационных импульсов, зарегистрированных системой Aline-32D, в ходе рассмотренных выше испытаний стальной полосы при уровне порога  $u_{th} = 42$  дБ и полосе пропускания цифровых фильтров  $\Delta f = 30$ —500 кГц.

Как следует из гистограммы распределения максимальных значений амплитуд, практически 99 % всех локационных импульсов имеет уровень  $u_m$  в интервале от 45 до 65 дБ. При этом менее 0,01 % из них было с амплитудой  $u_m > 85$  дБ, сопоставимый с той, которая возникает при сломе грифеля цангового карандаша (источник Су—Нильсена).

Для того, чтобы учесть совместное влияние амплитуды регистрируемых импульсов и высокочастотных гармоник на рассчитанную величину скорости распространения импульса вблизи источника АЭ при  $\Delta L \le 100$  мм были проведены экспериментальные исследования с использованием испытанной на разрыв полосы из стали стЗ с размерами 550×50×4 мм. В ходе экспериментов излучатель UT-1000 генератора импульсов MFG-7210MA и приемные преобразователи



Рис. 6. Дифференциальное распределение импульсов АЭ событий (N<sub>n</sub>), зарегистрированных при испытаниях стальной полосы с концентраторами на разрыв при уровне порога u<sub>th</sub> = 42 дБ и Δf = 30—500 кГц.



Рис. 7. Вид стальной полосы и мест расположения на ее поверхности источника АЭ (UT-1000) и приемных преобразователей (R15a—SMA).

R15a—SMA располагались как показано на рис. 7, а регистрация акустических сигналов осуществлялась при помощи системы Aline-32D.

Расчет групповой скорости распространения импульсов АЭ проводился согласно ПБ 03-593-03. Для исследования влияния спектральных и энергетических характеристик импульса АЭ на расчетное значение скорости  $V_g$  порог дискриминации и полоса пропускания частотных фильтров были выбраны такими же, как и при испытаниях полосы на разрыв:  $u_{th} = 42$  дБ и f = 30—500 кГц.

Использование генератора MFG-7210MA и излучателя UT-1000 позволило получать импульсы АЭ с уровнем максимальной амплитуды и парциальной энергией высокочастотных гармоник, аналогичные тем, какие регистрировались при испытаниях стальной полосы на разрыв, а именно, с уровнем амплитуды  $u_m = 50-90$  дБ и изменением доли парциальной энергии высокочастотных гармоник от 6 до 18 % в диапазоне f = 250-400 кГц ( $H_{250-400}$ ) относительно их полной энергии ( $H_{\Sigma}$ ).

На рис. 8 представлены графики изменения значений расчетной скорости V<sub>g</sub> от уровня максимальной амплитуды импульсов (a) и доли парциальной энергии высокочастотных гармоник



Рис. 8. Зависимость расчетной скорости распространения импульсов АЭ от амплитуды  $u_m(a)$  и доли парциальной энергии высокочастотных гармоник  $\chi=H_{250-400}/H_{\Sigma}(\delta)$  сигналов.

 $\chi = H_{250-400}/H_{\Sigma}$  (б), зарегистрированные приемным преобразователем R15а—SMA на расстоянии 50 мм от излучателя UT-1000 импульсов АЭ. Построенная по экспериментальным данным зависимость  $V_g = f(u_m, \chi)$ , приведенная на рис. 8*a*, может быть разделена на 4 характерные интервала: I, II, III, IV.

Как следует из графиков рис. 8, для сигналов АЭ, относящихся к интервалу I, при повышении уровня амплитуды  $u_m$  до 60 дБ и доли парциальной энергии высокочастотных гармоник  $\chi = H_{250-400}/H_{\Sigma}$  от 7 до 16 % наблюдается заметный рост рассчитанного значения групповой скорости импульсов от 1800 до 3000 м/с. Для сигналов интервала II зависимость вычисляемой скорости импульсов от доли парциальной энергии высокочастотных составляющих в спектре сигналов становится особенно наглядной. При повышении амплитуды импульсов от 60 до 75 дБ, как видно из графика 8*a*, уровень вычисленной групповой скорости сохраняется практически на одном уровне  $V_g = 2750$  м/с, когда доля энергии высокочастотных мод  $\chi < 12$  %. Для сигналов, относящихся к интервалу III с амплитудой  $u_m = 75$ —85 дБ, рост расчетной групповой скорости до 4250—4750 м/с происходит при повышении доли  $\chi > 12$  %. Следует отметить, что для сигналов IV интервала с амплитудой  $u_m > 85$  дБ, влияние энергия высокочастотных гармоник на расчетную групповую скорость импульсов, возрастающую от 4750 до 5400 м/с, проявляется когда их уровень уже превышает  $\chi > 14$  %.

Таким образом, чем больше доля энергии высокочастотных составляющих в спектре сигнала, тем больше значение расчетной групповой скорости  $V_g$  импульсов АЭ, регистрируемых ПАЭ расположенного вблизи от источника АЭ на расстоянии  $\Delta L < 100$  мм. Дальнейшее распространение импульса в стенке изделия сопровождается снижением энергии высокочастотных мод и их влиянием на крутизну фронта сигнала при пересечении уровня порога дискриминации  $u_{th}$ . При этом возрастает влияние основных низкочастотных гармоник. Поэтому для повышения точности локации источников АЭ, расположенных вблизи ПАЭ, необходимо установление зависимости  $V_g = f(u_m, \chi)$ , учитывающей не только уровень амплитуды импульсов от источников, расположенных вблизи ПАЭ, но и долю энергии высокочастотных гармоник в спектре этих сигналов.

Наблюдаемое на рис. 8*a* скачкообразное изменение групповой скорости на графике зависимости  $V_g = f(u_m, \chi)$  с повышением амплитуды импульсов обусловлено быстрым затуханием высокочастотных гармоник в ближней от источника АЭ зоне при практически неизменном уровне энергии низкочастотных мод. Вследствие этого задержка регистрации сигналов, определяемая по времени  $t_{\phi}$ , для импульсов АЭ, имеющих разные значения амплитуд, но близкие энергии высокочастотных мод, может быть практически одинаковой, как и вычисляемая групповая скорость волнового пакета  $V_{o}$ .

Как следует из гистограммы рис. 6, более 99 % всех зарегистрированных локационных импульсов имели максимальную амплитуду в интервале  $u_m = 45-65$  дБ. Согласно графика на рис. 8*a* их расчетная групповая скорость должна составлять примерно 2750 м/с. На графиках рис. 9 сопоставлены результаты линейной локации источников АЭ, полученные при расчетной скорости локационных импульсов  $V_a = 3300$  (*a*) и 2750 м/с (*б*).

Как видно из сравнения графиков на рис. 9, при скорости  $V_g = 2750$  м/с наибольшая плотность индикаций источников АЭ, достигающая 350 ед/мм, отмечается непосредственно в месте образования магистральной трещины, совпадающей с расположением отверстия в стальной полосе.



Рис. 9. Сопоставление результатов локации источников АЭ при испытании на разрыв стальной полосы, полученные при  $V_{o} = 3300$  м/с (*a*) и 2750 м/с (*б*).

#### ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Тестовые испытания систем контроля АЭ, включающих Aline-32D, PCI-2, Vallen, выполненные при испытаниях на разрыв плоских образцов из алюминиевого сплава AMr3, низкоуглеродистой стали ст3, и ПКМ, показали, что при расположении ПАЭ (R15a—SMA) на расстоянии 40 мм от концентраторов (отверстий диаметром 5 мм), погрешность превышала 10 % относительно базового размера B = 360 мм. При этом наилучшая кучность результатов (плотность индикаций источников АЭ событий) была показана системой PCI-2, а уровень погрешности локации источников АЭ не превышал 11 %. Наибольшая погрешность локации источников АЭ, достигающая 19 %, была получена с использованием системы Vallen. Результаты локации источников АЭ в области концентраторов, полученные с применением системы Aline-32D, имели в интервале ±40 мм относительно центра отверстий значительное рассеяние индикаций с высокой плотностью регистрации событий АЭ, а уровень возможной погрешности локации источников АЭ в зонах отверстий не превышал 11 %.

2. Экспериментальные исследования возможных погрешностей локации источников АЭ, возникающих в случае расположении источников АЭ вблизи ПАЭ, проводились на полосе из стали ст3 при испытании на растяжение. Для генерации сигналов АЭ, аналогичных зарегистрированным при испытаниях полосы, использовался генератор импульсов MFG-7210MA с подключенным широкополосным преобразователем UT-1000. Результаты исследований, приведенные на графиках рис. 4—8, позволили выявить основные факторы, снижающие точность локации источников АЭ, при их расположении вблизи ПАЭ на расстоянии  $\Delta L < 100$  мм.

2.1. При пороговом методе регистрации аппаратурой момента пересечения сигналом уровня порога  $u_{th}$  время  $t_{\phi}$  зависит от крутизны фронта набегающей волны, определяемой уровнем энергии высокочастотных гармоник (см. рис. 4, 5). Увеличение доли парциальной энергии высокочастотных составляющих спектра  $\chi > 10$  % заметно влияет на крутизну фронта сигнала, что уменьшает время  $\Delta t_{\phi}$  — задержки его регистрации аппаратурой, а, следовательно, приводит к повышению расчетной скорости импульсов вблизи источника АЭ.

2.2. Для снижения возможных погрешностей локации источников АЭ, превышающих 10 % от базового размера антенной решетки и возникающих при расстояниях между ПАЭ и источником меньшем 100 мм, при определении групповой скорости распространения импульсов в объекте необходимо учитывать уровень максимальной амплитуды импульсов  $u_m$  и долю энергии высокочастотных составляющих в спектре сигналов  $\chi = H_{250-400}/H_{\Sigma}$ . Как следует из графиков рис. 8, зависимость  $V_g = f(u_m, \chi)$  является нелинейной. Если уровень высокочастотных мод снижается достаточно быстро, то энергия низкочастотных гармоник сохраняется практически неизменной. Поэтому повышение максимальной амплитуды генерируемых импульсов не всегда сопровождается увеличением их расчетной скорости, так как ее рост зависит не только от уровня  $u_m$ , но и доли парциальной энергии  $\chi$  высокочастотных гармоник.

2.3. Согласно результатам, приведенным на рис. 6, более 99 % всех импульсов событий АЭ, зарегистрированных с применением системы Aline-32D при испытаниях стальной полосы на растяжение (см. рис. 3), имели максимальную амплитуду в интервале  $u_m = 45-65$  дБ. В соответствии с графиком рис. 8*a*, их расчетная групповая скорость должна составлять примерно  $V_g = 2750$  м/с. Сопоставление результатов локации источников АЭ, полученных при значениях расчетной скорости локационных импульсов 3300 м/с и пересчитанных на уровень  $V_g = 2750$  м/с, как видно из рис. 9, свидетельствует о том, что при этой расчетной скорости наибольшая плотность индикаций источников событий АЭ регистрируется непосредственно в области концентраторов (отверстий в стальной полосе).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате явления дисперсии при прохождении акустического канала компактный импульс «расплывается», разделяясь на волновые пакеты различных мод, каждая из которых имеет свою длину, частоту и скорость распространения в стенке изделия [3—9]. Следовательно, единой скорости распространения упругих волн в изделиях фактически не существует, а есть лишь набор разных скоростей для характерных мод волн Лэмба. Поэтому ПАЭ в каждый момент времени могут регистрировать приход разных мод волнового пакета в зависимости от того, какая из них менее затухла в акустическом канале при распространении от источника АЭ до приемных преобразователей. Совместное воздействие перечисленных выше факторов влияет на время регистрации импульсов приемными преобразователями, а, следовательно, на вычисление их групповой скорости и разницу времени прихода на ПАЭ, что приводит к погрешностям при локации источников АЭ. Особенно это проявляется, когда источник АЭ находится вблизи от ПАЭ на расстоянии  $\Delta L \leq 100$  мм. Вышеперечисленные факторы, влияющие на групповую скорость волнового пакета, дают основания полагать, что для достижения требуемой точности локации источников АЭ, меньшей 10 % относительно базового размера антенной решетки при пороговом методе регистрации импульсов от источников, расположенных вблизи ПАЭ, необходимо установление зависимости  $V_g = f(u_m, \chi)$ , учитывающей не только уровень амплитуды регистрируемых импульсов, но и долю энергии высокочастотных гармоник. Поэтому более корректно групповую скорость распространения импульса в стенке изделия вычислять не по результатам тестирования с применением источника Су—Нильсена, а использовать для этого источники с медианным уровнем амплитуды сигналов, регистрируемых в ходе предварительных экспериментов с учетом доли парциальной энергии высокочастотных составляющих спектра.

Для повышения точности локации источников АЭ используют различные методики, основанные на применении метода  $\Delta t$ -mapping [10—14], нейронных сетей [15—18], исследовании частотно-временных параметров регистрируемых сигналов [19—21]. Такие методики, как правило, требуют большого количества предварительных исследований. Необходимость их проведения обусловлена в частности тем, что в изделиях из многослойных сложно структурированных композитных материалов с локальными усилениями жесткости (стрингерами, нервюрами) имеет место анизотропия акустических свойств, в связи с чем упругие волны могут распространяться с разными скоростями на различных участках объекта и в различных направлениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-19-00351).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов (ПБ 03-593-03). Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр. Серия 03. Выпуск 38 / Кол. авт. М.: НТЦ Промышленная безопасность, 2003. 53 с.

2. ГОСТ Р ИСО 22096—2015. Контроль состояния и диагностика машин. Метод акустической эмиссии. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.

3. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017. 368 с.

4. Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф., Быстрова Н.А., Галкин Д.И. Основы диагностики технических устройств и сооружений. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 445 с.

5. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Кареев А.Е., Лебедев Е.Ю., Кожемякин В.Л., Рамазанов И.С., Харламов Б.М. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций / Под ред. Л.Н. Степановой, А.Н. Серьезнова. М.: Машиностроение—Полет, 2008. 440 с.

6. *Makhutov N.A., Vasil'iev I.E., Chernov D.V.* et al. Influence of The Passband of Frequency Filters on the Parameters of Acoustic Emission Pulses // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 3. P. 173—180. [*Махутов Н.А., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Иванов В.И., Елизаров С.В.* Влияние полосы пропускания частотных фильтров на параметры импульсов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2019. № 3. С. 3—14.]

7. Матвиенко Ю.Г., Иванов В.И., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Мищенко И.В. Снижение погрешности при определении скорости распространения волнового пакета в композиционных материалах // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 1. С. 115—120.

8. *Matvienko Yu. G., Vasil'ev I.E., Bubnov M.A.* et al. Influence of Dimensions and Shape of Process Cutouts on the Accuracy of Locating Acoustic Emission Sources // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 2. P. 101—109. [*Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Бубнов М.А., Чернов Д.В.* Влияние размеров и формы технологических вырезов на точность локации источников акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2020. № 2. С. 3—11.]

9. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Мищенко И.В. Повышение точности линейной локации источников акустической эмиссии / В сб.: XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2019). Сборник трудов конференции. 2020. С. 669—672.

10. *Eaton M.J., Pullin R., Holford K.M.* Acoustic emission source location in composite materials using Delta T Mapping // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2012. V. 43 (6). P. 856–863.

11. Baxter M.G., Pullin R., Holford K.M., Evans S.L. Delta T source location for acoustic emission // Mechanical Systems and Signal Processing. 2007. V. 21 (3). P. 1512—1520.

12. *Al-Jumaili S.K., Pearson M.R., Holford K.M., Eaton M.J., Pullin R.* Acoustic emission source location in complex structures using full automatic delta T mapping technique // Mechanical Systems and Signal Processing. 2016. V. 72–73. P. 513–524.

13. Hensman J., Mills R., Pierce S.G., Worden K., Eaton M. Locating acoustic emission sources in complex structures using Gaussian processes // Mechanical Systems and Signal Processing. 2010. V. 24 (1). P. 211—223. 14. Kundu T. Acoustic source localization // Ultrasonics. 2014. V. 54. No. 1. P. 25—38.

14. Kundu I. Acoustic source localization // Ultrasonics. 2014. v. 34. No. 1. P. 25—56.

15. *Kalafat S., Sause M.G.R.* Acoustic emission source localization by artificial neural networks // Structural Health Monitoring. 2015. V. 14. Is. 6. P. 633—647. DOI: 1475921715607408

16. Grabowski K., Gawronski M., Staszewski W.J., Uhl T., Packo P. Acoustic emission localization through excitability prediction and dispersion removal technique // Progress in acoustic emission XVIII, JSNDI & IIIAE-23. December 5–9. 2016. P. 217–220.

17. *Kalafat S., Bornschlegl M., Sause M.G.R.* Localization of acoustic emission sources in complex three dimensional fiber composites using artificial neural networks // Progress in acoustic emission XVIII, JSNDI & IIIAE-23. December 5—9. 2016. P. 221—226.

18. *Kurz J.* New approaches for automatic three dimensional source localization of acoustic emissions — Applications to concrete specimens // Ultrasonics. 2016. V. 63. P. 155—162.

19. Sikdar S., Mirgal P., Banerjee S., Ostachowicz W. Damage-induced acoustic emission source monitoring in honeycomb sandwich composite structure // Composites Part B. 2019. V. 158. P. 179–188.

20. Dong L., Li X., Xie G. An Analytical Solution for Acoustic Emission Source Location for Known P Wave Velocity System // Mathematical Problems in Engineering. 2014. P. 1–6. DOI: 10.1155/2014/290686

21. Pullin R., Baxter M., Eaton M.J., Holford K.M., Evans S.L, Novel acoustic emission source detection // J. Acoust. Emiss. 2007. V. 25. P. 215—223.

УДК 620.192.63

# РЕНТГЕНОТОМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ПОР В ОБРАЗЦАХ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. СКАНИРОВАНИЕ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ

©2021 г. А.А. Демидов<sup>1,\*</sup>, О.А. Крупнина<sup>1,\*\*</sup>, Н.А. Михайлова<sup>1,\*\*\*</sup>, Е.И. Косарина<sup>3,\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Россия 105005 Москва, ул. Радио, 17 E-mail: \*lagazz@yandex.ru; \*\*Fess.m.d@gmail.com; \*\*\*natsavv@inbox.ru; \*\*\*\*ekaterina-kosar@mail.ru

> Поступила в редакцию 03.06.2021; после доработки 14.07.2021 Принята к публикации 29.07.2021

Представлено описание проведенных рентгенотомографических исследований образцов из полимерных композиционных материалов с целью количественного определения объемной доли пор. Томографические исследования включают два этапа: сканирование и реконструкция изображения. На первом этапе применен метод субпиксельного сканирования, повышающий разрешающую способность изображения. При реконструкции изображения применены корректировки, предусмотренные в программном обеспечении томографа. Результаты оценки объемной дол пор, полученные при субпиксельном и цилиндрическом сканировании, показали их полную сходимость.

*Ключевые слова*: полимерный композиционный материал (ПКМ), объемная доля пор (ОДП), рентгеновская компьютерная томография (РКТ), субпиксельное сканирование.

DOI: 10.31857/S0130308221090050

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные технические средства широко использует полимерные композиционные материалы (ПКМ), привлекательность которых состоит в том, что по своим прочностным, упругим, теплостойким и другим свойствам превосходят традиционные конструкционные материалы. Для внедрения ПКМ нового поколения в элементы авиационных конструкций, работающих в экстремальных условиях, необходимо помимо организационных мер обеспечения их производства и внедрения [1], выполнение высоких требований их качества [2]. Дефекты в ПКМ возникают на любой стадии производственного процесса из-за нарушений и отклонений технологии. Наиболее частыми и опасными дефектами являются макродефекты: трещины, расслоения, непроклеи. Для их обнаружения используют акустические методы неразрушающего контроля [3, 4]. Кроме макродефектов в ПКМ присутствуют дефекты микроструктуры: поры (зоны повышенной пористости). Они возникают по причине отклонения оптимального соотношения матрицы и армирующего наполнителя при формировании, нарушения ориентации волокон и образования складок, и все это, в конечном счете, ухудшает прочность [4]. Появление пор может быть связано с наличием влаги в связующем или нарушением нагрева, низким давлением. Поры являются концентраторами напряжений в матрице при внешнем воздействии на конструкцию или наличием внутренних остаточных напряжений, предпосылкой образования трещин в матрице или вдоль границы раздела «волокно-матрица» [5-7]. Наличие пористости ухудшает характеристики матрицы. По данным [8, 9] пористость 1 % снижает прочность до 15 %, а усталостную долговечность — на 50 %.

Основными видами неразрушающего контроля ПКМ, в частности на обнаружение пор, являются: акустический, радиационный, тепловой и оптический [10, 11]. Индикации применяемых видов неразрушающего контроля (НК) в основном качественные: они определяют наличие или отсутствие дефекта. Одной из проблем качества ПКМ является оценка объемной доли пор, содержащейся в материале [12]. Для получения количественных данных о порах в лаборатории неразрушающих методов контроля ФГУП «ВИАМ» проведены исследования оценки объемной доли пор методом рентгеновской компьютерной томографии.

# 2. ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 2.1. Условия сканирования объектов для получения томограмм

Как известно, одним из показателей качества ПКМ является отсутствие пористости. На точность оценки объемной доли пор в образцах из ПКМ по результатам РКТ влияют три фактора:

параметры томографического сканирования объекта контроля;

параметры реконструкции изображения;

методика анализа томограммы и вычисления доли пор.

Вычисление объемной доли пор *V*, %, в образце по результатам РКТ осуществляется по следующей формуле:

$$V = \frac{\sum V_{\text{ne}\phi}}{V_{\text{mat}}} \cdot 100 \%,$$

где  $\sum V_{\text{деф}}$  — сумма объемов пор, мм<sup>3</sup>, равная сумме объемов всех вокселей, которые по величине серого отнесены к дефектным;  $V_{\text{мат}}$  — объем исследуемого образца (ИО), мм<sup>3</sup>, равный сумме объемов всех вокселей, расположенных внутри и на поверхности образца.

При определении точности результатов измерений, необходимо знать истинное значение измеряемой величины. В случае оценки значения объемной доли пор не существует метода, который бы дал ее истинное значение для конкретного образца. В качестве решения данной задачи было решено вместо истинного использовать действительное значение, определяемое по результатам измерений ОДП при анализе томограммы ИО, полученной с размером вокселя не более 15 мкм, с учетом малого объема ИО (не более 300 мм<sup>3</sup>) [13].

Для достижения высокого пространственного разрешения томографических данных было применено субпиксельное сканирование (Subpix).

# Метод субпиксельного сканирования в рентгеновской компьютерной томографии (РКТ)

Исходными данными для реконстукции томограммы является набор проекционных цифровых изображений ИО. Детализация проеционных изображений зависит от размера пикселя матрицы детектора и коэффициента геометрического увеличения: чем меньше размер пикселя, тем выше пространственное разрешение изображения. С другой стороны, чем крупнее пиксель, тем больше количество собираемых им фотонов рентгеновского излучения, тем выше чувствительность детектора к излучению, тем выше отношение сигнал/шум (ОСШ). Большинство производителей систем для промышленной компьютерной томографии добавляют программно-аппаратный функционал, позволяющий повысить пространственное разрешение томографических данных путем смещения детектора на субпиксельное расстояние по вертикали и горизонтали. Смещение детектора позволяет создать 4 изображения на каждую проекцию, которые после совмещения позволяют получить конечное изображение с повышенным пространственным разрешением. Описание этого метода приведено в работах [14—16], оно касается обработки оптических изображений. В работах не приводится влияние различных факторов на точность воспроизведения изображений, тем более рентгенотомографических. Сущность метода субпиксельного сканирования заключается в следующем: одно и то же изображение проецируется четыре раза на одну и ту же матрицу детектора размером  $m \times n$  пикселей (m — строки; n — столбцы), причем проецирование проводится со смещением детектора на половину пикселя [15]. Схема экспонирования представлена на рис. 1.

В результате обработки проекционных данных получают итоговое изображение с пространственным разрешением в два раза выше, чем на матрице с одним экспонированием без смещения.

Пусть изображение дефекта занимает частично и полностью всего девять пикселей (рис. 2*a*). Уровень серого в каждом из пикселей соответствует части площади дефекта, который он занял на данном пикселе. При сканировании в конусном пучке на матрице получаем изображение, представленное позицией (*a*), будем считать это нулевым положением. Для повышения разрешающей способности изображения применяем способ субпиксельного сканирования (SubPix). При смещении детектора вниз на расстояние, равное d = l/2, на матрице получаем новое изображение, обозначенное позицией (рис. 2*b*). При смещении детектора вниз на расстояние на матрице соответствует рисунку, обозначенному позицией (рис. 2*b*). При смещении детектора вверх, относительно положения (*в*), получаем еще одно новое изображение (рис. 2*c*). При сложении четырех изображений по определенному алгоритму (SubPix), заложенному в ПО томографа, получаем изображение дефекта, состоящее из «малых» пикселей; их размеры в два раза меньше исходных [16, 17].



Рис. 1. Схема получения массива данных при субпиксельном сканировании: *I*— излучатель; *2*— поворотный стол; *3*— образцы из ПКМ; *4*— детекторная система.



Рис. 2. Этапы субпиксельного сканирования для повышения пространственного разрешения цифрового изображения.

# 2.2. Проведение экспериментов

Образцы для проведения исследований выполнены из ПКМ, изготовленного двумя разными способами (табл. 1). Каждый исследуемый материал представлен шестью образцами. Значения напряжения и тока трубки определялись таким образом, чтобы создать сигнал на детекторе в диапазоне 20—80 % и обеспечить минимальный размер фокусного пятна.

Таблица 1

Способ изготовления ПКМ для образцов			
Способ изготовления ПКМ	Номера образцов, из материалов, изготовленных разными способами		
ПКМ на основе 3 слоев углеродной ткани марки ВТкУ-2.200 и 4 слоев стеклоткани марки Т-25(ВМП)-78, изготовленный методом вакуумной инфузии	1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5; 1.5; 1.6		
ПКМ на основе 3 слоев углеродной ткани марки ВТкУ-2.200 и 4 слоев стеклоткани марки Т-25(ВМП)-78, изготовленный методом пропитки под давлением	2.1; 2.2; 2.3; 2.4; 2.5; 2.5; 2.6		

В случае сканирования Subpix эти параметры выше, так как был использован алюминиевый фильтр, который отсекает низкоэнергетическую часть спектра рентгеновского излучения, что

позволяет снизить шум, уровень которого выше для сканирования Subpix, чем для цилиндрического сканирования.

Размер фокусного пятна в совокупности с коэффициентом геометрического увеличения определяют размер вокселя томограммы, а также нерезкость изображения. Усиления сигнала детектора и время накопления кадра выбраны таким образом, чтобы обеспечить уровень сигнала в диапазоне 20—80 % с минимальным уровнем шумов.

#### 2.3. Реконструкция томографического изображения

Рентгеновский компьютерный томограф представляет собой сложную систему, состоящую, в том числе, из механических подвижных узлов. Несмотря на то, что перемещения осуществляются с достаточно высокой точностью, все же существуют отклонения, которые, даже в допустимых пределах, могут привести к недопустимым неточностям при реконструкции [18, 19].

Для первичной (грубой) оценки фактического положения оси вращения (оси реконструкции) применяют специальный комплект образцов. Каждый образец представляет собой цилиндр из полимерного материала с отверстиями, в который запрессованы сферы. Расстояния между сферами в калибровочных образцах в зависимости от их типоразмеров составляют 0,762; 5,00; 15,00 мм соответственно. Для образца выбранного, в зависимости от геометрии сканирования, необходимо получить 60 проекционных снимков при вращении на 360° с шагом 10° соответственно. Далее по положению сфер на всех проекциях можно с точностью до нескольких пикселей вычислить положение оси вращения при сканировании (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид (а) и томограмма (б) калибровочного образца.

В процессе реконструкции томографических изображений (посредством ПО — ReferenceX) происходит точное определение положения оси вращения (оси реконструкции) (рис. 4).

В ПО для реконструкции предусмотрена возможность программной корректировки артефакта, связанного с изменением энергетического состава спектра излучения при прохождении излучения через вещество. Источником излучения является рентгеновская трубка, на выходе которой рентгеновское излучение имеет достаточно широкий энергетический спектр. Ослабление излучения при взаимодействии его с материалом ИО происходит неодинаково для составляющих спектра [20]. В первую очередь ослабляются фотоны с низкой энергией. Таким образом, при прохождении излучения через ИО его спектр по своему составу становится более однородным с преобладанием фотонов высокой энергии, которые ослабляются материалом ИО в меньшей степени, следовательно, интенсивность на детекторе увеличивается. В результате в регистрируемых точках значения коэффициентов ослабления сильно отличаются от действительных. Существуют различные мето-



Рис. 4. Реконструированный слой ИО при разном значении опорной координаты *x*: *a* — оптимальное значение *x*; *б* — неоптимальное значение *x*; *в*, *г* — реконструированный слой ОК при разном коэффициенте жесткости рентгеновского излучения (*в* — 0,25; *г* — 3,75).

ды коррекции этого явления. Одним из таких является фильтрация излучаемого спектра фильтров, размещенных у окна рентгеновской трубки.

Фильтр представляет собой алюминиевую пластину, толщина которой зависит от того, насколько необходимо уменьшить ширину излучаемого спектра. Фильтрующая пластина поглощает часть зондирующего излучения, уменьшая ширину спектра. Однако с уменьшением интенсивности пучка, уменьшается и отношение сигнал—шум. Главный же недостаток метода состоит в том, что если фильтр недостаточно толстый, то эффект увеличение жесткости излучения все равно наблюдается на реконструированных изображениях [21]. В ПО томографа предусмотрен другой способ корректировки этих артефактов, который заключается в математической коррекции гистограммы. Коррекция задается соответствующим коэффициентом. Экспериментально установлено, что негативные эффекты, вызванные неравномерностью спектрального состава пучка рентгеновского излучения, минимальны при значении коэффициента коррекции 0,25. На рис. 4*в* показаны сечения образца при правильном коэффициенте коррекции и при заведомо неверном 3,75 (рис. 4*г*).

После проведения всех коррекций были реконструированы трехмерные изображения исследуемых образцов. Для каждого из двенадцати исследуемых образцов были получены две томограммы при субпиксельном с размером вокселя 15 мкм и одиночном цилиндрическом сканировании с размером вокселя 31 мкм.

#### Оценка объемной доли пор

Для оценки объемной доли пор в исследуемых образцах использовали специализированное ПО VG Studio Max 3.4.

VG Studio Max 3.4. позволяет проводить анализ полученного трехмерного изображения:

определение поверхности образца (Advanced Surface Determination);

статистический анализ уровней серого (Gray value analysis);

модуль поиска пор/включений (Porosity/Inclusion Analysis).

Анализ проводился с помощью порогового метода, где для назначения вокселя к группе «пора» используется информация только об уровне серого, выше которого все воксели относятся к категории «материал». Пороговое значение получали путем вычитания из среднего значения уровня серого S<sub>0</sub> (Mean gray value), соответствующего материалу величину 5 $\sigma$ , где  $\sigma$  — стандартное отклонение (standard deviation of gray value). Таким образом, алгоритм поиска отмечает все воксели с уровнем серого ниже значения S<sub>0</sub> — 5 $\sigma$  как дефект. Для получения значений среднего уровня серого и стандартного отклонения образцов выбирался фрагмент без дефектов и подвергался статистическому анализу с помощью модуля Gray value analysis. На рис. 5 показан фрагмент образца № 1 и результаты расчета уровней серого (рис. 6).



Рис. 5. Фрагмент одного из образцов из общего массива исследуемых для статистического анализа.



Рис. 6. Результаты статистического анализа этого образца.

Таким образом, были рассчитаны пороговые значения для томограмм всех образцов. Данные представлены в табл. 2.

На основании анализа проведенных испытаний установлено, что морфология дефектов образцов ПКМ, имеющих различный состав (наполнитель—связующее) одинакова. Это означает, что для углепластиков возможно применение как субпиксельного, так и одиночного цилиндрического сканирования. Субпиксельное (Subpix) сканирование повышает разрешающую способность изображений, но имеет низкую производительность (длительность проведения сканирования образцов в режиме Subpix и последующая их реконструкция составляет восемь часов против трех часов для одиночного цилиндрического сканирования).

Визуализация распределения пор в том же образце показана на рис. 7.

Результаты работы получены с использованием ЦКП «Климатические испытания» ФГУП «ВИАМ».

#### Таблица 2

#### Значения объемной доли пор для массива исследуемых образцов с номерами 1.1 — 2.6

Тип, номер образца         ОДП, % при разных типах сканирования           Одиночное цилиндрическое         Subpix		Отличие между одиночным цилиндрическим				
		Subpix	сканированием и Subpix, %			
	Серия образцов № 1					
1.1	0,29	0,19	0,10			
1.2	2,02	1,90	0,12			
1.3	1,87	1,68	0,19			
1.4	0,62	0,61	0,01			
1.5	0,31	0,25	0,06			
1.6	1,43	1,30	0,13			
Серия образцов № 2						
2.1	0,19	0,24	-0,05			
2.2	0,18	0,26	-0,08			
2.3	0,04	0,14	-0,1			
2.4	0,06	0,25	-0,19			
2.5	0,14	0,17	-0,03			
2.6	0,11	0,25	-0,14			



Рис. 7. Визуализация распределения пор в образце.

# 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведено сканирование двенадцати образцов из ПКМ, изготовленного двумя способами. Сканирование проведено в режиме Subpix и в режиме одиночного цилиндрического сканирования.

2. Показано, что субпиксельное сканирование ИО на томографе повышает разрешающую способность томографического изображения, но продолжительность реконструкции значительно увеличивается до восьми часов. При одиночном цилиндрическом сканировании продолжительность реконструкции составляет три часа, разрешающая способность ниже в два раза. 3. Реконструкция томографических изображений образцов проведена в соответствии с возможностями ПО томографа:

дана оценка правильности установки геометрических координат механических узлов сканера с использованием калибровочного образца;

проведена компенсация коэффициента жесткости излучения.

4. Получены трехмерные изображения образцов из ПКМ при субпиксельном и одиночном цилиндрическом режимах сканирования.

5. Анализ трехмерных изображений показал, что морфология дефектов образцов ПКМ, имеющих различный состав (наполнитель—связующее), одинакова.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуняева А.Г., Курносов А.О., Гуляев И.Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2021. №1. Ст.05. URL: http://www. viam-works.ru (дата обращения 30.03.21). DOI: 7-6046-2021-0-1-43-53

2. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3—16.

3. Каблов Е.Н., Бабашов В.Г., Балинова Ю.А., Максимов В.Г. Фазовые превращения в композиционном материале с органической матрицей, наполненной волокнами диоксида циркония // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 1. С. 62—68.

4. Каблов Е.Н., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н., Аткин О.Н. Термическая обработка композиционных материалов системы Nb-Si // Конструкции из композиционных материалов, 2020. № 3 (159). С. 14—19.

5. Иванов Д.А., Ситников А.И., Шляпин С.Д. Композиционные материалы / уч. пособие для вузов. Под ред. А.А. Ильина. М.: Юрайт, 2019. С. 13—24.

6. Душин М.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Установление причин образования пористости при изготовлении ПКМ // Труды ВИАМ. 2016. № 6(42). С. 8.

7. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Раскутин А.Е., Дун В.А. Углепластик на основе объемно-армирующей триаксиальной плетеной преформы // Труды ВИАМ. 2019. № 1. С. 7.

8. Гуняева А.Г., Сидорина А.Й., Курносов А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм porcher ind. и toho tenax// Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. № 3. Ст. 03. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения 30.03.21).DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26

9. Dilonardo Elena, Nacucchi Michele, De Pascalis Fabio, Zarrelli Mauro. High resolution X-ray computed tomography: A versatile non-destructive tool to characterize CFRP- based aircraft composite elements // Composites Science and Technology. 2020. V. 192. P. 108093. https// doi.org/10.1016/j. compscitech. 2020. 108093

10. Карташова Е.Д., Муйземнек А.Ю. Технологические дефекты в полимерных слоистых композиционных материалах // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 2 (42). С. 79—89.

11. Kato M., Takahashi M. Evaluation of porosity and its variation in porous materials using microfocus x-ray computed tomography considering the partial volume effect // Materials Transactions. 2013.  $N_{\odot}$  9. P. 1678—1685.

12. Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С. Повышение чувствительности и разрешающей способности ультразвукового неразрушающего контроля монолитных образцов из ПКМ с использованием фазированных решеток // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3. С. 83—88. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-83-88

13. Демидов А.А., Крупнина О.А., Михайлова Н.А., Косарина Е.И. Исследование образцов из полимерных композиционных материалов методом рентгеновской компьютерной томографии и обработка томограмм с изображением объемной доли пористости // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2021. № 5. С. 105-113. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-105-113

14. Косарина Е.И., Михайлова Н.А., Демидов А.А, Смирнов А.В. Теоретические аспекты при создании электронных эталонных рентгеновских снимков, содержащих количественную информацию // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4. С. 87—94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-87-94

15. *Kalender W.A.* Computed tomography: fundamentals, system technology, image, quality, applications / 2 ed. W.A. Kalender. Erlagen: Publicis Corporate Publishing, 2005. 304 p.

16. Блажевич С.В., Селютина Е.С. Синтез матрицы двумерного изображения со сверхразрешением // Белгородский государственный университет. Научные ведомости. Серия: Математика. Физика. 2012. № 23 (142). Вып. 29. С. 431.

17. Kim M.K. Principles and techniqus of digital holographic microscopy // SPIL Reviews. 2010. V. I. P. 018005-1—018005-50.

18. Артюшкин А.Б., Матасов Ю.Ф., Пантенков А.П. Влияние погрешности взаимного расположения фотоматриц в устройствах, реализующих метод субпиксельного сканирования, на качество синтезируемых изображений // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 1. С. 109—122.

19. Симонов Е.Н., Кузнецов К.Н. Реконструкция объемных изображений рентгеновской компьютерной томографии с применением голографических методов // Вестник ЮУрГУ (серия: компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника). 2013. Т. 13. № 3. С. 77—81.

20. *Чуличков А.И., Пытьев Ю.П., Фаломкина О.В., Зубюк А.В.* Методы морфологического анализа данных и их приложения // Ученые записки физического факультета московского университета (УЗЗФФ). 2017. № 4. 7 с. (1740706).

21. Гонсалес Р., Вудс Р. Обработка изображений / Цифровая обработка изображений. 3-е изд., испр. и доп. М.: Техносфера, 2012. С. 860—865.

\_\_\_\_\_

# ТРЕХМЕРНАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ОГРАНИЧЕННЫХ РАЗМЕРАХ РЕГИСТРИРУЮЩЕГО ЭКРАНА

# © 2021 г. В.П. Карих<sup>1,\*</sup>, Б.В. Певченко<sup>1,\*\*</sup>, А.В. Курбатов<sup>1,\*\*</sup>, А.А. Охотников<sup>1,\*\*\*</sup>, А.А. Скоков<sup>1,\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Федеральный научно-производственный центр «Алтай», Россия 659322 Бийск, ул. Социалистическая, 1 E-mail: \*kar@frpc.secna.ru; \*\*post@@frpc.secna.ru; \*\*\*ohotnikovsan@mail.ru; \*\*\*\*skeydee@yandexd.ru

Поступила в редакцию 29.04.2021; после доработки 14.07.2021 Принята к публикации 29.07.2021

Исследованы возможности применения 3D-томографа с ограниченным в размерах регистрирующим экраном для выявления произвольно ориентированных трещиноподобных дефектов в крупногабаритных промышленных объектах. Рассмотрены круговая и спиральная схемы сканирования, показана принципиальная возможность обнаружения дефектов в случае двухзаходного спирального сканирования и регистрирующего экрана, перекрывающего половину поля зрения поперечного сечения объекта контроля. Продемонстрирована работоспособность алгоритма 3D-реконструкции для выбранного способа сканирования.

*Ключевые слова*: неразрушающий контроль, 3D-томография, трещиноподобные дефекты, крупногабаритный объект, экран ограниченных размеров.

**DOI:** 10.31857/S0130308221090062

#### введение

Рентгеновская компьютерная томография значительно превосходит по информативности традиционные рентгеновские методы, такие как радиография и интроскопия. Современные промышленные объекты становятся все более сложными, возрастают требования к их надежности и долговечности, поэтому и возникает необходимость в более тщательном неразрушающем контроле.

Основные требования, предъявляемые к средствам и методам контроля, заключаются в обеспечении надежного обнаружения дефектов в виде раковин, трещин, расслоений, пористости, вариаций плотности. Посредством томографии можно выявлять эти дефекты с высокой чувствительностью. Кроме того, томография позволяет получить трехмерный образ контролируемого объекта, что дает возможность обнаруживать ошибки сборки, определять практически любые размеры внутри изделия, находить отклонения от чертежей.

В радиационной дефектоскопии всегда считалось проблематичным обнаружение таких «тонких» дефектов, как трещина или отслоение. Для их выявления требуется подходящая схема просвечивания, а именно, излучение должно распространяться вдоль плоскости трещины. Если ориентацию искомого отслоения можно предвидеть, зная конструкцию изделия, то ориентация трещины зачастую непредсказуема. Поэтому в традиционных методах применяют просвечивание в нескольких ракурсах. Такая процедура увеличивает вероятность обнаружения трещин, но при этом и вероятность ее пропуска остается значительной.

В трехмерной рентгеновской компьютерной томографии с конусным пучком излучения задача выявления произвольно ориентированных трещин решается более успешно благодаря тому, что в процессе сканирования просвечивание проводится по очень большому количеству ракурсов.

В данной работе рассматриваются задачи конусной томографии протяженных объектов, таких как, например, балластные трубы, изделия ракетно-космической и авиационной техники, двигатели внутреннего сгорания и др., которые не могут поместиться целиком в поле зрения плоского детектора. Работа посвящена исследованию применения известных методов сканирования и алгоритмов, не рассматриваются другие не менее важные проблемы для конусной томографии с экраном ограниченных размеров, такие как подавление влияния рассеянного излучения, «сшивка» радиационных изображений и др.

# СКАНИРОВАНИЕ И АЛГОРИТМЫ

В рентгеновской конусной томографии источник и детектирующий экран обычно жестко связаны между собой и перемещаются относительно объекта, причем двигаться могут либо источник с детектором, либо объект, либо совместно. Для удобства рассуждений обычно полагают, что объект неподвижен, а источник и экран перемещаются по определенной траектории. Теоретически для точной реконструкции должно выполняться условие полноты Кириллова—Туя [1, 2], согласно которому всякая плоскость, пересекающая объект, должна пересекать траекторию источника излучения.

Благодаря этому требованию к системе сканирования возможна реконструкция без артефактов. Кроме того, для каждого плоского элемента трещины всегда найдется такой ракурс, когда излучение будет распространяться вдоль него, и, следовательно, он будет зарегистрирован на экране с максимальным значением сигнала. Под элементом трещины подразумевается достаточно малая часть ее, которую можно считать плоской. Таким образом, корректное сканирование в конусной томографии является максимально эффективным для регистрации произвольно ориентированных трещин еще на этапе получения данных просвечивания, т.е. до процедуры трехмерной реконструкции. Разумеется, сигнал от трещины может быть ненаблюдаем в том случае, когда ее раскрытие ниже предела чувствительности регистрирующей аппаратуры.

Зачастую 3D-реконструкция предполагает вычисление обратных проекций путем фильтрации исходных данных с последующим их суммированием. Если сигнал от трещины зарегистрирован на нескольких конусных проекциях, то в результате суммирования сигнал накапливается интенсивнее, чем шум, и вероятность обнаружения трещины увеличивается.

В технических приложениях конусная томография реализуется с помощью прецизионного сканера, источника рентгеновского излучения и регистрирующего экрана, например, панельного детектора. Траекторию источника, удовлетворяющую условию полноты, выполнить достаточно просто, например, сканированием по спирали. Трехмерная томография небольших объектов, для которых любое рентгеновское изображение умещается на детектирующем экране, представлена в литературе достаточно обширно [3—6].

Томография крупногабаритных объектов освещена в литературе значительно меньше. В работе [7] представлены результаты использования компьютерного томографа на основе линейного ускорителя электронов фирмы LINAC, имеющего энергию рентгеновского излучения 4,6—9 МэВ и позволяющего контролировать объекты толщиной до 200 мм по стали. В [8] описан инспекционно-досмотровый комплекс на основе бетатрона с энергией излучения 4—9 МэВ и мощностью дозы на расстоянии 1 м до 13 Р/мин.

В промышленных томографах наиболее популярны схемы сканирования по круговой и спиральной траекториям (рис. 1). Если экран недостаточно велик для охвата поперечного сечения объекта, то этого можно добиться путем многозаходного сканирования по одной и той же траектории, перемещая всякий раз детектор таким образом, чтобы в итоге было перекрыто все сечение (рис. 2).



Рис. 1. Схемы сканирования с неполным охватом объекта вдоль оси вращения: *а* — спиральная траектория; *б* — круговая.



Рис. 2. Полная проекция, получаемая многозаходным сканированием с перемещением панельного детектора (1, 2, ..., *n* — расположения детектора в различных циклах сканирования по одной и той же траектории).

При спиральном сканировании можно проконтролировать весь объект в непрерывном режиме. В случае круговой траектории за один цикл перемещения по окружности контролируется часть объекта. Смещая после каждого кругового цикла траекторию вдоль оси вращения, можно проконтролировать весь объект. Рассмотрим подробнее вариант спирального сканирования с экраном, ограниченным в направлении оси спирали, но перекрывающим поперечное сечение объекта. Согласно строгой теории, в данном случае можно получить точную 3D-реконструкцию объекта [9]. Следует отметить, что при этом для выявления элементов трещин произвольной ориентации накладываются определенные условия на диаметр и шаг спирали в зависимости от ширины экрана. При соблюдении данных условий для любого элемента трещины найдется такое положение источника, когда излучение будет распространяться вдоль него и будет зарегистрировано на экране.

Известно частное решение, которое позволяет зарегистрировать произвольно ориентированный элемент трещины при сканировании по спиральной траектории при ограниченном в поперечном направлении конусном пучке [10]. В работе показано, что для любой точки плоскости объекта, перпендикулярной оси спирали, для регистрации произвольно ориентированного элемента трещины достаточно данных от одного витка спирали, расположенного симметрично относительно выбранной плоскости. При этом радиус спирали должен превышать радиус цилиндра в  $\sqrt{2}$ . Условие выявляемости выполняется и для другой плоскости, расположенной на малом расстоянии и параллельно рассмотренной. Для ее реконструкции достаточно данных почти от того же витка, укороченного с одной стороны и добавленного с другой. Трехмерная реконструкция производится в последовательности плоскость за плоскостью, при этом исходные данные выбираются из витка спирали, который располагается так, чтобы реконструируемая плоскость делила его пополам.

Высота экрана *a* и ширина *b* определяются из следующего условия: реконструируемый круг из каждого положения источника на витке спирали должен целиком проецироваться на экран (подобнее см. в [10]).

Сканирование по круговой траектории не дает такой возможности выявления произвольного элемента трещины, как при спиральном сканировании. Можно подсчитать, какая часть элементов трещин при круговом сканировании не выявляется. Полагаем, что объект вписывается в цилиндр с радиусом *r* и длиной *l*. На рис. 3 иллюстрируется объем объекта, который контролируется при выполнении одного цикла сканирования по окружности.

Поместим произвольный элемент трещины в какую-либо точку рассматриваемого объема и определим, выявляется ли он в результате кругового сканирования. Полагаем, что элемент трещины определяется координатами x, y, z расположения его центра и единичным вектором **n**, перпендикулярным его плоскости. Определим функцию  $P(x, y, z, \mathbf{n})$  следующим образом: она равна



Рис. 3. Область томографирования при одном цикле кругового сканирования — цилиндр длиной l = b(R - r)/(R + d), где b — размер панельного экрана в направлении оси вращения, R — расстояние от оси вращения до источника излучения, r — диаметр цилиндра, в который вписывается объект, d — расстояние от оси вращения до панельного экрана.

единице, если плоскость, проходящая через точку *x*, *y*, *z* и перпендикулярная вектору **n**, пересекает траекторию источника (окружность) и равна нулю в противном случае. Следовательно, если  $P(x, y, z, \mathbf{n}) = 1$ , то элемент трещины, перпендикулярный вектору **n** и расположенный в точке *x*, *y*, *z*, выявляется при сканировании по траектории и не выявляется, если  $P(x, y, z, \mathbf{n}) = 0$ . Для того чтобы определить долю выявляемых элементов трещин в заданной точке объекта, надо выполнить усреднение функции  $P(x, y, z, \mathbf{n})$  по всем направлениям **n**:

$$\overline{P}(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{S/2} P(x, y, z, \mathbf{n}) dS.$$

Здесь интегрирование производится по половине единичной сферы (S/2). На рис. 4 представлена зависимость функции  $\overline{P}$  от удаления от плоскости орбиты источника.



Рис. 4. Вероятность выявления произвольно ориентированного элемента трещины в зависимости от расстояния z от плоскости круговой траектории источника.

Согласно приведенным данным, при круговом сканировании возможен с достаточно большой вероятностью (до 10 %) пропуск элемента трещины из-за того, что направление излучения не попадает в плоскость этого элемента, чего не происходит при спиральном сканировании.

Для 3D-реконструкции в конусной томографии наиболее популярны алгоритмы Фельдкампа и обратного проецирования с фильтрацией двойным дифференцированием (ОПФДД). Результаты их применения для спиральной и круговой траекторий с ограниченным экраном достаточно подробно рассмотрены в работе [11].

Отличие результатов реконструкции алгоритмом Фельдкампа для круговой и спиральной траекторий показаны на рис. 5. Здесь приведены изображения срезов для трех плоскостей объекта, изображенного на рис. 6. В случае круговой траектории наблюдаются значительные артефакты в областях, отстоящих на большом расстоянии от центральной плоскости пучка (плоскость z = 0), что согласуется с неполнотой данных (см. рис. 4).



Рис. 5. Сечения в плоскостях *x* = 0, *y* = 0 и *z* = 0, полученные в результате реконструкции алгоритмом Фельдкампа для круговой (вверху) и спиральной (внизу) траекторий; стрелками помечены наиболее заметные артефакты.



Рис. 6. Реконструируемый объект и координатные оси.

#### ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрим особенности 3D-томографического контроля различных промышленных объектов. Если габариты объекта не велики, то его контроль может быть осуществлен посредством спирального сканирования с вертикальным расположением оси вращения. Если же объект является протяженным (несколько метров), то его зачастую удобнее располагать горизонтально. В этом случае в поле регистрируемого излучения могут попадать элементы сканера, на котором вращается контролируемое изделие (рис. 7).



Рис. 7. Влияние элементов сканера на исходные данные на горизонтальном сканере.

Для устранения влияния конструктивных элементов сканера можно применить схему сканирования с половинным полем облучения, когда экран регистрирует излучение, проходящее лишь выше оси вращения.

В двумерном случае схема сканирования с половинным полем облучения удовлетворяет условию полноты. В трехмерном случае аналогичное утверждение неочевидно. Проверку полноты данных можно выполнить путем компьютерного моделирования. Для этого потребуется рассмотреть всевозможные элементы трещин, которые могут находиться в объекте контроля и проверить, какая часть из них будет зарегистрирована верхней половиной экрана, изображенного на рис. 7.

Одно из преимуществ спиральной траектории, среди прочих, заключается в том, что для доказательства условия выявляемости произвольно ориентированного элемента трещины не нужно анализировать весь объем объекта, а достаточно рассмотреть лишь одну плоскость, перпендикулярную оси спирали. Остальные плоскости, параллельные рассматриваемой, геометрически равноправны относительно спирали.

Моделирование показало, что спиральная схема сканирования с половинным экраном не удовлетворяет условию полноты. Результат моделирования представлен на рис. 8*a*. Расчеты отображается в виде таблицы чисел, соответствующих долям регистрируемых элементов трещин в процентах. Расчеты выполнены для ряда точек сечения цилиндра единичного радиуса. В рассматриваемом примере радиус спиральной траектории R = 3, шаг спирали h = 1, высота экрана равна половине требуемой величины (0,5 *a*).

Согласно расчетам, доля регистрируемых элементов трещин достаточно велика. Назовем эту долю показателем условия полноты.

Повысить показатель условия полноты можно различными способами, например, увеличением высоты экрана. Возьмем экран, который перекрывает не половину сечения изделия, а более, но настолько, что при этом на экран не попадают изображения элементов сканера (рис. 9).

Результаты моделирования показателя условия полноты для экрана высотой 0,75 *a* (более половины) представлены на рис. 86.



Рис. 8. Результат расчета условия полноты:

*а* — для половинного экрана и спиральной схемы сканирования; *б* — для экрана высотой 0,75*a* и спиральной схемы сканирования; *в* — для половинного экрана и двухзаходной спиральной схемы сканирования.

Здесь мы видим более высокие показатели условия полноты данных.

Еще один из вариантов повышения выявляемости элементов трещин заключается в применении сканирования многозаходной спиралью. Расчеты показывают, что для двухзаходной спирали и половины экрана получается 100 % выявления трещин (рис. 8*в*), что свидетельствует о высокой эффективности данного метода при использовании половинного экрана.

Обратимся теперь к задаче 3D-реконструкции по тем данным, в которых регистрируются элементы трещин произвольной ориентации. В рассматриваемом случае с половинным охватом поперечного сечения объекта двумерным детектором алгоритм Фельдкампа напрямую неприменим, поскольку часть веерной проекции отсутствует. В данном случае целесообразно использовать локальный алгоритм ОПФДД. Он достаточно эффективен для решения задач неразрушающего контроля – выявления дефектов в виде раковин, трещин, а также контроля размеров деталей и их расположения.



Рис. 9. Экран, перекрывающий более половины сечения изделия.

На рис. 10 изображены сечения объекта в трех плоскостях, реконструированные методом ОПФДД для круговой (вверху) и спиральной (внизу) траекторий с экраном, полностью перекрывающим поперечное сечение объекта в плоскости, перпендикулярной оси траектории источника. Они мало отличаются от изображений, которые получены с помощью алгоритма Фельдкампа (см. рис. 5). Основное отличие заключается в уменьшенном динамическом диапазоне плотности и более подчеркнутом изображении границ деталей. В томограммах, полученных при спиральном сканировании (см. нижний ряд на рис. 10), отсутствуют видимые артефакты.



Рис. 10. Сечения в плоскостях *x* = 0, *y* = 0 и *z* = 0, полученные в результате реконструкции алгоритмом ОПФДД для круговой (вверху) и спиральной (внизу) траекторий; стрелками помечены наиболее заметные артефакты.



Рис. 11. Сечения в плоскостях *x* = 0, *y* = 0 и *z* = 0, полученные в результате реконструкции алгоритмом ОПФДД для спиральной траектории при регистрации данных половиной экрана (*a*), для спиральной траектории при регистрации данных экрана высотой 75 % от полного размера (*б*) и для двухзаходной спиральной траектории при регистрации данных половиной экрана (*в*); стрелками помечены наиболее заметные артефакты,

В дальнейшем варианты с круговой траекторией для экрана, частично перекрывающего сечение объекта, не рассматриваются.

На рис. 11*а* представлены томограммы, полученные при использовании экрана, перекрывающего половину сечения объекта. При спиральном сканировании половиной экрана наблюдаются артефакты, которые маскируют часть границ.

На рис. 116 демонстрируются томограммы, полученные при использовании экрана, перекрывающего 75 % поперечного сечения объекта. Здесь не наблюдается заметного отличия от использования половинного экрана при таком же спиральном сканировании.

Значительно лучший результат с половинным экраном получен при сканировании по двухзаходной спирали, что подтверждается еще и полнотой данных для обнаружения элементов трещин (рис. 11*в*). На изображениях практически отсутствуют артефакты, характерные для предыдущих вариантов с неполным экраном.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рентгеновская 3D-томография обладает возможностью эффективно выявлять трещиноподобные дефекты произвольной пространственной ориентации еще на этапе получения исходных радиометрических данных.

Для контроля протяженных объектов предложена двухзаходная схема спирального сканирования с ограниченным экраном и алгоритм реконструкции, которые позволяют также эффективно выявлять дефекты в виде трещин и расслоений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов А.А. Об одной задаче И.М. Гельфанда // ДАН СССР. 1961. Т. 137. № 2. С. 276—277.

2. *Tuy H.K.* An inversion formula for cone-beam reconstruction // Siam J. Appl. Math. 1983. V. 43. № 3. P. 546–552.

3. *Lichun J., Mian C.* 3D imaging of fractures in carbonate rocks using X-ray computed tomography technology // Carbonates and Evaporites. 2014. V. 29. Is. 2. P. 147—153.

4. *Re F., Scavia C.* Determination of contact areas in rock joints by X-ray computer tomography // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1999. V. 36. Is. 7.

5. Asskar J.C., Saman S.K. Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. V. 9. Is. 5.

6. Diaz M., Yeom Kim K., Yeom S., Zhuang L., Min K., Krauß F., Giese R., Alexandrakis C., Buske S. Surface roughness characterization of open and closed rock joints in deep cores using x-ray computed tomography // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2017. V. 98. P. 10—19.
 7. Reims N., Schoen T., Boehnel M., Sukowski F., Firsching M. Strategies for efficient scanning and

7. *Reims N., Schoen T., Boehnel M., Sukowski F., Firsching M.* Strategies for efficient scanning and reconstruction methods on very large objects with high-energy x-ray computed tomography // SPIE Optical Engineering + Applications. International Society for Optics and Photonics. 2014. P. 921209.

8. Бориков В.Н., Чахлов С.В., Рычков М.М., Штейн А.М., Смолянский В.А. Промышленная томография крупногабаритных объектов // XXI Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: сборник трудов. Москва, 28 февраля — 2 марта 2017 г. М.: Издательский дом «Спектр», 2017. С. 358—361.

9. *Katsevich A*. An improved exact filtered backprojection algorithmfor spiral computed tomography // Advances in Applied Mathematics. October 2004. V. 32. No. 4. P. 681—697.

10. *Карих В.П.* Способ рентгеновской компьютерной томографии с конусным пучком для неразрушающего контроля // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. 2001. № 5. С. 67—70.

11. Скоков А.А., Карих В.П. Повышение выявляемости трещин при дефектоскопии методом трехмерной томографии // Дефектоскопия. 2013. № 2. С. 78—89. УДК 620.179.14

# ИМПУЛЬСНЫЙ МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

# © 2021 г. В. А. Сясько<sup>1,\*</sup>, А. Ю. Васильев<sup>2,\*\*</sup>

<sup>1</sup>ООО «Константа», Россия 198095 С.-Петербург, Огородный переулок, 21 <sup>2</sup>ФГУП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Россия 190005 С.-Петербург, Московский пр-т, 16 E-mail: \*9334343(@gmail.com; \*\*vasilev.av(@bk.ru

#### Поступила в редакцию 14.07.2021; после доработки 28.07.2021 Принята к публикации 10.08.2021

Приведены результаты исследования характеристик измерительных преобразователей магнитоиндукционных толщиномеров, использующих гармонические токи возбуждения, для случая контроля электропроводящих покрытий, на основании которых предложен и подробно описан алгоритм преобразования, предполагающий импульсное возбуждение магнитного поля и использование в качестве первичного информативного параметра площади наведенной ЭДС при подавлении влияния сетевых наводок и импульсных помех, используемый в серийных толщиномерах металлических неферромагнитных покрытий на ферромагнитных основаниях

Ключевые слова: магнитный толщиномер, металлическое покрытие, измерение толщины.

**DOI:** 10.31857/S0130308221090074

В современном промышленном производстве стальных изделий все большее применение находят функциональные металлические неферромагнитные покрытия, наносимые методами газотермического напыления, погружения, гальванизации, плакирования или диффузии. Покрытия могут предназначаться для повышения сопротивления поверхности изделия износу (хром), для коррозионной защиты (цинк, кадмий, свинец, олово, нержавеющая сталь и пр.), для декоративной отделки поверхности (хром, золото, серебро), повышения коэффициента отражения (серебро, хром, кадмий) и электропроводности, а также защиты отдельных участков поверхности стальных изделий от радиационного и теплового воздействия.

Одним из основных параметров покрытия является его толщина h. Существуют несколько методов, позволяющих контролировать толщину покрытия, одним из основных является магнитный, основанный на изменении коэффициента взаимоиндукции M(h) между первичной  $W_1$  и вторичной  $W_2$ , катушками измерительного преобразователя в зависимости от толщины покрытия h (рис. 1).



Рис. 1. Структура абсолютного трансформаторного магнитоиндукционного преобразователя с ферромагнитными сердечником и экраном.

Большинство производителей указывают, что магнитные толщиномеры, использующие гармонические низкочастотные ( $f \sim 70$ —400 Гц) магнитные поля, предназначены для измерения толщины диэлектрических и электропроводящих неферромагнитных покрытий на ферромагнитных электропроводящих основаниях, однако в случае измерения электропроводящих покрытий возникает ряд проблем [1]. В классическом варианте, когда первичная катушка W<sub>1</sub> питается гармоническим током  $i(t) = I_0 \sin(2\pi ft)$ , на вторичной (измерительной) катушке  $W_2$  наводится ЭДС, величина которой обратно пропорциональна *h*:

$$e(t,h) = -M(h)\frac{di(t)}{dt}.$$
(1)

Можно записать, что  $M(h) = M_{12} + M_{\rm BH}(h)$ , где  $M_{12}$  — коэффициент взаимоиндукции катушек в режиме холостого хода ( $h = \infty$ ),  $M_{\rm BH}(h)$  — вносимый коэффициент взаимоиндукции. В качестве первичного информативного параметра используется амплитуда ЭДС e(t, h).

Традиционно градуировка магнитоиндукционных толщиномеров у производителя, а также двухточечная калибровка пользователем перед проведением измерений, проводятся с использованием диэлектрических мер толщины, в то время как у контролируемых металлических покрытий электропроводимость  $\sigma_n$  может варьироваться в диапазоне от 7 до 63 МСм/м в зависимости от материала. Электропроводность покрытия, основания и элементов конструкции преобразователя обусловливает возникновение в них вихревых токов, глубина проникновения которых в покрытии изменяется от 10,5 до 3,5 мм в указанном диапазоне  $\sigma_n$ . Вихревые токи, в свою очередь, наводят на катушке  $W_2$  ЭДС:

$$e_{\rm _{R}}(t,h) = e_{\rm _{RII}}(t,h) + e_{\rm _{RII}}(t,h) + e_{\rm _{RII}}(t,h), \tag{2}$$

где  $e_{_{BR}}(t, h)$  — ЭДС, обусловленная вихревыми токами в покрытии;  $e_{_{BO}}(t, h)$  — ЭДС, обусловленная вихревыми токами в основании;  $e_{_{BK}}(t, h)$  — ЭДС, обусловленная вихревыми токами в конструкции преобразователя.

ЭДС  $e_{\rm B}(t, h)$  необходимо рассматривать как мешающий параметр, вызывающий дополнительную погрешность измерений [2]. Однако влиянием ЭДС  $e_{\rm BK}(t, h)$  можно пренебречь по причине ее практического постоянства при градуировке, калибровке и измерениях. В то же время,  $e_{\rm BO}(t, h)$  и  $e_{\rm BI}(t, h)$  будут зависеть от электропроводностей  $\sigma_{\rm n}$  покрытия и  $\sigma_{\rm och}$  основания, относительной магнитной проницаемости основания  $\mu_{\rm och}$ , h и геометрических характеристик объекта контроля.

С целью оценки влияния  $e_{\rm B}(t, h)$  на погрешность оценки h для типового магнитоиндукционного преобразователя (рис. 2) была разработана его расчетная модель применительно к объекту контроля, представляющему собой основание из стали 10 (полупространство) с покрытием из электро-проводящего неферромагнитного металла толщиной h до 3 мм и  $\sigma_{\rm n}$  от 7 до 60 МСм/м.



Рис. 2. Типовой абсолютный трансформаторный магнитоиндукционный преобразователь с диапазоном измеряемых толщин покрытий до 3 мм.

Модель является двумерной, осесимметричной, стационарной, в общем случае, нелинейной с открытыми границами первого рода, удовлетворяющая условиям Дирихле [3, 4]. Путем вращения вокруг оси Z (оси сердечника) получена трехмерная модель, для которой задавались величины изменяемых (мешающих) параметров h и  $\sigma_n$  и в результате расчетов получены зависимости  $e_{o\kappa}(t, h, \sigma_n) = e_{\kappa n}(t, h, \sigma_n) + e_{\kappa 0}(t, h, \sigma_n)$  и  $e_{\kappa}(t, h, \sigma_n)$ . Также была рассчитана зависимость e(t, h) для гипотетического случая, когда сердечник и экран изготовлены из диэлектрического ферромагнитного материала с начальной магнитной проницаемостью, аналогичной стали 10, а покрытие диэлектрическое неферромагнитное (аналог используемых мер толщины). Результаты расчетов сигналов магнитоиндукционного преобразователя для f = 300 Гц и h = 300 мкм показаны на рис. 3. На рис. 4 представлены результаты расчета абсолютной погрешности измерения толщины покрытия в зависимости от  $\sigma_n$  диапазоне толщин h = 0—3 мм, анализ которых показывает, что при использовании гармонического тока возбуждения и величины амплитуды сигнала на катушке W<sub>2</sub> в качестве первичного информативного параметра, а также калибровки с использованием диэлектрических мер толщины, погрешность измерения металлических покрытий значительно превысит указываемую в описании типа средств измерения.



Рис. 3. Временные зависимости сигналов магнитоиндукционного преобразователя при измерении: *a* — ток в первичной катушке *i*(*t*), мА; *б* — ЭДС *e*(*t*, *h*) на катушке W<sub>2</sub> без учета ЭДС от вихревых токов в объекте контроля; *в* — ЭДС на катушке W<sub>2</sub> с учетом ЭДС от вихревых токов в объекте контроля; *c* — ЭДС *e*<sub>ок</sub>(*t*, *h*, σ<sub>1</sub>), обусловленная вихревыми токами в основании и покрытии объекта контроля при *h* = 300 мкм.

Результаты расчетов позволяют оценить абсолютную дополнительную погрешность  $\Delta$  измерения толщины *h* электропроводящих неферромагнитных покрытий на электропроводящих ферромагнитных основаниях, возникающую в случае градуировки приборов и их калибровки (настройки) перед измерениями с использованием диэлектрических мер толщины (имитаторов), чаще всего представляющих собой пленки из полиэтилентерефталата или диски из оргстекла.

На рис. 4*в* представлены расчетные значения  $\Delta$  для покрытий с  $\sigma_{\pi}$  в диапазоне от 10 до 60 МСм/м, нанесенных на основание из стали 10.



Рис. 4. Расчетные значения Δ для покрытий с σ, в диапазоне от 10 до 60 МСм/м, нанесенных на основание из стали 10.

Выполненные экспериментальные исследования с использованием специально изготовленных натурных мер толщины электропроводящих неферромагнитных покрытий (металлических мер толщины из цинка, алюминия и меди на основании из стали 10) показали, что относительная по-грешность δ при расчетах Δ не превышает 5—15 %.

Из графиков видно, что расчетное значение  $\Delta$  существенно превышает заявляемую в технической документации абсолютную допустимую погрешность измерений. В то же время, изготовление натурных мер металлических мер толщины покрытий для градуировки и калибровки приборов, с учетом широкой номенклатуры применяемых материалов, а также разнообразия форм и размеров изделий, представляет технически сложную и дорогую задачу [5, 6].

Также при использовании описанных выше принципов обработки измерительной информации следует учитывать влияние наводок промышленной сети и импульсных наводок силового оборудования в цеховых условиях, вызывающих дополнительную погрешность измерения при использовании амплитудного метода.

В связи с этим представляется целесообразной разработка и оптимизация способов возбуждения магнитного поля и алгоритмов обработки измерительной информации (сигналов), позволяющих подавить влияние вихревых токов и различных наводок [7].

Рассмотрим один из возможных вариантов решения.

В случае изменения тока i(t) в катушке  $W_1$  от нуля до стационарного значения  $I_0$  за время  $\Delta t$ , существенно меньшее некоего временного интервала  $\tau$ , используя (1), можно записать:

$$\int_{0}^{\tau} e(t)dt = -M(h)\int_{0}^{\tau} \frac{di(t)}{dt}dt = -M(h)I_{0},$$
(3)

где  $\int e(t)dt$  — первичный информативный параметр, являющийся энергетической характеристикой сигнала — площадью под кривой ЭДС, наведенной на катушке  $W_2$  при изменении тока в катушке  $W_1$  от нуля до  $I_{0.2}$ 



Рис. 5. Структура физической модели, описывающей возникновение вихревых токов в элементах конструкции преобразователя, покрытии и основании объекта контроля, а также соответствующих ЭДС на вторичной катушке.

При этом, по аналогии с описанным выше, также можно записать, что в элементах конструкции преобразователя, покрытии и основании возникают вихревые токи  $i_{\rm Bi}(t)$ . Каждый из вихревых токов  $i_{\rm Bi}(t)$  будет определяться активными и реактивным сопротивлениями их контуров, а ЭДС, наведенная на катушке W<sub>2</sub> от каждого из контуров вихревых токов, будет равна

$$e_{\rm Bi}(t) = -M_{i2}(h) \frac{di_{\rm Bi}(t)}{dt}, \qquad (4)$$

где  $M_{i2}(h)$  — коэффициент взаимоиндукции между соответствующим контуром вихревых токов и  $W_2$ .

Простейшая структура физической модели описываемых процессов представлена на рис. 5. Для предлагаемого алгоритма преобразования сигналов:

$$\int_{0}^{\tau} e_{Bi}(t) dt = -\int_{0}^{\tau} M_{i2} \frac{di_{Bi}(t)}{dt} dt = -\int_{0}^{\tau} M_{i2} \frac{d}{dt} \left(\frac{e_i}{R_{Bi}}\right) dt = \int_{0}^{\tau} M_{1i} M_{i2} \frac{d}{dt} \left(\frac{di(t)}{dt}\right) = 0.$$
(5)

Также, при выборе времени интегрирования  $\tau$ , кратному периоду сетевого напряжения ( $\tau = k \cdot 20$  мс, где k = 1, 2, ..., n), для ЭДС  $e_{50}(t)$  на катушке  $W_2$ , обусловленной наводками промышленной сети, можно записать:

$$\int_{0}^{\tau} e_{50}(t) dt = 0 .$$
 (6)

Для подавления высокочастотных и импульсных наводок от систем управления промышленного оборудования можно подобрать соответствующие постоянную времени и частоту среза интегратора.

Структурная схема измерительного преобразователя на базе микроконтроллера, например, STM32G473CE со встроенными АЦП, ЦАП и усилителями, реализующая описанную методику, представлена на рис. 6.

По аналогии с традиционно применяемым алгоритмом запишем, что ток в катушке  $W_1$  изменяется от нуля до  $I_0$  по закону

$$i(t) = I_0 \sin(\omega t), \tag{7}$$

где  $\omega = 2\pi \frac{1}{4\Delta t}$ .

На рис. 7 представлены временные зависимости сигналов магнитоиндукционного преобразователя для рассматриваемого варианта изменения тока для h = 300 мкм,  $\Delta t = 2$  мс и отличающихся значениях  $\sigma_n$ .

Дефектоскопия № 9 2021



Рис. 6. Структурная схема измерительного преобразователя: МК — микроконтроллер; ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; У1 и У2 — усилители; W<sub>1</sub> и W<sub>2</sub> — первичная и вторичная катушки первичного измерительного преобразователя.



Рис. 7. Временные зависимости сигналов магнитоиндукционного преобразователя при измерении с временным промежутком нарастания тока  $i(t) \Delta t_i$  и временным интервалом затухания вихревых токов  $i_{\rm BI}(t) \Delta t_3$  для  $\sigma_{\rm n}$  от 0 до 60 МСм/м: a — ток в первичной катушке;  $\delta$  — ЭДС на измерительной катушке  $W_2$  с учетом ЭДС от вихревых токов в объекте контроля; s — ЭДС  $e_{\rm og}(t, h, \sigma_{\rm n})$ , обусловленная вихревыми токами в основании и покрытии объекта контроля.

Из рис. Зв следует, что время преобразования  $\tau$  должно превышать сумму времени  $\Delta t$  нарастания тока и большего из времен  $\Delta t_3$  затухания вихревых токов в элементах конструкции преобразователя и объекте контроля. При этом  $\Delta t_3$  определим как временной интервал от момента окончания нарастания тока i(t) до момента, когда

$$e_{\rm or}(\Delta t + \Delta t_{\rm or}, h, \sigma_{\rm u})/e_{\rm or}(\Delta t, h, \sigma_{\rm u}) = 0.001.$$



Рис. 8. Время затухания вихревых токов в объекте контроля для разных  $\sigma_n$ , которое определяется времени от установления стационарного значения i(t) = 1,25 мА и достижения ЭДС на катушке  $W_2$ , равной 0,001 от максимума ЭДС.

На рис. 8 представлены результаты расчетов  $\Delta t_3$  для рассматриваемого преобразователя для типового варианта диэлектрического покрытия или металлических покрытий в диапазоне *h* до 3 мм и  $\sigma_n$  до 60 МСм/м, нанесенных на основание (полупространство) из стали 10.

Из рис. 8 видно, что для случая диэлектрических покрытий, а также для большинства схем применяемых на практике покрытий,  $\Delta t_s \leq 3$  мс.

Следует отметить, что для используемых в конструкции преобразователя термообработанных ферромагнитных материалов, в том числе с высокой твердостью, необходимым условием применения, исключающим их намагничивание, является перемагничивание по полному циклу одной из частных петель гистерезиса [8]. Это может достигаться намагничиванием импульсами чередующейся полярности, что позволяет свести к минимуму влияние магнитной предыстории, а также минимизировать помехи от внешних магнитных полей [9].

Выполненный анализ показывает, что указанное условие выполняется в случае применения временной диаграммы тока *i*(*t*), состоящий из четырех тактов, представленной на рис. 9*a*.



Рис. 9. Временные диаграммы тока возбуждения (*a*) и ЭДС (*б*) на вторичной катушке первичного измерительного преобразователя.

При  $\Delta t_3 \geq 3$  мс, исключающем влияние вихревых токов, и кратности времени полного цикла четырехтактового преобразования временному интервалу 20 мс, исключающему влияние наводок промышленной сети, можно предложить использование в качестве первичного информативного параметра величины:

$$N(h) = 4 \left| \frac{1}{T} \int_{0}^{\tau} e(t,h) dt \right| = 4M(h) I_{0},$$
(8)

получаемой оцифровыванием сигнала с выхода вторичной катушки и последующего суммирования кодов с учетом знака ЭДС в пределах каждого из тактов изменения тока в первичной катушке.

Рассматриваемое преобразование может быть реализовано на базе схемы, представленной на рис. 6 при соответствующем выборе средней точки. При этом, градуировка прибора в процессе производства, а также калибровка (настройка) в процессе его эксплуатации могут выполняться с использованием диэлектрических мер толщины (имитаторов) по традиционным методикам при условии выбора соответствующего значения т.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный на базе предложенного алгоритма преобразования специализированный малогабаритный магнитоиндукционного толщиномер позволил с использованием серийных преобразователей решить задачи измерения толщины металлических покрытий на внутренних поверхностях контейнеров для хранения ядерных отходов, различных плакирующих покрытий стальных листов, хромовых покрытий валопроводов и гидроцилиндров, а также ряд других задач, без изменения методик градуировки и калибровки (настройки) с использованием диэлектрических мер толщины (имитаторов) с обеспечением регламентируемых нормативной документацией погрешностей измерения в цеховых условиях серийных производств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Deutsch V., Platte M., Schuster V., Karl Deutsch W. The methods of NDT. Wuppertal: Castel Publications, 2006. 125 p.

2. International Standard ISO 2178—2016 Non-magnetic coatings on magnetic substrates — Measurement of coating thickness — Magnetic method.

3. Jalali Mehrabad M., Ehsani M. H. An Investigation of Eddy Current, Solid Loss, Induced Voltage and Magnetic Torque in Highly Pure Thin Conductors, Using Finite Element Method // Procedia Materials Science. 2015. V. 11. P. 412–417.

4. *Muhammad N. A., Siti A. J.* Analysis of Eddy Current Density using ANSYS MAXWELL // Journal of electronics voltage and application. 2020. V. 1. Is. 2. P. 37–45.

 Сясько В.А., Голубев С.С., Смородинский Я.Г., Потапов А.И., Соломенчук П.В., Смирнова Н.И. Измерение электромагнитных параметров мер толщины металлических покрытий // Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 25—36.
 Бакунов А.С., Калошин В.А. Развитие вихретоковой толщинометрии защитных покрытий // Кон-

6. Бакунов А.С., Калошин В.А. Развитие вихретоковой толщинометрии защитных покрытий // Контроль. Диагностика. 2016. № 1. С. 27—31.

7. Костин В.Н., Смородинский Я.Г. Многоцелевые аппаратно-программные системы активного электромагнитного контроля как тенденция // Дефектоскопия. 2017. № 7. С. 23—34.

8. Костин В.Н., Василенко О.Н., Сандомирский С.Г. Структурная чувствительность параметров несимметричного цикла «коэрцитивный возврат — намагничивание» термообработанных низкоуглеродистых сталей // Дефектоскопия. 2018. № 11. С. 34—40.

9. Реутов Ю.Я., Пудов В.И. Аппаратура для контроля ферромагнитных изделий с малой коэрцитивной силой // Дефектоскопия. 2017. № 12. С. 40—45.