

# ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МЕТОДОМ FMC/TFM



**Чи-Ханг КВАН (Chi-Hang Kwan)**

Olympus NDT Inc. (Канада)

Такие техники ультразвуковой визуализации, как метод общей фокусировки (TFM), совместно с полноматричным захватом (FMC) находят все более широкое применение в различных промышленных областях по всему миру благодаря высокой чувствительности, ширине поля зрения, точности визуализации геометрии образца и, следовательно, повышению вероятности выявления дефекта.

Так как традиционные ультразвуковые фазированные решетки (ФР) появились в результате развития одноэлементного преобразователя, TFM/FMC можно воспринимать как следующий шаг в промышленной ультразвуковой визуализации после ФР-визуализации. В отличие от фазированных решеток существует явная потребность в разработке руководств и стандартных практик для правильного применения метода TFM/FMC, особенно в плане выбора комбинации преобразователя и призмы, а также типов волн для таких классических приложе-

ний, как контроль сварных соединений и выявление коррозии.

## Метод общей фокусировки (Total Focusing Method)

TFM – находящийся в последние годы в постоянном развитии метод реконструкции луча с синтетической апертурой [1]. Быстрое развитие и миниатюризация вычислительных приборов позволяют все чаще использовать их в портативном оборудовании, предназначенном для контроля на объектах. Подобно фокусировке фазированной решетки, TFM-визуализация основана [2] на распределении задержек сигналов активных элементов фазированной решетки при излучении и приеме. На рис. 1 показан процесс сбора данных – полноматричный захват – FMC (см. рис. 1), а на рис. 2 представлен весь процесс сбора данных (FMC) с последующей TFM-обработкой (справа) для одной точки на реконструируемом изображении. Итерация проводится для всех точек на изображении или в

*В последние годы метод общей фокусировки (TFM) и полноматричный захват (FMC) непрерывно развиваются и все чаще применяются в различных отраслях. TFM – метод фокусировки, основанный на зондировании отдельными элементами фазированной решетки. Сканирование организовано таким образом, что активная и пассивная апертуры решетки, шаг элемента, ближнее поле, расходимость и ширина луча влияют на качество и эффективность контроля.*

*Эти параметры имеют значение при выборе преобразователя, когда требуется учесть условия проведения контроля, например тип материала, толщину и геометрию объекта. Помимо этого при исследовании сварных соединений применяется наклонная призма, выбор которой определяет те же условия проведения контроля.*

*В настоящей работе данные моделирования вместе с данными реальных исследований используются для объяснения степени влияния параметров преобразователя на качество TFM-визуализации в зависимости от области применения.*

области интереса в зависимости от выбранного пространственного разрешения.

Алгоритм обработки TFM позволяет учитывать различные направления распространения УЗ-волны, а также типы (моды) волн. Контроль может проводиться поперечной  $T$  и продольной  $L$  волнами, в эхо-импульсной или раздельно-совмещенной конфигурации («тандем») в зависимости от области применения.

На рис. 3 приведены примеры различных направлений распространения УЗ-волны, учет которых возможен при использовании TFM-алгоритма. Легко понять, что для оптимизации выявления в каждой конкретной ситуации может потребоваться определенное направление распространения УЗ-волны. Например, в случае сварного шва с Х-образной разделкой кромок несплавление может быть выявлено в эхоимпульсной конфигурации продольной или поперечной волной, когда луч перпендикулярен кромке шва. В этом

случае можно использовать половинное прохождение луча для нижних кромок и полный путь для верхних боковых кромок (рис. 3, а, б). С другой стороны, при попытке выявить трещины, образовавшиеся в процессе эксплуатации, лучше использовать раздельно-совмещенную конфигурацию и направление распространения УЗ-волны не вдоль одной линии по аналогии с методом зональной дискриминации (рис. 3, в, г).

Важно помнить, что трансформация волны происходит не только в результате преломления, но и при отражении в том же материале на границе сред. Рис. 4 графически описывает закон Снеллиуса (см. уравнение на рис. 4). Важным преимуществом TFM, помимо фокусировки в любой выбранной точке, является возможность использования не только двух различных типов ультразвуковой волны (*T* и *L*), но и возможность применять моды волны, полученные за счет трансформации.

Трансформация волны вместе с распространением не только усложняют контроль, но и повышают чувствительность к определенной ориентации и положению дефектов. Как видно из рис. 5, продольная донная волна позволяет лучше выявлять дефекты в толще из-за большего угла отражения, в то время как поперечные отраженные волны могут использоваться для обнаружения приповерхностных дефектов. Таким образом, для обеспечения высокой вероятности выявления чрезвычайно важно выбрать верный тип волн в соответствии со сферой применения, конкретной ориентацией или расположением дефекта.

**Рекомендации по выбору преобразователя**

Помимо типа волны и направления распространения УЗ-волны на результаты контроля

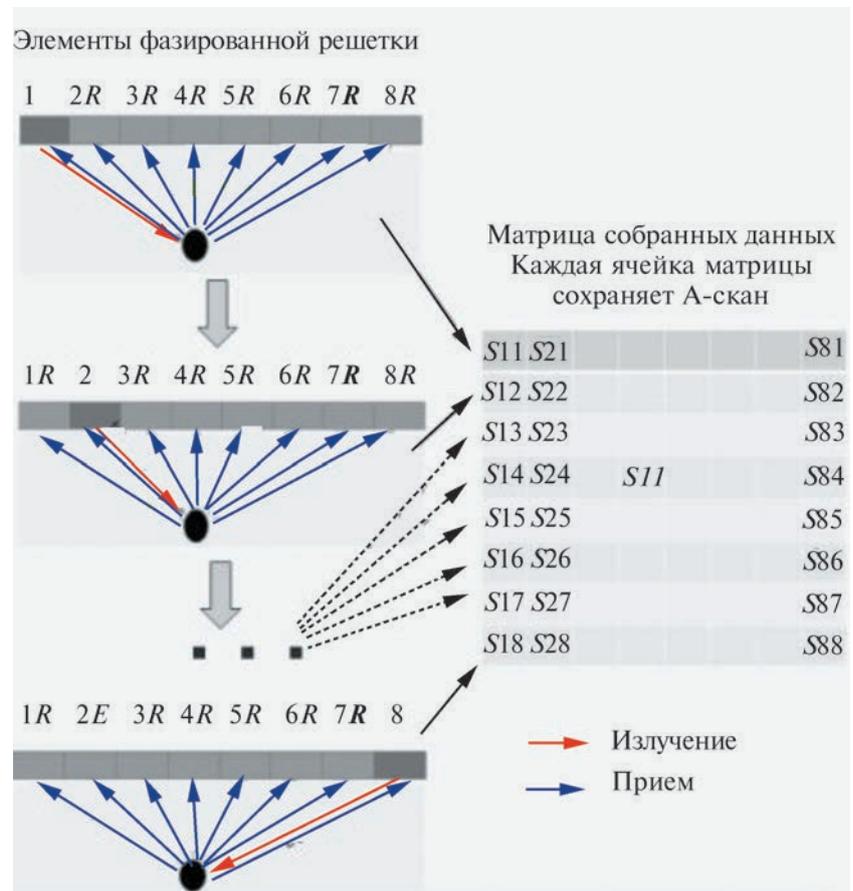


Рис. 1. Полноматричный захват (FMC): каждый элемент матрицы хранит один а-скан; каждая строка матрицы хранит А-сканы, генерируемые одним передающим зондирующим элементом и всеми принимающими элементами

существенно влияет выбор преобразователя и призмы.

Большинство используемых в настоящее время фазированных преобразователей могут использоваться в рамках TFM-метода. Однако в зависимости от области применения и ожидаемых результатов выбор преобразователя можно оптимизировать, если учесть его основные физические параметры: резонансную частоту, шаг и высоту, количество активных элементов. Влияние указанных параметров на акустические поля задается простыми акустическими законами.

Например, ожидается, что TFM-фокусировка будет наиболее эффективным методом в ближнем поле, определяемом

резонансной частотой и активной апертурой ПЭП или произведением количества элементов на шаг.

Необходимость учета таких аспектов, как параметры преобразователя и призмы, позиционирование ПЭП в зависимости от области интереса, различные типы (моды) волны и пути распространения волны, существенно усложняет применимость метода TFM и обуславливает зависимость результатов от навыков оператора.

**Акустическая область влияния**

В работе [3] описан новый полуаналитический алгоритм, позволяющий быстро моделировать акустическое поле в области интереса в зависимости от

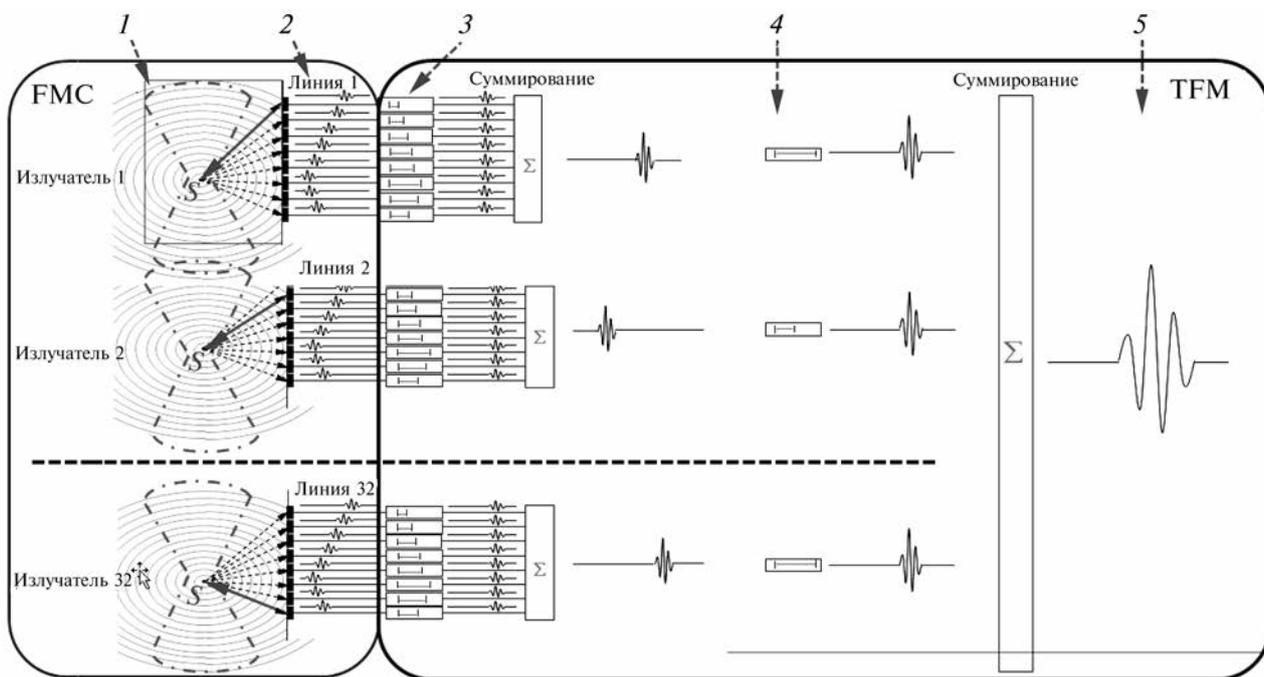
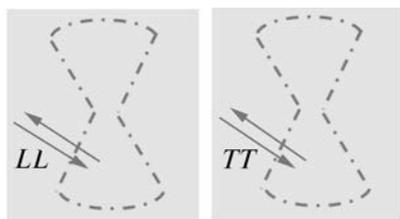
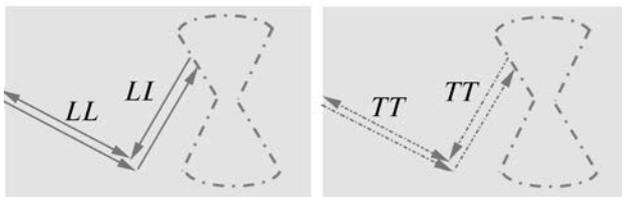


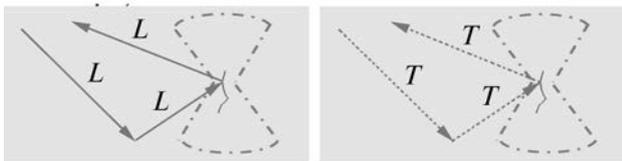
Рис. 2. Процесс FMC-сбора данных (слева) и TFM-обработки (справа) для одной точки изображения в области контроля: 1 – область контроля; 2 – сохраненные A-сканы от каждого элемента решетки; 3 – применяемые временные задержки в фазе приема сигнала; 4 – применяемые временные задержки в фазе генерации сигнала; 5 – результирующий A-скан для одной точки фокусировки



а)



б)



в)



з)

параметров преобразователя и призмы, позиционирования ПЭП, выбранного пути и типа волны, а также ожидаемой ориентации дефекта. Акустическая область влияния (AROI) не только помогает оператору создать его план TFM-сканирования, но также вносит вклад в непрерывное накопление знаний и опыта корректного использования метода TFM.

Пример акустической области влияния приведен на рис. 6 для преобразователя 5L64-A32 с наклонной призмой, которым проводится контроль сварной пластины толщиной 15 мм с использованием типов волн *TLL* для поиска вертикальных дефектов.

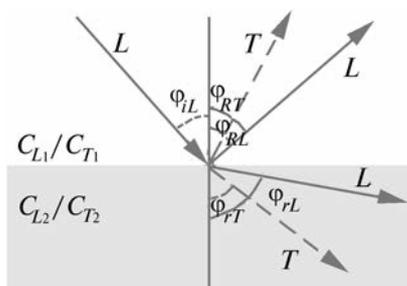
Акустическая область влияния была использована в настоящей работе как второй инструмент оценки важности различных параметров преобразователя и призмы для обеспечения эффективности контроля.

**Описание испытаний**

Было проведено несколько испытаний, связанных с тремя различными областями примене-

Рис. 3. Пример направления распространения УЗ-волны, учитываемой в алгоритме TFM: а – LL и TT половинное прохождение; б – LL LL и TT TT полное прохождение; в – LLL и TTT раздельно-совмещенное прохождение; г – TTL и TLT раздельно-совмещенное прохождение с трансформацией волны

МЕТОДЫ, ПРИБОРЫ, ТЕХНОЛОГИИ



$$\frac{\sin \varphi_{iL}}{C_{L1}} = \frac{\sin \varphi_{RL}}{C_{L1}} = \frac{\sin \varphi_{RT}}{C_{T1}}$$

Рис. 4. Закон Снеллиуса:  $\varphi_{iL}$  – угол падения продольной волны;  $\varphi_{RL}$  – угол отражения продольной волны;  $\varphi_{RT}$  – угол отражения поперечной волны;  $\varphi_{rL}$  – угол преломления продольной волны;  $\varphi_{rT}$  – угол преломления поперечной волны;  $C_{L1}$  – скорость продольной волны в материале 1;  $C_{T1}$  – скорость поперечной волны в материале 1;  $C_{L2}$  – скорость продольной волны в материале 2;  $C_{T2}$  – скорость поперечной волны в материале 2

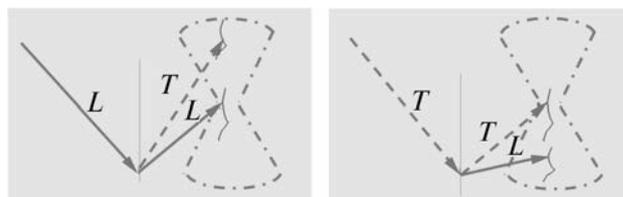


Рис. 5. Трансформация волн и аспекты выбора

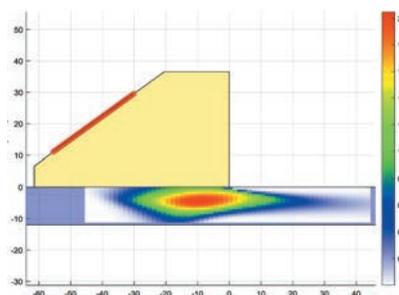


Рис. 6. Пример моделирования AROI

ния: обнаружение коррозии, проверка толстых металлических деталей и выявление вертикальных дефектов в сварных пластинах. В таблице описаны проведенные испытания, включая область применения, оцениваемые параметры, комбинацию преобразователь/призма, исследуемый образец, путь распространения и ожидаемый отражатель. Используемые фазированные преобразователи подробно описаны в работе [4]. Испытания были подкреплены моделированием AROI, чтобы продемонстрировать применимость и полезность метода AROI для контроля методом TFM.

### Ближнее поле, шаг и размер апертуры

При контроле тестового блока с боковыми сверлениями (SDH) диаметром 1,5 мм использовали три различных преобразователя. На рис. 7 видно, что эквивалентное ближнее поле, относящееся к активной апертуре всего ПЭП, составляет приблизительно 200, 400 и 700 мм соответственно. Считается, что такие значения ближнего поля не повлияют на контроль в первых 2/3 ближнего поля. Однако ожидается, что размер шага будет влиять на чувствительность в ближнем поле, чувствительность в областях, близких к краям ПЭП, а также на размер апертуры, не-

### Описание испытаний

№ рисунка	Область применения	Параметр для оценки	ПЭП	Призма	Материал	Толщина объекта контроля	Типы волн	Отражатель	Ориентация
9, 10	Выявление коррозии/ контроль прямым лучом	Шаг и апертура	5L64-A32	SA32-0L	Сталь	9	LL	Донный	По горизонтали
			5L64-NW1	SNW1-0L	Сталь	9	LL	Донный	По горизонтали
7, 8	Сварной шов/металлопроизводство	Ближнее поле	5L64-A32	Контакт	Сталь	100	LL	В объеме	По горизонтали
			10L64-A32	Контакт	Сталь	100	LL	В объеме	По горизонтали
			5L60-A14	Контакт	Сталь	100	LL	В объеме	По горизонтали
11-13	Выявление трещин в сварном шве	Тип и путь УЗ	5L64-A32	SA32-N55S	Алюминий	25	TLT	Направленный	По вертикали
			5L60-A14	SA14-N55S	Алюминий	25	TLT	Направленный	По вертикали
14	Несплавление	Тип и путь УЗ	10L64-A32	SA32-N55S	Сталь	12	TTTT	Направленный	30°
			5L64-A32	SA32-N55S	Сталь	12	TTTT	Направленный	30°



Рис. 7. Исследования блока ASME: различная центральная частота, шаг и размер активной апертуры. ПФР – преобразователь с фазированной решеткой

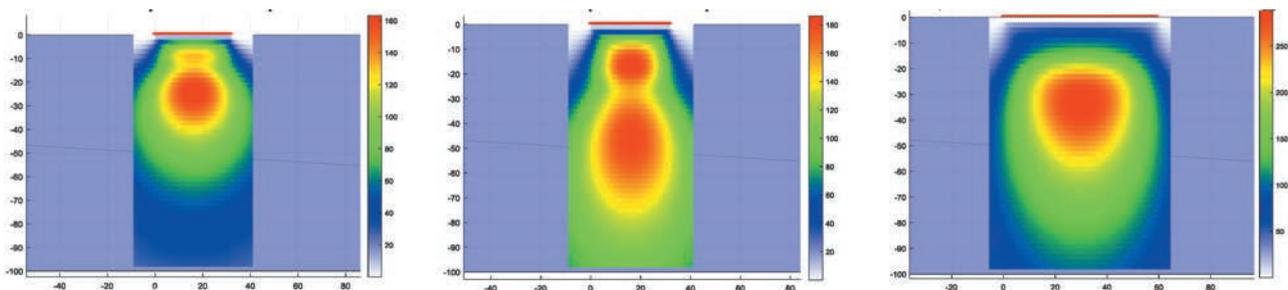


Рис. 8. Симуляция AROI для трех случаев, представленных на рис. 7: слева направо 5L64-A32, 10L64-A32, 5L60-A14

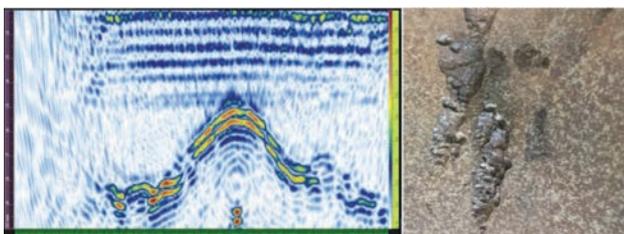


Рис. 9. Пример профиля корродированной задней стенки: изображение, реконструированное с помощью метода TFM

обходимый для выявления дефектов в удаленных участках.

Сам по себе параметр размера шага имеет важное значение для качества TFM-визуализации. Шаг (непосредственно связанный с размером элемента) определяет расходимость элементарного луча, генерируемого каждым отдельным элементом. Это в свою очередь указывает на возможность каждого элемента внести вклад в акустическую область, расположенную близко к поверхности ПЭП, но относительно далеко от своего местоположения. Например, при проведении линейного контроля вклад элемента № 64 в выявление несплошности, расположенной под элементом № 1, будет очень ограниченным и зависит от размера шага.

В ходе исследования объект контроля разделяли на три зоны – ближнюю, среднюю и дальнюю.

Оценивая чувствительность в ближнем поле, можно отметить большую эффективность ПЭП с малым шагом и более низкой частотой, что объясняется большей расходимостью луча, что улучшает покрытие под ПЭП для каждого отдельного элемента. Вывод согласуется с тремя моделируемыми AROI (рис. 8), где можно отметить более высокую ожидаемую амплитуду в области вблизи поверхности для ПЭП с малым шагом элементов (ПЭП А32).

В средней области лучшее разрешение и чувствительность характерны для ПЭП с большим ближним полем (таких, как 10 МГц А32 и 5 МГц А14), возможно, из-за лучшей фокусировки.

Улучшенная фокусировка даже более видима в удаленных областях, где ПЭП с большой апертурой А14 демонстрирует лучшие чувствительность и разрешающую способность.

### Шаг и размер апертуры при исследовании коррозии

Пример исследования участка с коррозией приведен на рис. 9. Преимуществом использования TFM для картирования коррозии является широкое поле зрения, позволяющее реконструировать профиль корродированной задней стенки. Активная апертура и размер шага относятся к наиболее важным параметрам, которые необходимо учесть. Например, небольшая апертура обеспечит узкое поле зрения, не достаточное для четкого определения

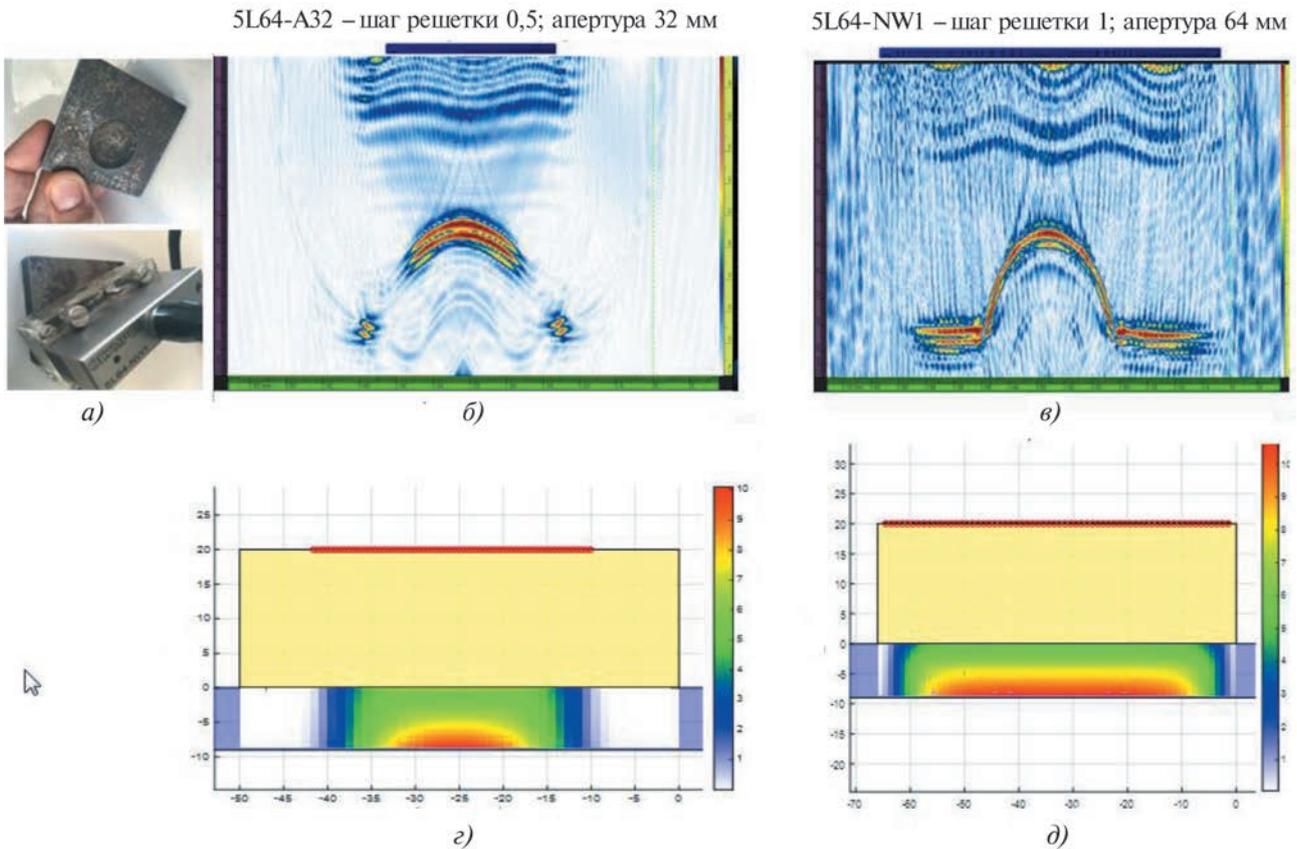


Рис. 10. Расположение образца и ПЭП (а), изображение TFM при ПЭП А32 (б), изображение TFM при ПЭП NW1 (в), моделирование AROI для ПЭП А32 и пути LL волны (г), AROI для NW1 и пути LL-волны (д)

типа повреждения — питтинга или общей коррозии. Большой размер шага также повлияет на направленность, т.е. возможность управления лучом и, следовательно, способность визуализировать острые края, например в случае питтинга.

Для оценки важности шага и апертуры два различных ФР-преобразователя использовали на образце с питтингами с ровными поверхностями. Центральная частота обоих ПЭП составляла 5 МГц, количество элементов 64, размер шага 0,5 и 1 мм соответственно. В обоих случаях применяли призму из реколита.

На рис. 10 б, в показаны результаты TFM-визуализации в двух случаях: малая апертура и малый шаг; большая апертура и широкий шаг. Как и ожидалось, малый шаг обеспечивает лучшую на-

правленность с лучшим отношением сигнал/шум (SNR) при обнаружении острых профилей питтингов. Однако небольшая активная апертура не позволяет получить полное изображение области дефекта. При большей апертуре ПЭП достигается более широкое поле зрения, которое включает всю зону дефекта, с меньшей направленностью, при этом соотношение сигнал/шум для профилей ниже. Объяснение результата явно дается моделированием AROI, которое показывает более широкое акустическое поле с более острыми краями в случае ПЭП А14 по сравнению с ПЭП А32 слева.

#### Направление распространения УЗ-волны и типы волн при выявлении трещин в сварном шве

Хотя все приведенные соображения можно сделать перед

проверкой, подразумевающей распространение одной волны в режиме импульс-эхо (ТТ или LL, ТТТТ или LLLL), настройка еще более усложняется при рассмотрении тандемного (ТТТ, LLL) или двухрежимного распространения или случаев трансформации волны (ТТЛ, LLТ и т.д.).

Рассматривая симулятор AROI, отмечаем, что не все возможные звуковые пути могут быть использованы с одинаковой эффективностью при обнаружении вертикальных дефектов.

#### Контроль сварных соединений: вертикальный дефект (трещина)

За счет использования наклонного луча при контроле сварных соединений и последующей трансформации волны



Рис. 11. Экспериментальная настройка для вертикальных дефектов

настройка конфигурации оборудования может быть сложна. Как показано ранее на примере контроля прямым лучом, акустическая область влияния может быть весьма полезным инструментом для выбора оптимальных параметров и настройки контроля. При выявлении вертикальных дефектов AROI показывает, что некоторые направления распространения УЗ-волны (такие, как TLT) более подходят для приповерхностных дефектов, тогда как другие (такие, как TTT) могут использоваться для выявления дефектов у дальней стенки.

В случае, представленном на рис. 11, для подповерхностного вертикального дефекта согласно AROI (рис. 12) оптимальным является преобразователь А32, 5 МГц с призмой на 55°, поперечная волна с TLT-направлением распространения (рис. 13, а). С другой стороны, при аналогичных условиях для выявления дефекта у донной поверхности одним из наиболее эффективных направлений распространений УЗ-волны является TTT.

Другая ориентация дефекта требует различных типов волны (режимов) и путей, которые должны рассматриваться алгоритмом TFM. Например, несплавление при скосе кромок 30° лучше всего обнаруживается поперечной волной в режиме импульс-эхо. В зависимости от глубины позиционирования дефекта определенная центральная частота может быть более подходящей, чем другие. На рис. 14 пред-

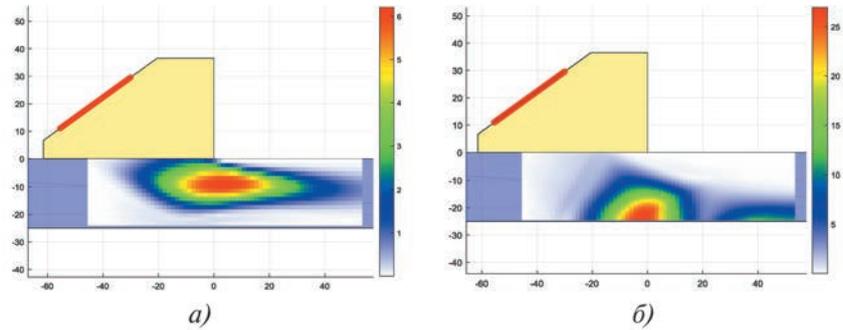


Рис. 12. Оптимизация за счет AROI настройки для обнаружения вертикального дефекта

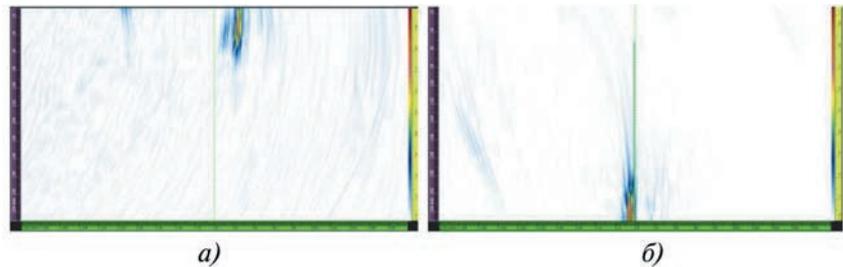


Рис. 13. TFM-визуализация с использованием направлений распространения УЗ-волны TLT и TTT соответственно для подповерхностного дефекта и дефекта, расположенного у обратной (донной поверхности) стенки

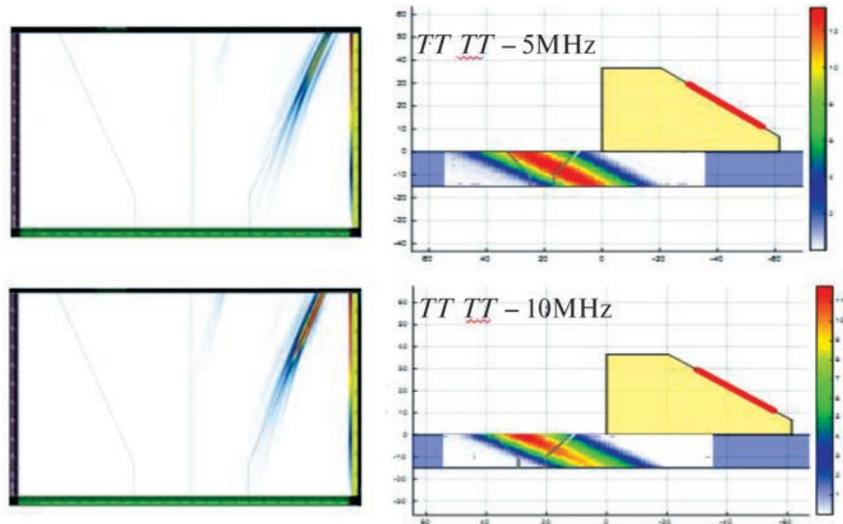


Рис. 14. Выявление несплавления при скосе кромок 30°: TFM-визуализация и AROI моделирование при центральной частоте преобразователя 5 и 10 МГц; используемые ФР-преобразователи: 5L64-A32 и 10I64-A32

ставлены преобразователи с различной центральной частотой, используемые для TFM-визуализации несплавления на боковой стенке при скосе кромок 30°. При одних и тех же параметрах оборудования данные моделирования и TFM-визуализация демонстрируют лучшую чувстви-

тельность при преобразователе на 10 МГц.

### Выводы

Параметры преобразователя и призмы, а также направления распространения УЗ-волны и типы волн, учитываемые алгоритмом TFM, могут оказывать суще-

ственное влияние на результаты контроля. Глубокие знания физики ультразвука, законов распространения, отражения, преломления и трансформации звуковой волны в сочетании с опытом дефектоскописта позволяют проводить эффективный контроль методом TFM.

Так как для некоторых областей применения, например контроля коррозии, выбор шага и центральной частоты преобразователя не критичен для получения корректных результатов, неправильный выбор направления распространения УЗ-волны и/или типа волны приведет к пропуску некоторых критических дефектов в сварных соединениях.

AROI позволяет предварительно оценить эффективность TFM при выбранной комбинации преобразователь/призма для определенного участка интереса

внутри объекта контроля. При контроле прямым лучом коррозии или в ходе инспекции отливков AROI покажет, обеспечивает ли выбранный преобразователь эффективное акустическое поле над исследуемым объемом.

При контроле сварных соединений AROI оценивает акустическую эффективность исходя из выбранного преобразователя и призмы, позволяя оператору оценить эффективность выбранной комбинации ПЭП/призма в пределах сварного соединения и зоны термического влияния (HAZ).

Моделирование различных ситуаций, подтвержденное реальными испытаниями, доказывает, что AROI может быть полезным инструментом не только для оценки эффективности TFM, но и для корректной реализации и применения технологии, т.е. выбора преобразователя и призмы,

их расположения, прогнозирования результатов, составления плана сканирования.

#### Библиографический список

1. Holmes C., Drinkwater B.W. and Wilcox P. D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation // NDT E Int. 2005. V. 38. No. 8. P. 701 – 711.
2. Sy K., Bredif P., Iakovleva E. et al. Development of methods for the analysis of multi-mode TFM images // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 1017. P. 012005.
3. Chi-Hang Kwan, Guillaume Painchaud-April, Benoit Lepage. TFM Acoustic Region of Influence // ASNT Spring Research Symposium. 2019. P. 122
4. Olympus, Phased Array Probe catalogue. URL: <https://www.olympus-ims.com/ru/probes/pa/>

Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И. и др.

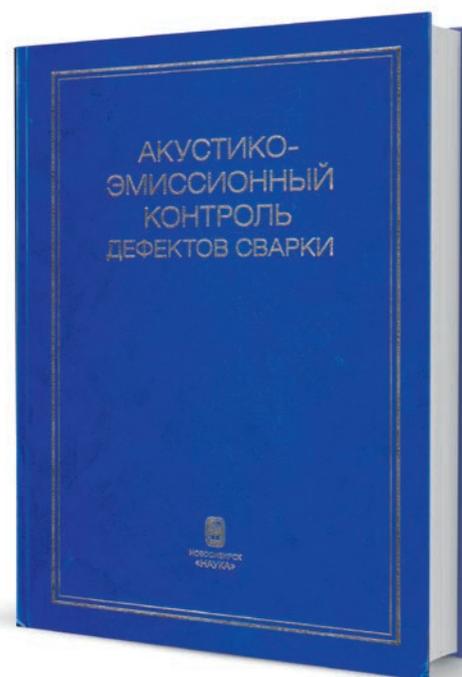
## АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ СВАРКИ

ISBN 978-5-02-038780-5

Формат - 70x100 1/16, 272 страницы, год издания - 2018.

В монографии обсуждаются особенности технологии контроля дефектов сварки методом акустической эмиссии. Анализируется работа пьезопреобразователей. Рассмотрены принципы построения многоканальных микропроцессорных акустико-эмиссионных систем. Приводятся разработанные методы определения координат дефектов в процессе сварки с использованием различных методов кластеризации, в том числе при сварке контуров сложной формы. Изучены особенности технологии акустико-эмиссионного контроля дефектов при ручной и автоматической сварке, лазерной сварке и сварке рельсов. Представлены методики браковки дефектов в процессе сварки методом акустической эмиссии.

Книга предназначена для специалистов и научных работников в области электроники и неразрушающего контроля машиностроительных конструкций, а также преподавателей, аспирантов и студентов вузов соответствующих специальностей.



1300 руб.