

КОГЕРЕНТНАЯ АДАПТИВНАЯ ФОКУСИРОВКА (CAF) ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОМПОЗИТОВ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ



БОРИСКОВ Юрий Васильевич

Ведущий инженер,
АО «ПЕРГАМ-ИНЖИНИРИНГ», Москва

В конструкциях новых моделей авиационной техники количество применяемых композитных материалов постоянно увеличивается из-за их малой массы, высокой прочности и коррозионной стойкости. В соответствии с основными требованиями к планеру — обеспечением высокой стойкости к полетным нагрузкам и снижением массы конструкции — композитные элементы планера часто имеют большие габариты. Наряду с плоскими поверхностями такие детали имеют зоны со сложной нелинейной геометрией, что обеспечивает жесткость конструкции в нужных местах и требуемые аэродинамические свойства. Необходимо обеспечивать контроль всех зон с криволинейной поверхностью, однако применения обычного метода фазированных решеток (ФР) [1] в таких случаях бывает недостаточно.

Чтобы соответствовать текущим тенденциям в самолетостроении, дефектоскопы на ФР [1] развиваются параллельно с потребностями авиационной промышленности. Реализация улучшенной стратегии контроля криволинейных поверхностей получила название *когерентная адаптивная фокусировка* (Coherent Adaptive Focusing CAF). Метод CAF упрощает контроль зон со сложной геометрией, переменных радиусных углов, загнутых и конических композитных конструкций, а также компенсирует смещение ФР-преобразователя во время сканирования.

Такие детали планера, как лонжероны, стрингеры, балочные перекрытия, обтекатели и др., имеют очень сложную геометрию с точки зрения пригодности для контроля ультразвуковыми методами. Изменяющаяся форма поверхности таких деталей не позволяет обеспечить хороший акустический контакт, который необходим для полноценного ультразвукового контроля. Ввиду анизотропных свойств контроль многослойных композитов проводят продольными ультразвуковыми волнами. Угол ввода луча должен быть строго перпендикулярен поверхности в каждой точке входа. Если условие перпендикулярности соблюдается, то общий фронт лучей от всех элементов ФР будет параллелен поверхности ввода. Это обеспечивает наилучшее качество данных контроля. Чтобы соблюсти перпендикулярность падения ультразвуковых лучей, сегодня

применяются различные механические сканеры или роботы, но использование таких сложных устройств не дает гарантии полного исключения пропуска данных во время контроля.

Большим преимуществом метода ФР является возможность настройки преобразователей под индивидуальные стратегии контроля [2, 3]. Ключевой принцип луча, создаваемого ФР-преобразователем, можно резюмировать следующим образом: группа элементов ФР возбуждается с помощью программируемых задержек передачи [1] импульсов. Это позволяет получить нужную апертуру, желаемые характеристики луча/волнового фронта (рис. 1). Угол наклона и глубина фокусирования ультразвукового луча могут регулироваться путем создания мультиплексором задержек передачи импульсов отдельными элементами ФР или группами элементов. Управление лучом

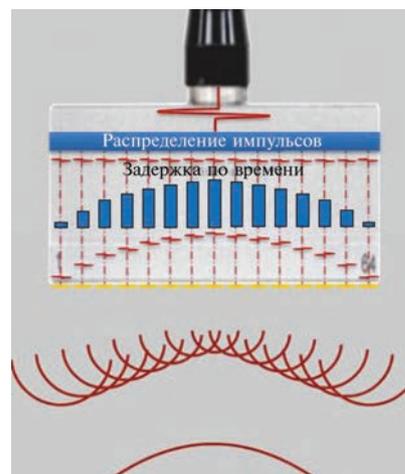


Рис. 1. Генерация формы фронта ультразвуковой волны

позволяет выполнять контроль под разными углами наклона и/или в разных точках глубины с помощью одного ФР-преобразователя без его перемещения [4].

Во время контроля методом ФР генерация лучей основана на фиксированной модели, рассчитанной по заранее введенным в прибор параметрам. Этот процесс генерации является предопределенным. Временные задержки передачи и приема импульсов рассчитываются исходя из известных параметров:

- геометрии объекта контроля;
- расстояния между ФР-преобразователем и поверхностью ввода;
- ориентации ФР-преобразователя и т.д.

Для большинства плоских или почти плоских объектов контроля достаточен подход, применяемый в стандартных дефектоскопах на ФР. Но когда объект контроля имеет большую кривизну или его форма отличается от номинальной из-за широкого диапазона принятых допусков, стратегия контроля с предопределенными законами задержек передачи и приема импульсов уже неэффективна. Чтобы преодолеть ограничения дефектоскопов на ФР для контроля многослойных композитов, в Olympus Scientific Solutions Americas разработали метод когерентной адаптивной фокусировки (CAF), который быстро завоевал популярность в авиационной промышленности. Метод CAF помогает решить следующие проблемы:

- адаптации формы ультразвукового фронта к поверхности ввода в режиме реального времени;
- упрощения контроля криволинейных зон с малым радиусом с переменными значениями;
- совместимости метода с линейными ФР и ФР вогнутой формы [1] существующих моделей;
- производительности и скорости контроля, эквивалентными

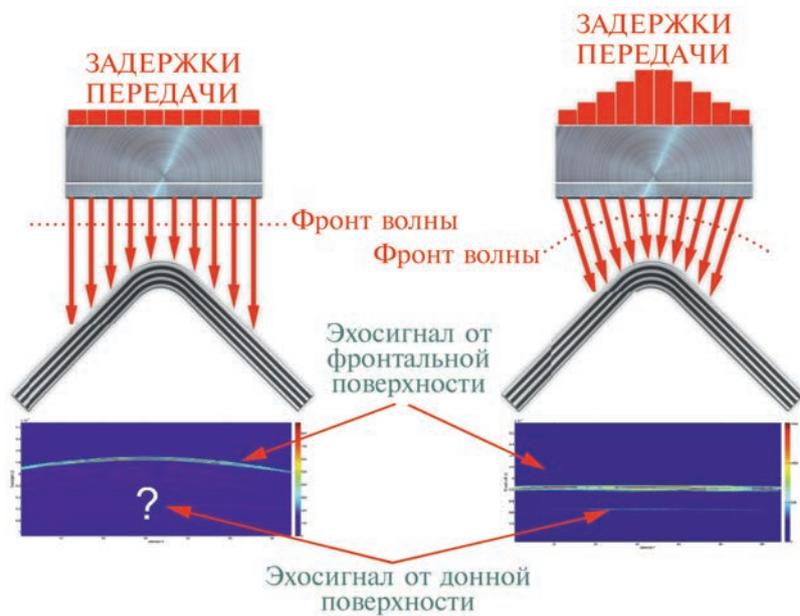


Рис. 2. Фронт волны с использованием предопределенных настроек (слева), ниже построенные данные контроля на основе этого подхода; фронт волны с применением алгоритма CAF (справа), ниже построенные данные контроля на основе алгоритма CAF

использованию метода ФР с предопределенными настройками;

- компенсации смещения ФР-преобразователя;
- получения данных контроля хорошего качества без пропусков.

Метод CAF позволяет генерировать ультразвуковые лучи таким образом, что общий волновой фронт принимает форму, параллельную поверхности, например конической. При этом не имеет значения, используется ли линейная ФР или ФР вогнутой формы. Принцип проиллюстрирован на рис. 2. Слева на этом рисунке в нижней части наблюдаются эхосигналы только от поверхности ввода, которые повторяют ее кривизну. Данные получены с использованием предопределенных настроек. Как видно из этого рисунка, донный сигнал не наблюдается, а это значит, что зона не пригодна для контроля. Для получения данных контроля на правом изображении рис. 2 был применен CAF. На изображении данных контроля видно, что задерж-

ки передачи и приема скорректированы таким образом, что эхосигналы от поверхности ввода и донной поверхности «выпрямились» и хорошо просматриваются. Это гарантирует возможность проведения контроля и выявление дефектов в этой зоне.

Существует несколько алгоритмов с адаптивной фокусировкой [1], некоторые из которых были представлены в статьях еще в 1995 г. [5], а затем получили развитие в 2011 г. [6] и 2013 г. [7]. Метод когерентной адаптивной фокусировки, описываемый в этой статье, использует другой алгоритм, который состоит из нескольких шагов [8].

Первый шаг – это установка ФР-преобразователя в зону контроля и одновременное излучение всеми доступными элементами ФР ультразвуковой волны без каких-либо задержек передачи (рис. 3, а). Таким образом, фиксируется точка отсчета во времени, когда сигнал был запущен. После этого выполняется запись элементарных эхосигналов от поверхности, приходящих на каж-

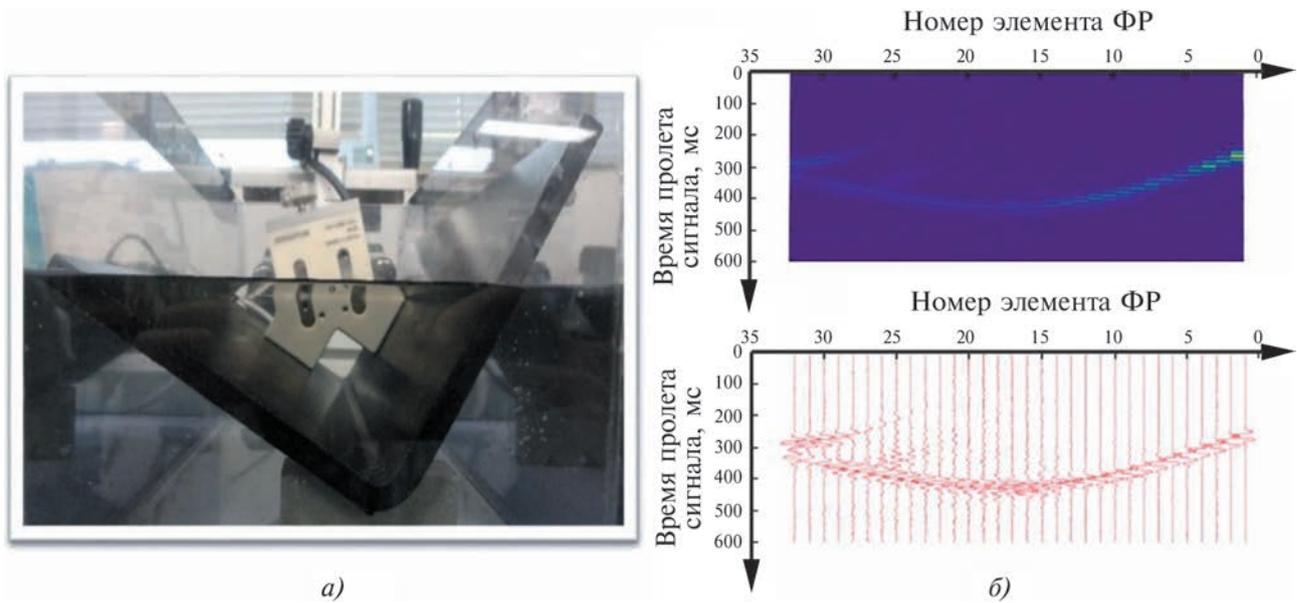


Рис. 3. Размещение преобразователя в зоне сложной геометрии (а) и элементарные эхосигналы, зафиксированные каждым элементом ФР (б)

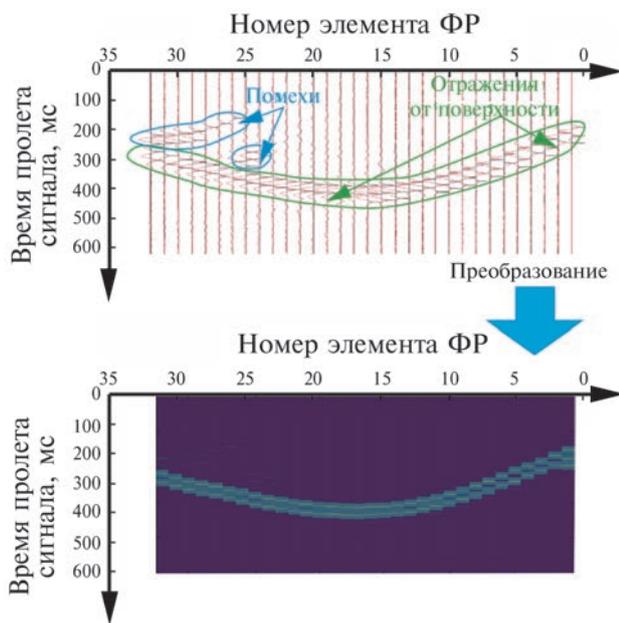


Рис. 4. Сопоставление и преобразование сигналов

дый элемент ФР. Фиксируется время, затраченное с момента излучения всеми элементами ФР до приема каждого эхосигнала каждым отдельным конкретным элементом ФР (рис. 3, б) [8].

Второй шаг – это сопоставление всех потенциальных точек поверхности, от которой получены эхосигналы. В зависимости от положения и геометрии ФР-преобразователя и объекта контроля иногда возможно наличие шумовых сигналов (рис. 4). При преобразовании данных

весь шум отсеивается, а полезный сигнал усиливается [8].

Во время шага 3 данный алгоритм выполняет расчет новых задержек передачи и приема для финального излучения импульсов (рис. 5) [8].

Четвертый шаг – выполнение сбора данных и их обработки с использованием рассчитанных новых законов передачи и приема. После обработки алгоритмом CAF на экран дефектоскопа выводится удобное для анализа изображение, как в представленном примере на рис. 6 [8].

Данный алгоритм повторяет все шаги с большой скоростью при проведении сканирования. Частота повторений обеспечивает постоянное обновление информации об изменении кривизны поверхности, что используется для корректировки задержек передачи приема в режиме реального времени.

Чтобы протестировать алгоритм CAF, был проведен эксперимент, в котором использовался углепластиковый образец с переменным радиусом от 5,1 до 12,7 мм. Искусственные дефекты выполнены в радиусной зоне и представляют собой имитации расслоений (рис. 7). Сканирование проводили иммерсионным методом с использованием следующих средств:

- ФР вогнутой формы 5CC25-32R4 (32 элемента, 5 МГц, $R_{ПЭП} = 25$ мм);
- призма иммерсионная SR4-IE90;
- дефектоскоп на ФР Focus PX;
- программное обеспечение Focus PC.

В ходе эксперимента радиусный угол контролировали с внутренней и наружной сторон [4].

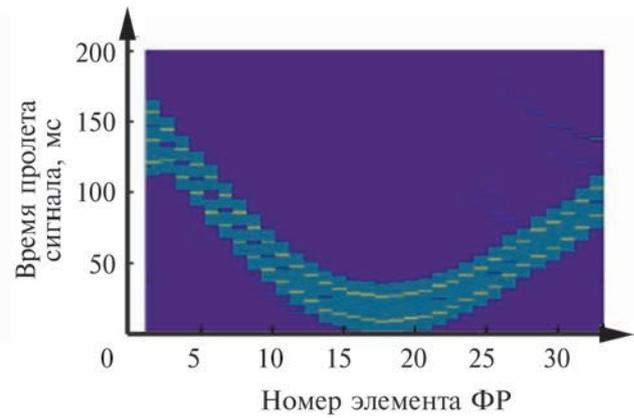
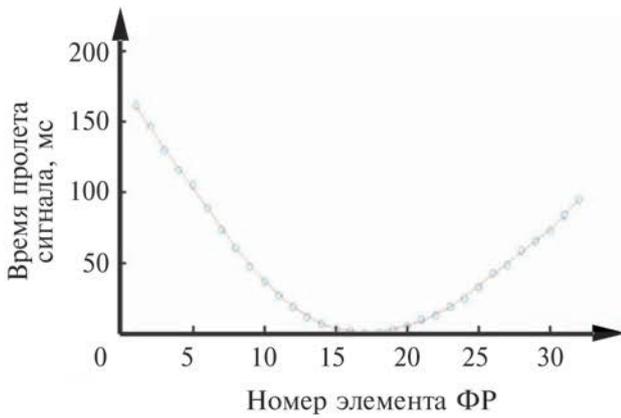


Рис. 5. Рассчитанная схема задержек для финального излучения импульсов

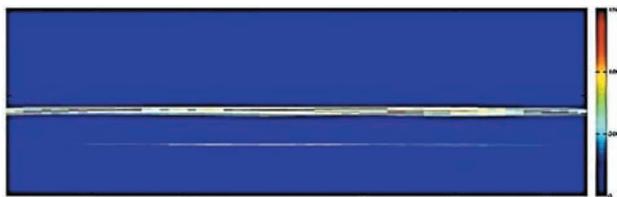


Рис. 6. Изображение сечения зоны со сложной геометрией, полученное с применением алгоритма CAF

Контроль внутреннего радиуса образца связан со следующими трудностями:

- ультразвуковая волна, параллельная поверхности ввода ультразвука при одном значении радиуса, не параллельна поверхности ввода при другом значении радиуса (рис. 8, а);
- возможны отклонения от concentричности или смещение ФР-преобразователя (рис. 8, б).

Приняв во внимание все трудности, образец был просканирован с использованием predeterminedных настроек и с применением алгоритма CAF. Полученные данные показаны на рис. 9.

Результат эксперимента показывает, что с применением алгоритма CAF при сканировании внутреннего радиуса экспериментального образца [8]:

- допускается отклонение от concentричности в пределах от +30,0 до -2,0 мм;
- допускается смещение преобразователя по горизонтали или вертикали ± 6 мм;
- область охвата преобразователем составляет 90° ;
- стабильно выявляются все заложенные искусственные дефекты;
- обеспечивается хорошее качество данных, пропуски отсутствуют (справа на рис. 9).

Контроль наружной поверхности радиуса образца также связан с трудностями из-за различных отклонений и смещений ориентации ФР-преобразователя. Было осуществлено сканирование наружной радиусной поверхности с использованием тех же ФР-преобразователя и призмы. Полученные данные показаны на рис. 10.

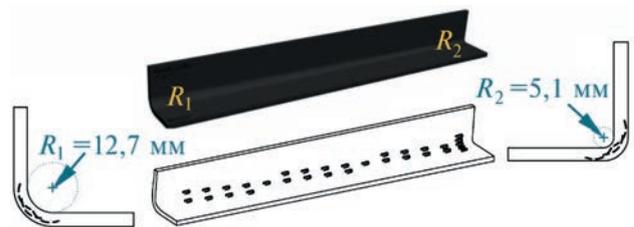


Рис. 7. Общий вид образца для проведения экспериментов: длина образца 500 мм, толщина стенки 6,3 мм; всего выполнено 30 искусственных дефектов, которые обозначены пунктирной линией. Размеры искусственных дефектов (9,3×3,2 мм)

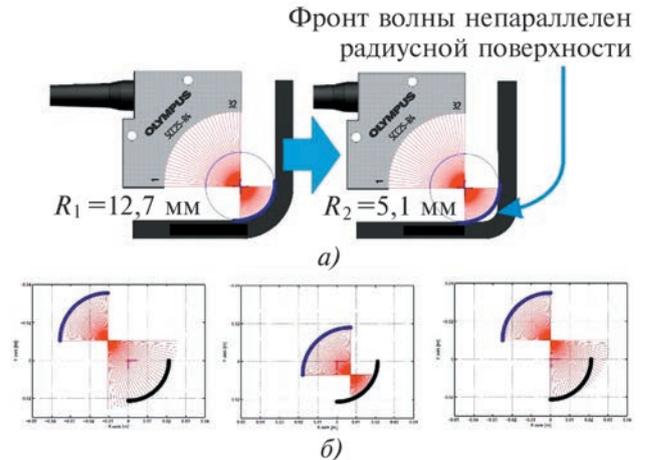


Рис. 8. Выполненная настройка с predeterminedными параметрами для зоны с радиусом 12,7 мм не подходит для зоны с радиусом 5,1 мм (а), возможные отклонения (б) от concentричности (левое и среднее изображения) и смещение ФР-преобразователя (правое изображение) в процессе контроля

Результат эксперимента показал, что с применением алгоритма CAF при сканировании наружного радиуса экспериментального образца [8]:

- допускается отклонение от concentричности в пределах от +9,5 до -10,0 мм (до момента касания поверхности);

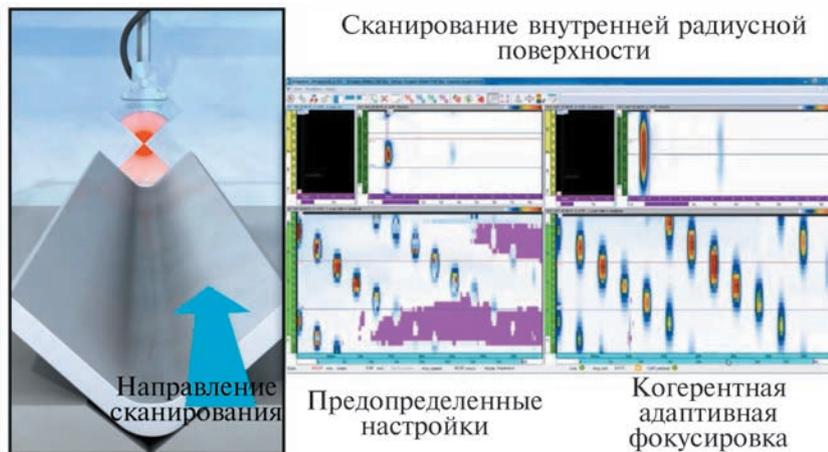


Рис. 9. Схема сканирования и результаты контроля внутренней радиусной поверхности. С-сканы построены по значениям амплитуд сигналов

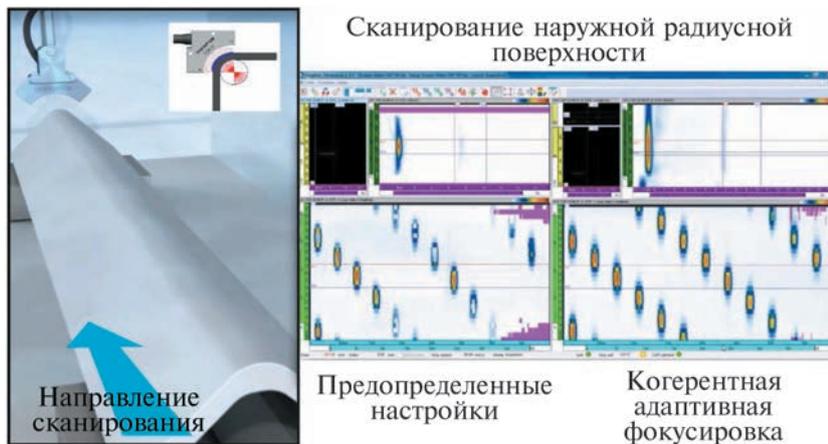


Рис. 10. Схема сканирования и результаты контроля наружной радиусной поверхности. С-сканы построены по значениям амплитуд сигналов

- допускается смещение преобразователя по горизонтали или вертикали ± 6 мм;
- область охвата преобразователем составляет 90° ;
- стабильно выявляются все заложенные искусственные дефекты;
- обеспечивается хорошее качество данных, пропуски отсутствуют (справа на рис. 10).

Алгоритм CAF испытывали и на других образцах. На рис. 11 показан пример данных после сканирования другого варианта угловой конструкции. На рис. 12 показан пример данных, после сканирования линейным ФР 3.5L64-NWI с наклоном 25° .

Можно ясно наблюдать, что в случае использования метода ФР с применением алгоритма CAF результаты обнаружения искусственных дефектов на экспериментальных образцах значительно улучшаются [8, 10]. Контроль с когерентной адаптивной фокусировкой не снижает скорость сканирования, так как алгоритм использует сопоставление А-сканов каждого элемента ФР, генерируя сумму сигналов. Получаемый результат строится на основе этой суммы сигналов, а стандартный алгоритм обработки данных не используется [9].

Когерентная адаптивная фокусировка предоставляет от-

расли следующие преимущества:

- возможность быстрой компенсации переменной геометрии в процессе проведения контроля;
- отсутствие необходимости разработки сложных механических устройств для осуществления контроля;
- улучшенные способности измерения дефектов;
- снижение количества непригодных для контроля зон на деталях;
- упрощение процесса калибровки;
- повышение достоверности данных контроля.

В целом многочисленные успешные испытания алгоритма CAF на практике доказали его высокую эффективность для ультразвукового контроля композитных деталей со сложной геометрией.

Библиографический список

1. Проект ГОСТ Р «Контроль неразрушающий. Термины, используемые в ультразвуковом контроле с фазированными решетками (DIN EN 16018:2012)». пп. 3.1.1–4.1.8. М., 2015.
2. Mahaut S., Chatillon S., Kerbrat E., et al. New Features for Phased Array Techniques Inspections: Simulation and Experiments // Proc. of the World Congress of Nondestructive Testing, Montreal, Canada, 30 Aug. – 3 Sept. 2004. Montreal, 2004.
3. Mahaut S., Chatillon S., Raillon-Picot R., Calmon P. Simulation and Application of Dynamic Inspection Modes Using Ultrasonic Phased Arrays // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 2004. V. 23. AIP Conference Proceedings / ed. by D. O. Thompson and D. E. Chimenti; American Institute of Physics. Melville, NY, 2004.

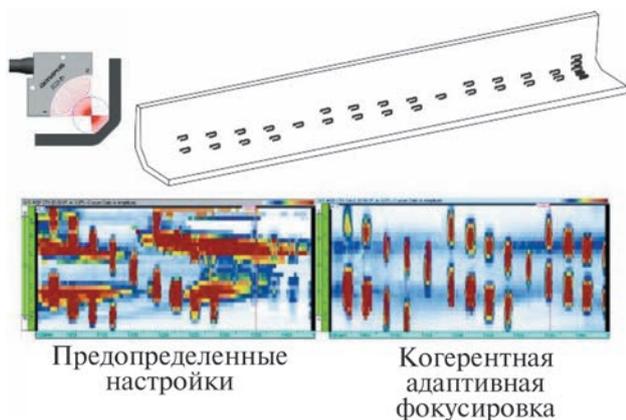


Рис. 11. Данные после сканирования другого радиусного угла

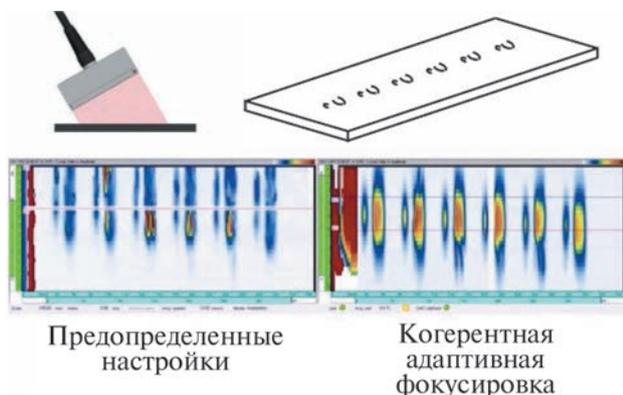


Рис. 12. Данные после сканирования ФР-преобразователем 3.5L64-NWI с наклоном 25°

4. **Промышленный контроль** методом фазированных решеток. Теоретические основы / Olympus Scientific Solutions Americas. Квебек, 2015. С. 32–33.
5. **Beardsley B., Peterson M., Achenbach J.D.** A Simple Scheme for Self-Focusing of an Array // Journal of Nondestructive Evaluation. 1995. V. 14. No. 4. P. 169.
6. **Hopkins D., Neau G., Le Ber L.** Advanced phased-array technologies for ultrasonic inspection of complex composite parts // NDT in Canada. 2011. Conf. Proc. Montreal–Quebec, 2011.
7. **Hopkins D.L., Brassard M., Neau G.A. et al.** Surface-Adaptive Ultrasound (SAUL) for phased-array inspection of composite specimens with curved edges and complex geometry // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 2013. V. 32 / ed. by D.O. Thompson and D.E. Chimenti; American Institute of Physics Conference Proceedings, 2013.
8. **Lamarre A., Grondin E.** Coherent Adaptive Focusing Technology for the Inspection of Variable Geometry. Composite Material // 10th International Symposium on NDT in Aerospace 2018, Dresden, Germany. Dresden, 2018.
9. **Grondin E.** Adaptive Focusing Technology for the Inspection of Variable Geometry Composite Material / Olympus Scientific Solutions Americas. Quebec, 2018.
10. **Grondin E.** Adaptive Ultrasound Technology for the Inspection of Variable Geometry Composite Material / Olympus NDT. Quebec, 2018.

Ответы на кроссворд, опубликованный в № 3 (июль – сентябрь), 2019

По горизонтали: 3. Подрез. 4. Пакет. 7. Вид. 12. Метод. 14. Имитатор. 15. Карта. 16. Отбел. 17. Кюри. 19. Фаза. 20. Ширина. 22. Щуп. 23. Аттестация. 26. Узел. 28. Набор. 29. Корпус. 32. Пучность. 33. Цепочка. 34. Генератор.

По вертикали: 1. Средство. 2. Спектр. 5. Таймограмма. 6. Цвет. 8. Томография. 9. Строб. 10. Краска. 11. Стрела. 13. Декада. 15. Коллиматор. 18. Раствор. 21. Импульс. 24. Смещение. 25. Ярмо. 27. Частота. 30. Объем. 31. Пучок.

Ответы на кроссворд, опубликованный в № 4 (октябрь – декабрь), 2019

По горизонтали: 3. Индикация. 9. Пора. 10. Трещина. 11. Луч. 12. Ярмо. 14. Ось. 16. Средство. 17. Тень. 19. Строб. 20. Центр. 21. Масса. 22. Кратер. 25. Рыхла. 26. Цикл. 27. Колебание. 29. Кабель. 31. Экран. 32. Отбел. 33. Авария.

По вертикали: 1. Наплыв. 2. Соленоид. 3. Инцидент. 4. Дрейф. 5. Коллиматор. 6. Имитатор. 7. Зазор. 8. Фаза. 10. Толщиномер. 13. Вогнутость. 15. Экспозиция. 16. Структроскоп. 18. Мода. 23. Рэлей. 24. Раковина. 26. Цепочка. 28. Локация. 30. Лэмб.