## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ ОТРАЖАТЕЛЯ МЕТОДОМ TFM



**ПЕПЕЛЯЕВ Андрей Валентинович** 000 «ТЕХКОН», Москва

Продолжаем цикл статей по применению метода TFM, начатый в предыдущих номерах журнала [1-3]. На этот раз оценим возможности этого и некоторых других методов и способов по определению формы дефекта.

Форма и связанный с ней тип дефекта - это один из важных параметров дефекта, который можно (и нужно) использовать для оценки его допустимости. Чаще всего дефект по этому признаку классифицируют на объемный и плоскостной. Тема с определением формы дефекта существует давно – как попытка оценивать его не только по амплитуде эхосигнала и условным размерам. Эти параметры довольно просты в определении, но бывают недостаточно информативны при оценке влияния дефекта на прочность и другие эксплуатационные характеристики объекта контроля (ОК). Например, в ГОСТ 14782-86 [4] уже были описаны способы оценки конфигурации дефектов. Обзор методов по определению формы дефектов есть, например, в справочнике [5].

В общем случае для определения формы дефекта необходимо его озвучивание с разных направлений, под различными углами, возможно, ультразвуковыми волнами разных типов. Для ручного контроля одноканальным дефектоскопом эти методы достаточно сложны, поскольку требуют дополнительных схем контроля, перемещений преобразователя относительно дефекта по заданной траектории, одновременного применения нескольких преобразователей, в том числе и с различными характеристиками. При этом необходимы регистрация и анализ сигналов, отразившихся от дефекта На простых примерах показано, как с помощью различных технологий ультразвукового контроля, включая метод общей фокусировки TFM, можно классифицировать отражатель на объемный или плоскостной. Некоторые способы, характерные для метода TFM, можно использовать, даже если в дефектоскопе с фазированными решетками нет такой функции.

в разных направлениях, а также сигналов, возникших в результате дифракции волн на дефекте.

К этой группе методов можно отнести метод TOFD, который используют достаточно широко, о чем говорит в том числе и введение в действие стандарта ГОСТ ISO 10863–2022 [6].

Для определения формы дефектов можно эффективно применять многоканальные дефектоскопы и преобразователи-фазированные решетки (ПФР) с электронным сканированием зоны дефекта, в том числе с переменным углом ввода, и наглядным представлением полученных данных в виде различных сканов – сечений ОК. При этом отдельный интерес вызывают расчетные методы, повышающие чувствительность и разрешение контроля, такие как TFM.

Интересно, что повысить разрешение при контроле можно разными и в чем-то прямо противоположными средствами. Если мы применяем одноэлементный преобразователь без дополнительной обработки эхосигналов, то для роста фронтального разрешения в дальней зоне нужно уменьшить ширину основного лепестка его диаграммы направленности. Один из способов добиться этого – увеличить (в известных пределах) размер излучателяприемника. В идеале полезный сигнал лучше было бы получать только одним центральным лучом, а боковые лучи вообще исключить как источник помех.

Наоборот, в методе TFM для сбора исходных данных (элементарных А-сканов) используют излучение и прием сигналов отдельными элементами ПФР. Поскольку шаг ПФР обычно не превышает 1 мм, можно приблизительно считать эту величину размером излучателя-приемника для одного элемента. То есть в данном случае используют излучатель-приемник небольшого размера с очень широкой диаграммой направленности (в основной плоскости или в плоскости активной апертуры ПФР).

При этом активно применяют и боковые лучи основного лепестка с большими углами раскрытия. Именно боковые лучи широкой диаграммы направленности каждого отдельного элемента ПФР позволяют озвучивать отражатель в большом диапазоне углов, с различных направлений, причем делать это без перемещений ПФР (рис. 1). Высокое разрешение достигается специальными алгоритмами совместной обработки элементарных А-сканов, которые создают эффект контроля узким пучком лучей. При этом относительно низкую амплитуду эхосигналов, полученных боковыми лучами, можно компенсировать синхронизацией по времени распространения и суммированием большого количества элементарных А-сканов в точках реконструкции изображения отражателей. Подобные методы эффективны в ближней зоне акустического поля излучения-приема, которая определяется с учетом всей активной апертуры ПФР.

Для наглядности на рис. 1 показано только восемь элементов ПФР. В некоторых моделях дефектоскопов, например OmniScan X3, для метода TFM можно использовать до 128 элементов (удвоенное количество независимых каналов излучения-приема дефектоскопа). Большее число задействованных элементов ПФР позволяет повысить чувствительность, разрешение, улучшить соотношение полезный сигнал/шум, а также увеличить зону контроля, в которой достигаются все эти эффекты.

Подробнее об основах метода TFM и сбора исходных данных по технологии полноматричного захвата FMC можно прочитать, например, в работе [7].

Теперь переходим к описанию экспериментальной части. Для определения формы отражателя методом ТFM применяли два искусственных отражателя (ИО) — боковое цилиндрическое отверстие (БЦО) и плоскодонное отверстие (ПДО), которые являются соответственно объемным ненаправленным и плоскостным направленным отражателем (рис. 2). Использование ИО предусмотрено в некоторых методах определения формы дефекта — для получения опорных сигналов [5]. Аналогично полученные индикации БЦО и ПДО можно применять для сравнения и классификации дефектов на объемные и плоскостные.

Оба ИО выполнены в образце из углеродистой стали на одинаковой глубине 7 мм от поверхности



Рис. 1. Схема сбора элементарных А-сканов методом TFM



Рис. 2. Применяемые отражатели БЦО и ПДО

ввода ультразвука. Обычно чем больше размеры отражателя, тем проще оценить его форму. Здесь для усложнения задачи были использованы ИО малых размеров, сравнимых с длиной продольной волны в стали, а именно БЦО и ПДО диаметром 2 мм (при длине волны 1,2 мм для частоты ультразвуковых колебаний 5 МГц).

Применяли дефектоскоп OmniScan X3 с числом каналов 16:64 (32 канала для метода TFM), ПФР с апертурой 64 элемента, 38,4×10,0 мм (32 элемента, 19,2×10,0 мм для метода TFM), шаг элементов 0,6 мм, рабочая частота 5 МГц, без акустической за-держки (призмы).

Результаты приведены в виде End-сканов (сечений OK в плоскости активной апертуры ПФР, перпендикулярной поверхности ввода ультразвука — аналогично показанному на рис. 2), с одинаковым масштабом по горизонтали (ось индекса) и по вертикали (ось глубины). Цвет индикаций соответствует амплитуде эхосигналов по заданной шкале цветокодировки. Значения амплитуды эхосигналов указаны в процентах (%) от полной высоты A-скана.

Епd-сканы ИО, полученные методом TFM, приведены в табл. 1. Использовался режим *LL* – расчетная схема с распространением продольных

волн, без их трансформации и отражения от поверхностей ОК (см. рис. 1), с включенными функциями FMC и построения огибающей.

При установке ПФР над центром ИО ( $\Delta I = 0$  мм) существенное отличие индикаций состоит только в том, что ширина индикации БЦО примерно в 2 раза меньше, чем ПДО (0,8 и 1,7 мм соответственно по уровню –6 дБ от максимальной амплитуды эхосигнала от отражателя  $A_{\text{max}}$ , равной 80 %).

В данном случае активная апертура 19,2 мм оказалась недостаточной для надежного определения формы ИО. Решить проблему можно путем смещения ПФР от центрального положения на 10 мм вправо и влево по оси индекса – чтобы лучше озвучить отражатели в боковой проекции. В этом случае  $A_{\rm max}$  от БЦО уменьшилась примерно до 60% (-2,5 дБ по сравнению с центральным положением ПФР),  $A_{\rm max}$  от ПДО уменьшилась примерно до 20% (-12 дБ по сравнению с центральным положением ПФР).

Как видим, амплитуда эхосигналов от БЦО при боковых отражениях намного выше, чем для подобных сигналов от ПДО. Этот признак уже позволяет классифицировать отражатели соответственно на объемный и плоскостной. В некоторых случаях определить форму отражателей можно более простыми способами. В табл. 2 приведены индикации указанных выше ИО, полученные эхоимпульсным методом, без дополнительной обработки эхосигналов, при линейном сканировании продольными волнами с апертурой ПФР 8 элементов (4,8 мм), шагом 1 элемент (0,6 мм) и углом ввода 0°. Для «бокового обзора» отражателей добавлены две схемы секторного сканирования с двух противоположных сторон продольными волнами, с апертурой 16 элементов (9,6 мм), шагом 1°, диапазоном углов ввода от 40 до 70° и от -40 до -70°.

Как видим по результатам, полученным с углом ввода 0°, ширина индикации БЦО несколько меньше, чем ПДО, в остальном эти индикации практически одинаковы. Увеличение апертуры, смещение ПФР относительно ИО, применение фокусировки на глубину залегания отражателей результат для этой схемы сканирования принципиально не меняют.

Как и в предыдущем примере, решение по форме отражателей позволяют принять результаты их бокового озвучивания, которое на этот раз выполнено секторным сканированием. Для такого объ-

ТипИО	Смещение $\Delta I$ , мм				
	-10	0	10		
БЦО ∅ 2 мм, End-сканы					
ПДО Ø 2 мм, End-сканы					
Примечания					
<ol> <li>Смещение ΔI определяется по горизонтальной оси индекса между центральными осями ИО и апертуры ПФР.</li> <li>Исходный размер приведенных в таблице End-сканов 3×3 мм.</li> <li>Шкала цветокодировки амплитуды эхосигналов для End-сканов:</li> </ol>					
0 % 10 20 30 40 50 60 70 80 90					

Таблица 1. End-сканы ИО, полученные методом TFM

емного отражателя, как БЦО,  $A_{\text{max}}$  боковых эхосигналов при соответствующей настройке чувствительности выводится на уровень 80%. Для ПДО как плоскостного отражателя при том же уровне чувствительности  $A_{\text{max}}$  боковых эхосигналов не превышает 20%.

Сканирование прямым и наклонным лучом можно применять одновременно, если в дефектоскопе есть функция «Мультигруппа». Такие комбинированные схемы используют иногда при коррозионном мониторинге, как это показано на рис. 3 [8].

В некоторых случаях это позволяет лучше выявлять дефекты неравномерной коррозии (могут быть дефектами объемного типа), а также отличать их от расслоений (строго плоскостных дефектов), характерных для металлопроката. При контроле только прямым лучом сделать это бывает проблематично.

Теперь вернемся к методу TFM — применим характерный для него способ сбора исходных данных отдельными элементами ПФР, но не будем применять обработку полученных А-сканов по алгоритмам реконструкции изображений. Это можно сделать, даже если в дефектоскопе нет функции TFM. А именно, используем линейное сканирование с минимальной апертурой 1 элемент (0,6 мм) и шагом тоже 1 элемент ПФР.

Сканирование с апертурой в 1 элемент редко используют при контроле, обычно его применяют для проверки исправности или калибровки чув-



Рис. 3. Коррозионный мониторинг прямым и наклонным лучом

ствительности отдельных каналов излученияприема. Но, по сути, это самый простой режим TFM, а именно режим *LL*, реализованный по совмещенной схеме, когда отдельные элементы ПФР последовательно излучают и принимают только свой сигнал (а не используются все возможные сочетания пар излучателей и приемников, как для метода TFM/FMC). Полученные результаты приведены в табл. 3.

Можно сказать, что End-сканы в табл. 3 отображают элементарные А-сканы метода TFM, только их визуализация выполнена по лучам, ориентированным нормально к поверхности

Таблица 2. End-сканы ИО, полученные эхоимпульсным методом без дополнительной обработки сигнала

	Схема сканирования				
Тип ИО	ПФР Секторное 4070°	пфр Линейное 0°	пфр Секторное – 40–70°		
БЦО ∅ 2 мм, End-сканы	1	•			
ПДО Ø 2 мм, End-сканы	3	•	300		
Примечания 1. Исходный размер приведенных в таблице End-сканов 6×3 мм. 2. Шкала цветокодировки амплитуды эхосигналов для End-сканов:					
0 % 10 20 30 40 50 60 70 80 90					

Тип ИО	БЦО Ø 2 мм	ПДО Ø 2 мм			
End-сканы					
Примечания					
1. Исходный размер приведенных в таблице End-сканов 12×6 мм.					
2. Шкала цветокодировки амплитуды эхосигналов для End-сканов:					
0 % 10	20 30 40 50	60 70 80 90			

Таблица 3. End-сканы ИО, полученные эхоимпульсным методом с апертурой 1 элемент ПФР

ввода ультразвука. Иначе говоря, на этих Endсканах все боковые лучи отдельных элементов  $\Pi \Phi P$ , такие как показаны на рис. 1, развернуты вертикально.

Кстати, во многих случаях применения метода TFM нет возможности просмотра элементарных Асканов, а после применения алгоритмов реконструкции изображений они не сохраняются.

Но в данном случае элементарные А-сканы позволяют лучше определить форму отражателей. БЦО как объемный отражатель имеет характерную индикацию в виде дуги. Ее формируют не менее 19 элементов ПФР, при этом для крайних элементов амплитуда эхосигнала примерно равна 40% (-6 дБ от  $A_{max}$ , равной 80% для центральных элементов). ПДО как плоскостной отражатель также имеет свою характерную индикацию. Она лежит в основном в горизонтальной плоскости, ее формируют только 10 элементов ПФР, и это при том же соотношении амплитуд 40 и 80% для крайних и центральных элементов, как и в случае с БЦО. Далее индикация резко обрывается, амплитуда эхосигналов падает до уровня шумов.

Приведенный пример показал, что контроль с апертурой в 1 элемент иногда может работать как «акустическая лупа» — он позволяет довольно четко разделить для анализа эхосигналы от небольших участков отражающей поверхности, причем сделать это без применения дополнительных схем контроля и перемещений ПФР.

## Библиографический список

- 1. Пепеляев А.В. Преимущества нового дефектоскопа с фазированными решетками OmniScan X3 и метода общей фокусировки TFM при ультразвуковом контроле сварных швов // Территория NDT. 2021. № 4. С. 47–49.
- 2. Пепеляев А.В. Настройка дефектоскопа Omni-Scan X3 для метода TFM. Скорость ультразвуковых волн и толщина объекта контроля // Территория NDT. 2022. № 1. С. 34–38.
- 3. Пепеляев А.В. Влияние температуры на результаты ультразвукового контроля методом TFM // Территория NDT. 2022. № 2. С. 38–42.
- **4.** ГОСТ 14782—86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. М.: Изд-во стандартов, 1986.
- 5. Ермолов И.Н., Вопилкин А.Х., Бадалян В.Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии: Краткий справочник. М.: НПЦ «ЭХО+», 2004.
- 6. ГОСТ ISO 10863–2022. Неразрушающий контроль сварных соединений. Ультразвуковой контроль. Применение дифракционно-временного метода (TOFD). М.: ФГБУ «РСТ», 2022.
- 7. Чи-Ханг Кван. Оптимизация выбора преобразователя для контроля методом TFM/FMC // Территория NDT. 2019. № 4. С. 36–43.
- 8. Решения для коррозионного мониторинга. Технология фазированных решеток. Olympus, 2015.

## Ответы на кроссворд

По горизонтали: 1. Радиоимпульс. 7. Отбел. 8. Намагниченность. 14. Стереорадиография. 15. Стереорадиоскопия. 17/ Флокен. 18. Смещение. 19. Сила. 20. Пенетрант. 22. Утечка. 23. Апертура. 24. Карта. По вертикали: 2. Поверка. 3. Кинорадиография. 4. Демодуляция. 5. Импульс. 6. Виброметрия. 9. Накладка. 10. Дефектометрия. 11. Период. 12. Диагностика. 13. Напряженность. 16. Форма. 19. Стрела. 21. Фаза.