

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ PLANE WAVE IMAGING В УЛЬТРАЗВУКОВОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

© 2021 г. Е.Г. Базулин^{1,*}, И.В. Евсеев²

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»,
Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино»

²Московский Энергетический Институт (НИИ),
Россия 111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

*E-mail: bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 30.11.2020; после доработки 22.03.2021

Принять к публикации 09.04.2021

Восстановление изображения отражателей методом цифровой фокусировка антенной (ЦФА) наряду с такими достоинствами, как высокая разрешающая способность на всей области восстановления изображения отражателей, возможностью получать изображения с учетом отражения и трансформации типа волны от границ объекта контроля, имеет несколько недостатков: большой объем измеренных эхосигналов, большое время восстановления изображения и недостаточно высокая энергия ультразвуковых волн, вводимых в объект контроля. Метод Plane Wave Imaging (PWI) позволяет совместить преимущества технологии фазированных антенных решеток (ФАР) и ЦФА-технологии. В режиме PWI при излучении плоской волны работают все элементы антенной решетки (АР) (как в ФАР-режиме), что позволяет увеличить вводимую в объект контроля энергию, а регистрируются эхосигналы всеми элементами АР (как в режиме ЦФА). Изображения отражателей восстанавливаются методом комбинационного SAFT. Для получения изображения можно использовать число излученных плоских волн меньше количества элементов антенной решетки, что уменьшает объем измеренных эхосигналов. Перевод расчетов в область пространственных секторов позволяет повысить скорость восстановления изображения отражателей. Модельные эксперименты показали положительные и отрицательные стороны получения изображений отражателей методом PWI по сравнению с методом ЦФА как для случая использования призмы, так и без призмы.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, двойное сканирование, тройное сканирование, цифровая фокусировка антенной, Plane Wave Imaging.

DOI:

1. ВВЕДЕНИЕ

Получение информации о внутренней структуре промышленных объектов является актуальной проблемой и относится к классу обратных задач рассеяния, которая состоит в определении количественных характеристик несплошностей на основе наблюдения за рассеянным облучающим полем. Для неразрушающего контроля важнейшей задачей является классификация обнаруженных отражателей, определение их размеров и координат залегания. Полученная информация может быть использована специалистами по прочностным расчетам для оценки эксплуатационного ресурса объекта контроля.

В настоящее время широко используется технология ультразвукового контроля (УЗК) с применением пьезоэлектрических антенных решеток (АР), излучающих и принимающих волны в исследуемом объекте. Широкое применение в практике УЗК нашли две технологии восстановления изображения отражателей с использованием АР: фазированные антенные решетки (ФАР) [1] и цифровая фокусировка антенной решетки (ЦФА) [2]. В работе [3] обе технологии сравниваются, и делается вывод о том, что ЦФА-технология более перспективна в плане применения разнообразных алгоритмов восстановления изображения отражателей.

Метод ЦФА позволяет восстановить изображения отражателей со сплошной фокусировкой во всех точках области восстановления изображения (ОВИ). На первом этапе регистрируются эхосигналы для всех комбинаций излучатель—приемник элементов АР. Такой режим называется режим двойного сканирования (в зарубежной литературе Full Matrix Capture (FMC) [4]). Набор эхосигналов при излучении одним элементом АР называется выстрел, а набор эхосигналов по всем выстрелам будем называть залп. На втором этапе по измеренным эхосигналам методом комбинационного SAFT (C-SAFT) [5] восстанавливается изображение отражателей. Однако метод ЦФА имеет недостатки, а первый заключается в том, что регистрируется большой объем эхосигналов, который растет квадратично количеству ее элементов N_e . Для линейной 32-х элементной АР количество измеренных эхосигналов (залп) равно $N_e^2 = 1024$, а для

64-х элементной уже 4096. Вторым недостатком ЦФА — это небольшая акустическая энергия, которая вводится в объект контроля каждым элементом АР без фокусировки. Третий недостаток — большое время обработки восстановления изображения по эхосигналам методом C-SAFT во временной области. Отметим еще одно обстоятельство — для повышения скорости сканирования при автоматизированном контроле очень важным параметром является скорость регистрации эхосигналов, так как восстановить изображение отражателей можно на этапе подготовке оператором протокола контроля. Предположим, что цикл измерения эхосигналов в режиме FMC равен 600 мкс. Если нужно проводить измерения эхосигналов с шагом 2 мм, то скорость сканирования будет достаточно высокой — около 50 мм/мкс. Но есть еще одна проблема — при непрерывном, а не шаговом, движении антенной решетки целесообразно проводить регистрацию всех выстрелов в «точке», то есть на ~~пространственном~~ интервале, меньшем хотя бы четверти длины волны. Если перемещать антенную решетку со скоростью 50 мм/мкс, то при упомянутом времени одного такта измерение эхосигналов залпа «размажется» примерно на 1 мм, что соизмеримо с длиной продольной волны. Для измерения в «точке» скорость сканирования придется уменьшить в 4 раза, снизив ее до 13 мм/с. Это невысокая скорость проведения контроля. Решить задачу учета измерений выстрелов не в одной точке можно и на этапе восстановления изображения, усложнив алгоритм расчета задержек, рассчитывая их для каждого положения решетки при измерении эхосигналов выстрела. Поэтому задача уменьшения время регистрации эхосигналов и повышение скорости восстановления качественного изображения отражателей является актуальной проблемой.

В статье [6] приведен краткий обзор методов повышения скорости регистрации эхосигналов с помощью АР, поэтому сразу перейдем к рассмотрению режима Plane Wave Imaging (PWI) [7—9], который был разработан для регистрации эхосигналов АР с большим количеством элементов. В объект контроля (ОК) (как и в ФАР-технологии) всеми элементами АР излучаются плоская волна с заданным углом, а регистрация эхосигналов происходит (как в режиме FMC) всеми элементами АР. По эхосигналам измеренного выстрела восстанавливается изображение отражателей. Для повышения качества изображения в ОК последовательно излучается несколько плоских волн N_{pw} , и все парциальные изображения суммируются. Режим PWI обладает рядом достоинств. Так как для регистрации можно использовать порядка 10 плоских волн ($N_{pw} = 10$), то скорость регистрации эхосигналов повышается тем больше, в сравнении с режимом FMC, чем больше число элементов в АР. Для режима FMC для $N_e = 64$ число измеренных эхосигналов равно $N_e^2 = 4096$, а для режима PWI — $N_e N_{pw} = 640$, и скорость их регистрации возрастет в 6,4 раза. Для АР из 128 элементов выигрыш будет еще больше. Так как плоская волна формируется всеми элементами АР, то акустическая энергия, передаваемая в среду, будет больше чем для режима FMC. Поэтому режим PWI более помехозащищен при работе с ОК с большим поглощением.

Для восстановления изображения отражателей по эхосигналам, измеренным как в режиме FMC, так и в режиме PWI, расчеты из временной области можно перенести в область пространственных частот [9, 10]. Так как в этом случае основной операцией становится преобразование Фурье, которое можно выполнить по технологии быстрого преобразования Фурье, то скорость восстановления изображения может быть значительно повышена.

2. МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ЭХОСИГНАЛОВ

2.1. Режим FMC

Для простоты будем рассматривать задачу в двумерном случае. Для описания геометрии задачи введем систему координат (x, z) , в которой будут проводиться расчеты, и систему координат (x_r, z_r) , связанную с АР и линией, по которой она может сканировать. Система координат (x_r, z_r) удалена от центра (x, z) на расстояние R и может быть еще повернута на произвольный угол α . Мы ограничимся случаем $\alpha = 0$. Отражатели могут находиться в области $\mathbf{r} \in S$ (рис. 1). АР на рис. 1 схематически показана с протектором. Отметим, что она может быть смещена по оси x_r . Излучающей элемент АР описывается вектором \mathbf{r}_i , а принимающий элемент — \mathbf{r}_r . В режиме FMC первый элемент АР в точке $\mathbf{r}_{i,1}$ излучает зондирующий сигнал (показан полуокружностями красного цвета), а все элементы антенной решетки принимают эхосигналы (полуокружностями зеленого цвета). Набор измеренных эхосигналов называется первым выстрелом. Эта процедура повторяется для всех элементов АР. Облучение отражателей, отмеченных на рис. 1 звездами разных цветов, в целом равноправно, так как на них падает «цилиндрическая» волна, что учитывается в алгоритме восстановления.

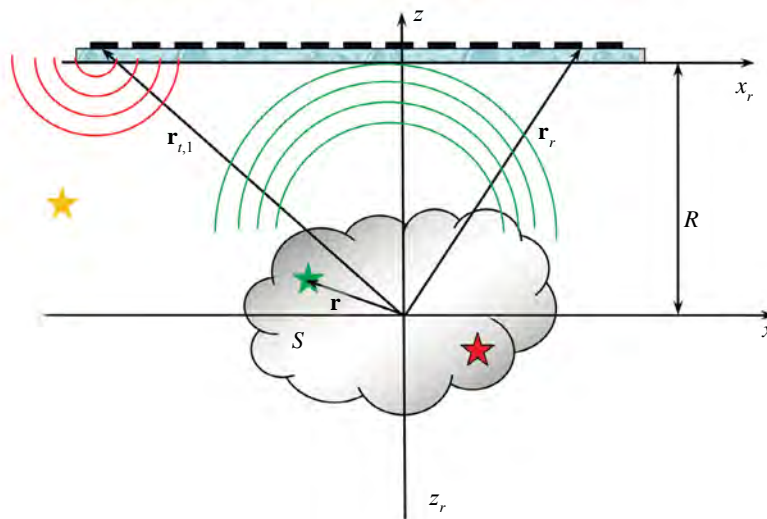


Рис. 1. Описание режима FMC без призмы.

Как упоминалось ранее, измеренные N_e^2 эхосигналов могут иметь очень большой объем (больше 5 Мбайт). Их передача между модулями ЦФА-дефектоскопа может потребовать значительного времени, что уменьшит скорость сканирования АР и, следовательно, скорость проведения контроля. А низкая скорость контроля может нести угрозу для оператора при контроле оборудования атомных электростанций, где время нахождения в условиях повышенной радиации должно быть минимизировано. Высокая скорость регистрации эхосигналов очень важна и в медицинской диагностике, в которой используются АР с числом элементов 128 и более. Желательно провести измерения эхосигналов пока внутренние органы не изменили своего положения в силу естественных процессов, происходящих в живом организме.

2.2. Режим PWI

Описание геометрии измерений в режиме PWI совпадает с описанной в разделе 2.1. В объект контроля (ОК) (как и в ФАР-технологии) всеми элементами АР излучается плоская волна с волновым вектором \mathbf{k}_p , которая на рис. 2 показана прямыми линиями красного цвета [4, 8, 9]. Регистрация эхосигналов (схематически показаны полуокружностями зеленого цвета) первого выстрела происходит (как в режиме FMC) всеми элементами АР. Для повышения качества изображения в ОК

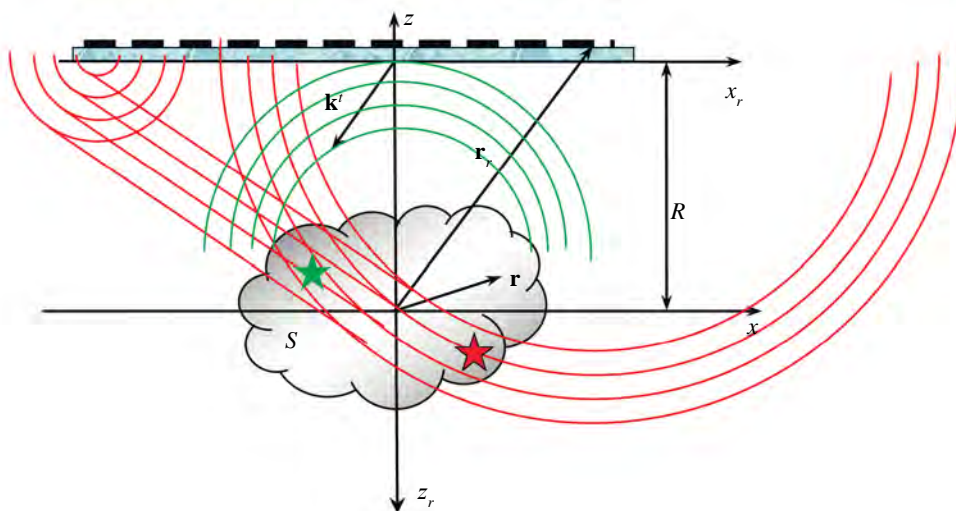


Рис. 2. Описание режима PWI без призмы.

последовательно излучаются несколько плоских волн N_{pw} , то есть регистрируются N_{pw} выстрелов. Так как плоская волна формируется в ограниченном объеме пространства и происходит обязательное излучение краевых волн, то у режима PWI есть свои ограничения. Рассмотрим отражатели, расположенные, как описано в разделе 2.1, в удаленных местах области S . Для данного угла ввода только отражатель, отмеченный звездой зеленого цвета, будет освещен плоской волной, а отражатель, отмеченный звездой красного цвета с границей черного цвета, будет освещен «цилиндрической» краевой волной. Поэтому, в отличие от режима FMC, изображение этих двух отражателей будет формироваться по-разному — отражатель справа будет восстановлен расфокусированным и смещенным от своего истинного положения. По этой причине для режима PWI очень важным является выбор ОВИ, в которой могут находиться отражатели, и набора углов плоских волн, который не обязательно должен быть эквидистантным.

В заключении это раздела можно сделать вывод, что работа в режиме PWI объединяет в себе лучшие стороны ФАР- и ЦФА-технологии. Излучение происходит всеми элементами АР (как в ФАР-режиме), что обеспечивает ввод в объект контроля большой энергии. По зарегистрированным эхосигналам изображение отражателей восстанавливается методом C-SAFT, что позволяет получать изображение с высоким разрешением в пределах всей ОВИ и без смещения бликов от их истинных положений [3].

3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

3.1. Во временной области (корреляционный и DAS)

По измеренным эхосигналам $p(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t)$ изображение отражателей во временной области можно восстановить методом C-SAFT [11]:

$$\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i; as) = \int_{S_i} \int_{S_r} p(\mathbf{r}_r, t - t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_i; as) + t_{max}) d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_i, \quad (1)$$

где $t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_i; as)$ — время пробега импульса от излучателя до точки \mathbf{r}_i и к приемнику для заданной акустической схемы as ; t_{max} — время нарастания импульса; S_i и S_r — области излучения и приема. 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. Обычно эхосигналы $p(\mathbf{r}_r, t)$ из действительного формата с помощью преобразования Гильберта переводят в комплексный формат. В зарубежной литературе используются термины Delay And Sum (DAS) [12] или Total Focusing Method (TFM) [4].

Для расчета времени пробега импульса по лучевой траектории можно воспользоваться вариационным принципом Ферма [13] или методом трассировки [14]. Оба этих метода имеют свои достоинства и недостатки. Отметим только, что расчет траекторий по принципу Ферма для случая неровных границ ОК может привести к наличию нескольких максимумов целевой функции в виде времени распространения импульса вдоль луча, то есть к нескольким траекториям, по которым может распространяться импульс. А это, в свою очередь, сильно усложнит и замедлит программную реализацию расчета времени задержки на основе принцип Ферма.

Если АР перемещается N_w раз по поверхности объекта контроля, регистрируя эхосигналы в режиме двойного сканирования в каждой точке, то такой режим назовем режимом тройного сканирования. Когерентная сумма парциальных изображений, восстановленных для каждого положения АР согласно (1), позволит получить объединенное (итоговое) изображение отражателей с более высокой фронтальной разрешающей способностью, например, за счет когерентного сложения по формуле:

$$I(\mathbf{r}_i; as) = \left| \sum_{w=1}^{N_w} \hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_w; as) \right|, \quad (2)$$

где \mathbf{r}_w — вектор, определяющий положение АР на поверхности объекта контроля.

Расчет по формуле (1), даже в случае, если задержки $t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_i; as)$ уже рассчитаны, требует большого количества операций. Однако эти расчеты хорошо распараллеливаются и для их ускоре-

ния можно воспользоваться технологией NVIDIA CUDA™ [15] или перевести расчеты на аппаратный уровень с помощью технологии ПЛИС [16].

Расчет задержек для режима FMC и PWI для однородных изотропных сред с установкой AP на призму достаточно простая задача и рассмотрена во множестве работ [9, 17] как для случая применения принципа Ферма, так и для случая использования принципа трассировки.

3.2. В частотной области

Для случая изотропной среды, в которой звук распространяется со скоростью c , в гармоническом варианте при работе на частоте f облучающее поле $p_i(\mathbf{r}-\mathbf{r}_i, f)$, рассеянное $p(\mathbf{r}_r, f)$ поле и коэффициент рассеяния $\varepsilon(\mathbf{r})$ связаны уравнением Липмана—Швингера [18, 19], которое в приближении Борна $p(\mathbf{r}, f) \ll p_i(\mathbf{r}, f)$ имеет вид:

$$p(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, f) = \int_S G(\mathbf{r}-\mathbf{r}_r, f) \varepsilon(\mathbf{r}) p_i(\mathbf{r}-\mathbf{r}_i, f) d\mathbf{r}. \quad (3)$$

Так как двумерный спектр функции Грина отличен от нуля на окружности радиусом $k = \sqrt{k_x^2 + k_z^2}$ (окружность показана пунктирной линией на рис. 3) [18], где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, $\lambda = c/f$ — длина волны, то интегральное уравнение можно решить, переведя расчеты в спектральную плоскость (k_x, k_z) . Понятно, что от гармонического варианта расчета можно перейти к импульсному и обратно с помощью преобразования Фурье.

Так как при расчетах в спектральном пространстве широко используется преобразования Фурье, выполняемое по технологии быстрого преобразования Фурье, то эти методы могут существенно превосходить в скорости метод обработки во временной области (раздел 3.1).

3.2.1. Режим PWI

На рис. 3 спектр неизвестной функции $\varepsilon(\mathbf{r})$ обозначен как $\varepsilon(\mathbf{k})$, где \mathfrak{F}_{xz} — двумерное прямое преобразование Фурье. Если в формуле для случая изотропной среды будем считать, что $p_i(\mathbf{r}-\mathbf{r}_i, f) = 1$ (случай пассивной локации), то получается формула двумерной свертки, которая, с учетом свойств спектра функции Грина $G(\mathbf{r}-\mathbf{r}_r, f)$, позволяет найти значение спектра функции $\varepsilon(\mathbf{r})$ на окружности радиуса k по спектру измеренного поля $p(\mathbf{r}_r, \mathbf{k}_r, f)$. Учитывая, что падающее поле имеет вид плоской волны с волновым вектором \mathbf{k}_i :

$$p_i(\mathbf{r}-\mathbf{r}_i, f) = e^{-i\mathbf{k}_i \cdot (\mathbf{r}-\mathbf{r}_i)}, \quad (4)$$

согласно теореме смещения для преобразования Фурье, область спектра в виде окружности (показана на рис. 3 сплошной линией) сдвинется в спектральном пространстве на \mathbf{k}_i . Учитывая, что

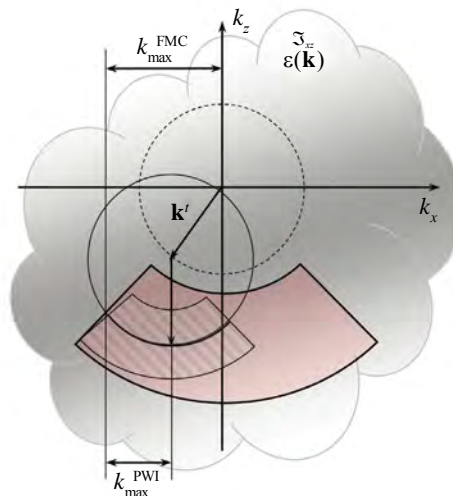


Рис. 3. Обработка в частотной области экосигналов, измеренных в режиме PWI и FMC.

регистрация эхосигналов проводится по одной стороне объекта контроля, элемент АР обладает диаграммой направленности и размеры АР ограничены, удастся получить информацию только о функции $\varepsilon(\mathbf{k})$ на части окружности, показанной на рис. 3 сплошной толстой линией. Используя $p(\mathbf{r}_r, \mathbf{k}_r, f)$ в диапазоне частот Δf , определяемым в первую очередь свойствами АР, можно восстановить спектр неизвестной функции $\varepsilon(\mathbf{r})$ в пределах сектора (заштрихованная область на рис. 3).

И, наконец, если использовать несколько плоских волн с разными углами наклона, то, используя метод ПСП, можно получить информацию о $\varepsilon(\mathbf{k})$ в области, схематически показанной на рис. 3 частью кольца красного цвета, с границей, показанной утолщенной линией. Применив к восстановленному спектру операцию обратного двумерного преобразования Фурье \mathfrak{F}_{xz}^{-1} , можно получить оценку $\hat{\varepsilon}(\mathbf{r})$ искомой функции $\varepsilon(\mathbf{r})$. Понятно, что чем больше область, в которой удастся восстановить информацию о $\varepsilon(\mathbf{k})$, тем точнее оценка изображения отражателя. Для этого нужно пользоваться АР очень больших размеров, элементы которой излучают δ -подобные импульсы и имеют равномерную диаграмму направленности. Но и в этом случае удастся восстановить только спектр $\varepsilon(\mathbf{r})$ только в нижнем полупространстве (k_x, k_z) .

3.2.2. Режим FMC

Если в формулу (3) подставить падающее поле в виде:

$$p_i(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i, f) = G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i, f), \quad (5)$$

то выполнив двумерное преобразование Фурье \mathfrak{F}_{xz}^{-1} по координатам \mathbf{r}_r и \mathbf{r}_i , можно свести задачу к задаче, решенной в разделе 3.2.1:

$$p(\mathbf{k}_r, \mathbf{k}_i, f) = \mathfrak{F}_{xz}^{-1}(p(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, f)). \quad (6)$$

Из формулы видно, что мы получили информацию об амплитуде зарегистрированных плоских волн с волновым вектором \mathbf{k}_i для набора падающих плоских волн \mathbf{k}_r . То есть в режиме РWИ мы излучаем плоскую волну под выбранным углом, а в режиме FMC с помощью формулы (6) мы получаем подобный набор, но при излучении каждым элементом АР цилиндрической волны.

Поэтому область спектра $\varepsilon(\mathbf{k})$, о котором мы получим информацию, будет примерно совпадать с аналогичной областью при выборе нужного диапазона углов в режиме РWИ. Для случая малого уровня шума, восстановленные изображения отражателей будут близки для регистрации эхосигналов в режиме РWИ и режиме FMC.

3.2.3. Проблема интерполяции

Так как спектр измеренной голограммы определяется на части окружности (см. рис. 3), то для выполнения быстрого двумерного обратного преобразования Фурье нужно рассчитывать спектр в узлах прямоугольной сетки. Интерполяция по ближайшему соседу может приводить к появлению в изображении отражателя ложных бликов большой амплитуды. В статье [20] предложено использовать интерполяцию по четырехточечному шаблону, что более чем на 12 дБ уменьшает уровень интерполяционного шума.

Отметим важный момент! Так как для режима FMC информация по набору падающих плоских волн получается в результате двумерного преобразования Фурье согласно (6), то при грубом шаге между элементами АР (больше чем половина длины волны в ОК) из-за эффекта перекрытия спектров шум интерполяции может иметь высокий уровень. В режиме РWИ плоская волна под заданным направлением формируется реально, поэтому максимальная пространственная частота спектра $k_{\max}^{\text{PWИ}}$ будет меньше, чем k_{\max}^{FMC} , что приведет к уменьшению уровня шума интерполяции из-за уменьшения эффекта перекрытия спектров.

4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для регистрации эхосигналов использовался ЦФА-дефектоскоп «АВГУР АРТ», разработанный и изготавливаемый «Научно-производственным центром неразрушающего контроля «ЭХО+» [21].

4.1. Образец Т-Б-39-60-Пл №19200

Образец представляет из себя плексигласовый параллелепипед толщиной 60 мм, в котором сделано шесть боковых цилиндрических отверстий (БЦО) диаметром 1,5 мм, как показано на рис. 4. Для регистрации эхосигналов использовалась АР (5 МГц, 64 элемента, размер пьезоэлемента 0,55×10 мм, зазор между пьезоэлементами 0,05 мм). Эхосигналы, для уменьшения уровня белого шума, измерялись 25 раз для дальнейшего усреднения.

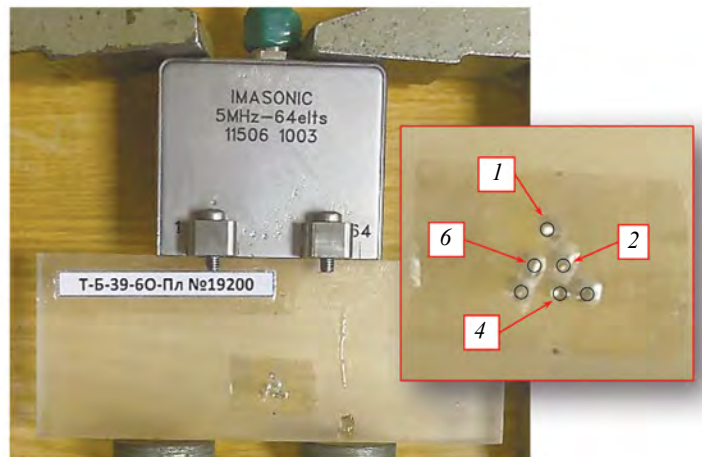


Рис. 4. Фотография образца и используемой АР.

4.1.1. Восстановление изображения во временной области

4.1.1.1. Режим FMC

Коэффициент усиления был равен 45 дБ. На рис. 5а показано ЦФА-изображение, восстановленное по эхосигналам без усреднений. На изображение линиями черного цвета наброшена маска шести БЦО. Блики пяти БЦО уверенно обнаруживаются. Блик 4-го отверстия еле различим, так как он затенен другими БЦО. На изображении, из-за высокого затухания звука в плексигласе, заметен белый шум амплитудой около -20 дБ. Перерассеивание импульсов между БЦО приводит к появлению ложных бликов, с амплитудой порядка -14 дБ. Восстановление ЦФА-изображение по усредненным эхосигналам позволило уменьшить уровень белого шума изображения более, чем на 12 дБ (рис. 5б).

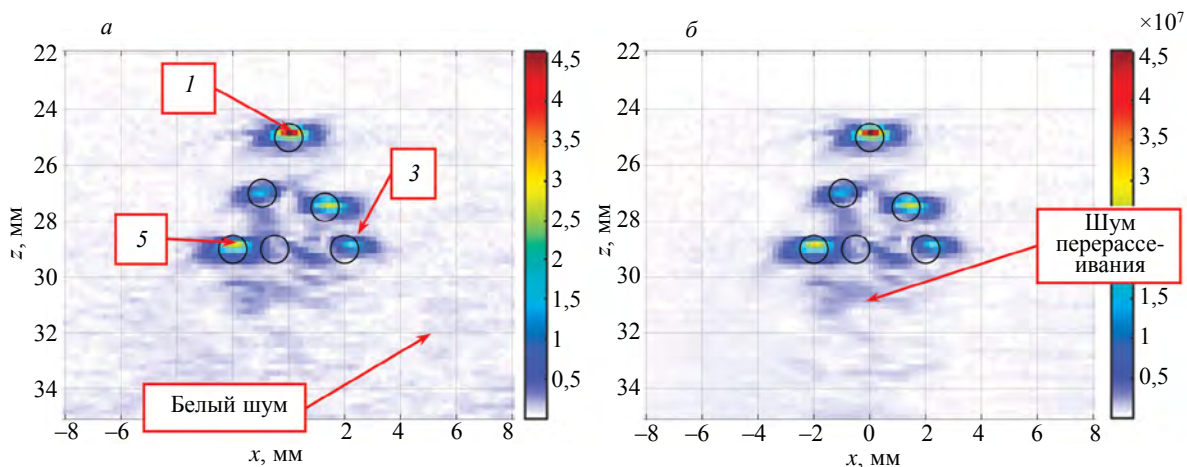


Рис. 5. ЦФА-изображение:
а — без усреднений эхосигналов; б — с усреднением 25 эхосигналов.

4.1.1.2. Режим PWI

Так как режим PWI позволяет вводить больше энергии в объект контроля, то PWI-C-SAFT-изображение, полученное по эхосигналам без усреднений (рис. 6а), практически не отличаются от ЦФА-изображения, полученного с усреднением 25 залпов эхосигналов (см. рис. 5б). Коэффициент усиления был уменьшен до 30 дБ. Это привело к тому, что изображение, восстановленное по 25 усредненным залпам (см. рис. 6а), неотличимо от изображения без усреднения эхосигналов. Для измерения эхосигналов использовалась 21 плоская волна с углами от -20 до 20 град с шагом в 2 град. Учитывая, что в режиме PWI использовалась 21 плоская волна для измерения одного залпа вместо измерения 25 залпов из 64 выстрелов в режиме FMC, то суммарный выигрыш в скорости регистрации эхосигналов для восстановления практически одинаковых изображений (рис. 5б и рис. 6а) достигает значения 76!

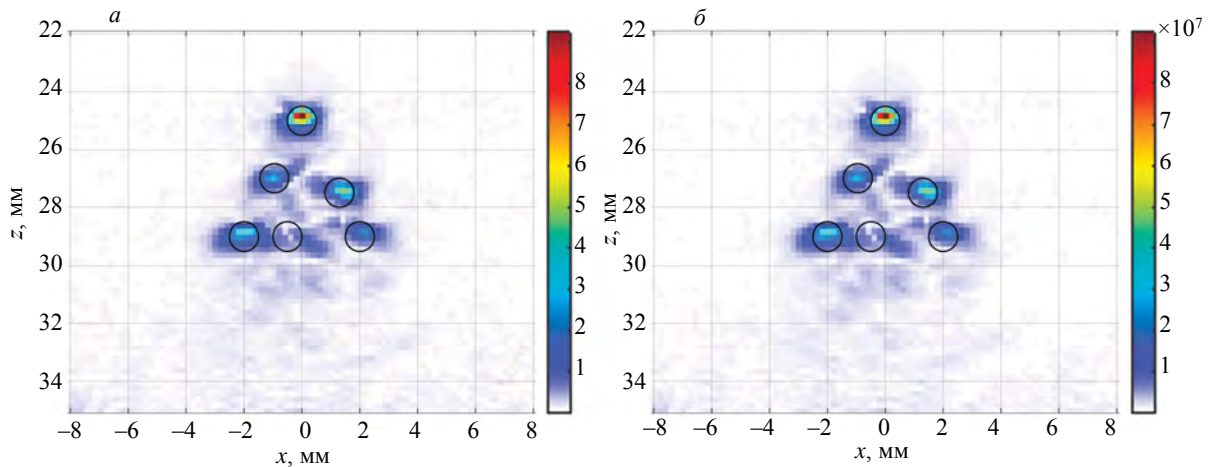


Рис. 6. PWI-C-SAFT-изображение:
а — без усреднений; б — с усреднениями по 25 измерениям

Если использовать 13 плоских волн с углами падения от -24 до 24 град через 4 град, то время регистрации эхосигналов, по которым было получено изображение на рис. 5б, уменьшится в 123 раза ~~относительно~~. Использование 7 плоских волн с углами падения от -24 до 24 град через 8 град позволит повысить скорость регистрации эхосигналов в 228 раз. Восстановленные PWI-C-SAFT-изображения будут очень близки к ЦФА-изображению на рис. 5б. Так, возник лишь шум амплитудой -20 дБ и -25 дБ, а разрешающая способность и амплитуды бликов изменились несущественно.

4.1.2. Восстановление изображения методом ПСП

4.1.2.1. Режим FMC

На рис. 7а показано FMC-ПСП-изображение при интерполяции по ближайшему соседу (раздел 3.2.3). Амплитуда бликов шума интерполяции соизмерима с амплитудой бликов БЦО с номерами 4, 5 и 6. На рис. 7б показано FMC-ПСП-изображение при интерполяции по четырем взвешенным точкам, что уменьшило амплитуду ложных бликов более, чем на 25 дБ. Изображение на рис. 7б очень близко к изображению на рис. 5б или рис. 6а. Восстановления FMC-ПСП-изображения происходило быстрее примерно в пять раз по сравнению с восстановлением ЦФА-изображения.

4.1.2.2. Режим PWI

На рис. 8а приведено PWI-ПСП-изображение при интерполяции по ближайшему соседу, а рис. 8б — при интерполяции по четырем взвешенным точкам. Шум интерполяции практически одинаков на этих изображениях по причине, рассмотренной в разделе 3.2.3. PWI-ПСП-изображения близки к ЦФА-изображению при интерполяции по четырем точкам (см. рис. 7б).

4.2. Образец СО-1

Для восстановления изображения восьми пронумерованных боковых цилиндрических отверстий в образце СО-1 (рис. 9) использовалась та же АР, что и в разделе 4.1. Эхосигналы, для уменьшения уровня белого шума, измерялись 25 раз для дальнейшего усреднения.

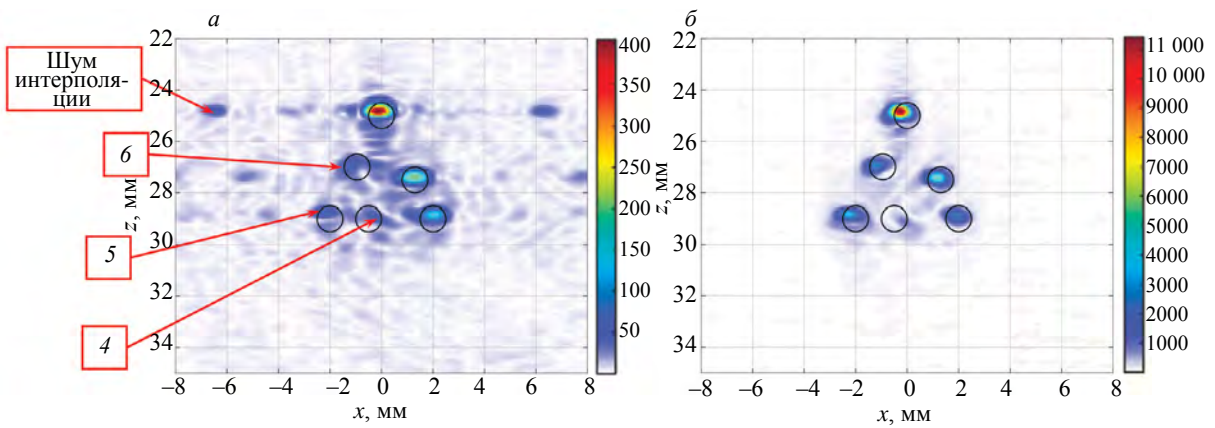


Рис. 7. FMC-ПСП-изображение с интерполяцией: *a* — по ближайшему соседу; *б* — по четырем взвешенным точкам.

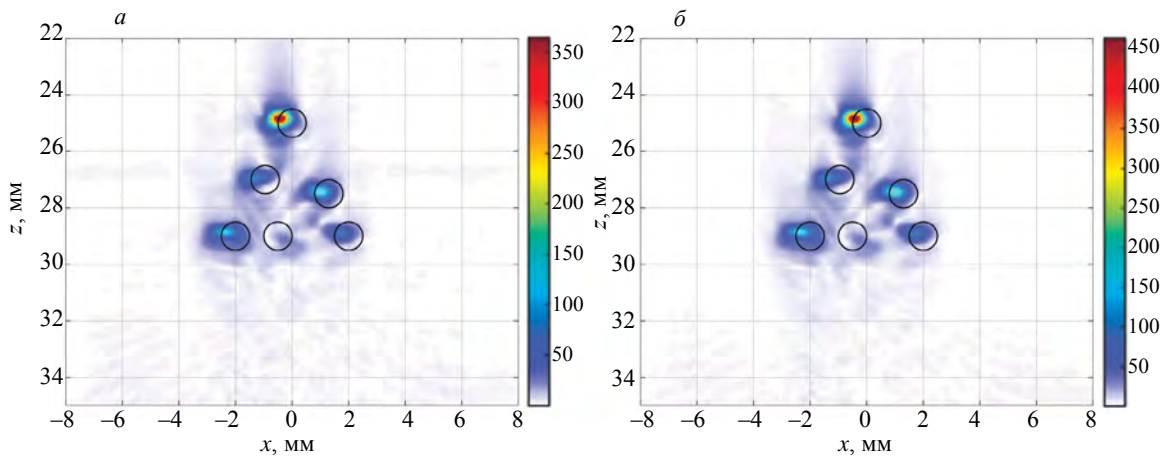


Рис. 8. PWI-ПСП-изображение с интерполяцией: *a* — по ближайшему соседу; *б* — по четырем взвешенным точкам.

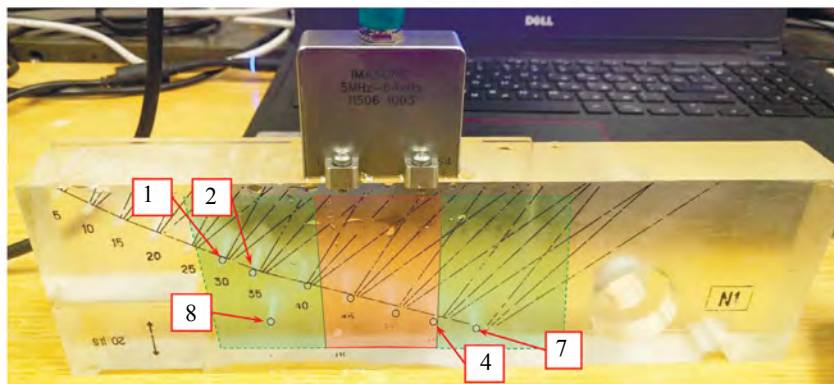


Рис. 9. Фотография образца СО-1 и используемой АР.

4.2.1. Восстановление изображения во времени

4.2.1.1. Режим FMC

На рис. 10а показано ЦФА-изображение, восстановленное по экосигналам без усреднения. На изображение линиями черного цвета наброшена маска БЦО на прямом луче и при отражении от дна. Блики всех БЦО за исключением седьмого уверенно обнаруживаются на прямом луче. Блик БЦО

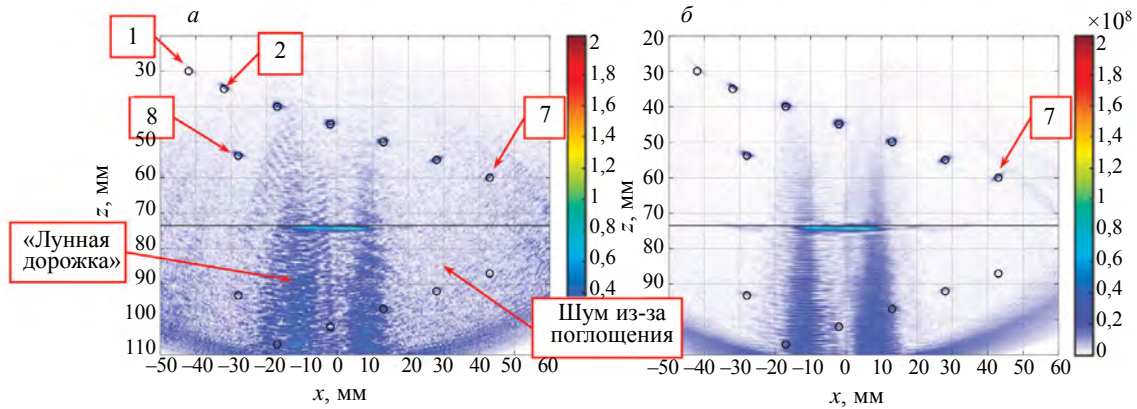


Рис. 10. ЦФА-изображение:
а — без усреднений; б — с усреднениями по 25 измерениям.

7 из-за его большого удаления от АР слабо различим, так как его амплитуда превышает уровень шума примерно на 6 дБ. Усиление в 50 дБ увеличило амплитуду синфазной помехи между приемными каналами дефектоскопа, в результате чего на изображении появился шум, названный «лунная дорожка». Уровень белого шума ЦФА-изображение, восстановленное по усредненным экосигналам, уменьшился более, чем на 12 дБ (рис. 10б), что позволило уверенно обнаружить БЦО номер 7. Более того, стали заметны блики БЦО, сформированные на однократно отраженных от дна лучах.

4.2.1.2. Режим PWI

На рис. 11а показано изображение, восстановленное по экосигналам без усреднений, а на рис. 11б — с усреднением. Оба изображения принципиально отличаются друг от друга, так как режим PWI позволяет вводить больше энергии в объект контроля. А так как уровень усиления был уменьшен на 15 дБ, то при сравнении с рис. 10а видно, что амплитуда «лунной дорожки» уменьшилась более, чем на 25 дБ. Так как PWI-C-SAFT-изображение восстановлено при излучении 21 плоской волны с углом падения от -20 до 20 град с шагом 2 град, а FMC-изображение при излучении 64 выстрелов и 25 измерениях для усреднения, то это привело к ускорению регистрации экосигналов в режиме PWI в 76 раз, так же как и в разделе 4.1.1.2. Блики БЦО, сформированные экосигналами, однократно отраженными от дна (см. рис. 11а), не удастся обнаружить, так как их амплитуда сравнима с уровнем шума из-за поглощения, но после усреднения экосигналов на изображении на рис. 11б эти блики хорошо заметны из-за повышения отношения сигнал/шум.

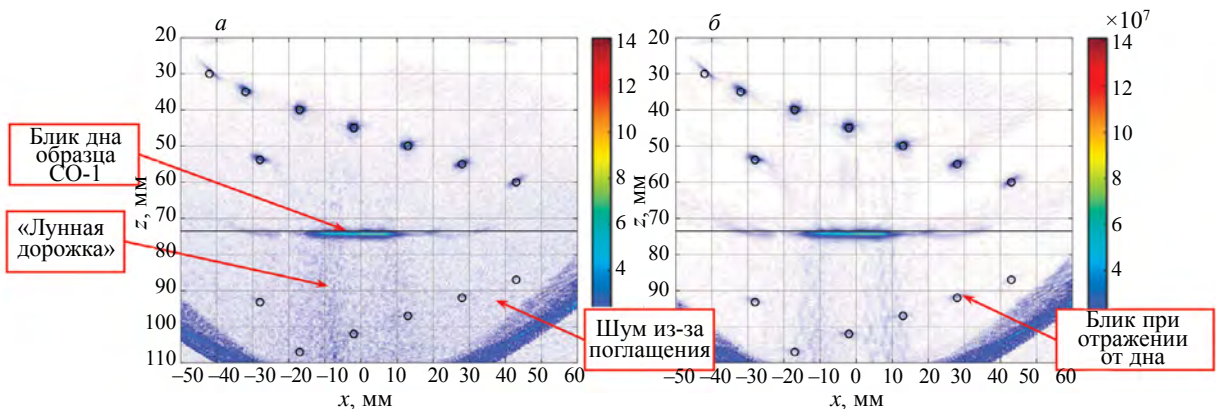


Рис. 11. PWI-C-SAFT-изображение:
а — без усреднений; б — с усреднениями по 25 измерениям.

4.2.2. Восстановление изображения методом ПСП

В отличие от модельного эксперимента, описанного в разделе 4.1, когда все БЦО были в пределах активной апертуры АР, в данном модельном эксперименте БЦО с номерами 1, 2, 7 и 8 находятся вне пределов апертуры АР, показанной квадратом с полупрозрачной заливкой красного цвета (см. рис. 9).

При восстановлении ПСП-изображения блики БЦО с номерами 1, 2, 8 и 7 будут зеркально отражены относительно вертикальных линий границы апертуры. Для устранения этого эффекта можно увеличить количество элементов АР до 192, добавив эхосигналы из нулей слева и справа 64 нуля. Увеличенная апертура на рис. 9 показана двумя прямоугольниками с полупрозрачной заливкой зеленого цвета.

4.2.2.1. Режим FMC

На рис. 12а приведено FMC-ПСП-изображение при интерполяции по ближайшему соседу. На изображении присутствуют многократно повторяющиеся по горизонтали ложные блики, появившиеся из-за грубого шага элементов АР (см. раздел 3.2.3), которым было дано название «пунктирный шум» (рис. 12). «Пунктирный шум» затрудняет определение количества несплошностей в ОК. На рис. 12б приведено FMC-ПСП-изображение при интерполяции по четырем взвешенным точкам. Однако, из-за грубого шага элементов АР, «пунктирный шум» подавить не удалось.

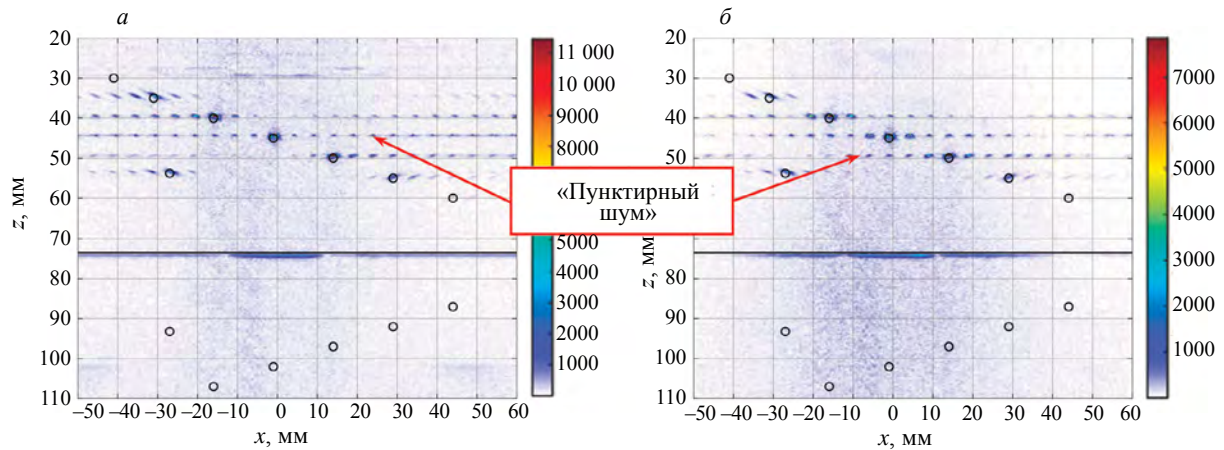


Рис. 12. FMC-ПСП-изображение с интерполяцией:
а — по ближайшему соседу; б — по четырем взвешенным точкам.

4.2.2.2. Режим PWI

На рис. 13а приведено PWI-ПСП-изображение при интерполяции по ближайшему соседу, а на рис. 13б — при интерполяции по четырем точкам. Как видно, разница между шумом интерполяции этих двух изображений мала (см. раздел 4.1.2.2). На обоих изображениях блики БЦО с номерами 6 и 8 имеют маленькую амплитуду, а блики БЦО с номерами 1 и 7 вообще не видны, так как находятся вне области сканирования плоскими волнами с углами от -20 до 20 град. Для восстановления бликов БЦО с номерами 1 и 7 нужно увеличить диапазон углов излучения плоских волн от -40 до 40 град, но это приведет к уменьшению скорости регистрации эхосигналов.

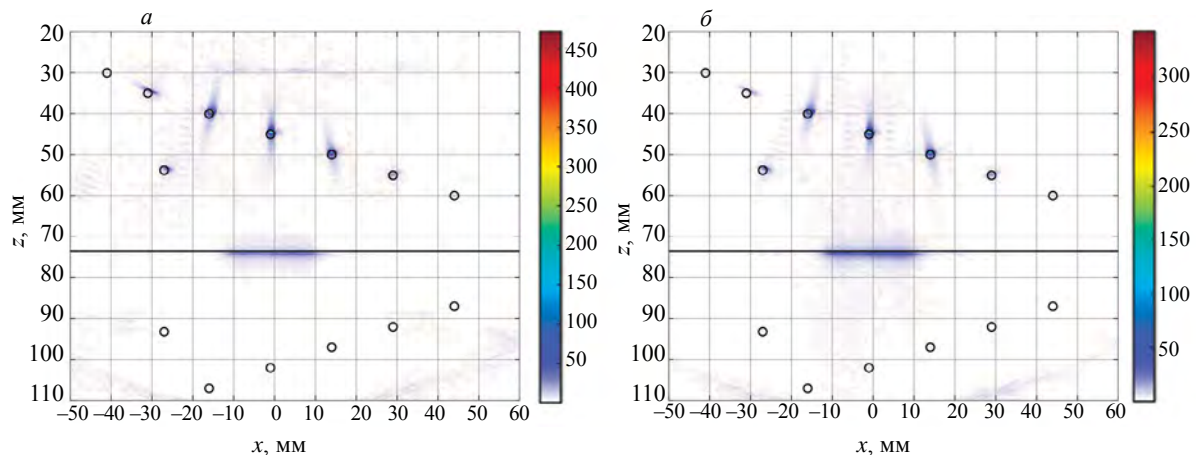


Рис. 13. PWI-ПСП-изображение с интерполяцией:
а — по ближайшему соседу; б — по четырем взвешенным точкам.

4.3. Образец СО-НК-036 №3 («кораблик»)

В образце из стали Ст20 толщиной 60 мм со стороны грани с углом наклона 30 град сделано четыре пронумерованных плоскодонных цилиндрических отверстия (ПДО), диаметром 1 мм, с глубиной залегания 2, 10, 20 и 40 мм (рис. 14). На рис. 14 все четыре ПДО схематически показаны линиями желтого цвета. Для контроля использовалась АР с частотой 5 МГц и 32 элементами, размером 0,55 мм с зазором между краями элементов 0,05 мм, установленной на рексолитовую призму с углом наклона 35 град. Сканирование по оси x проводилось 67 раз с шагом 1,14 мм. Призма в начальном положении -96 мм показана на рис. 14.

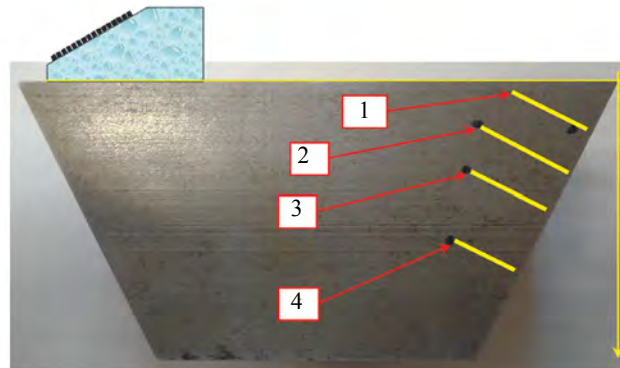


Рис. 14. Фотография образца №3 СО-НК-036 (кораблик).

4.3.1. Восстановление изображения во временной области

На рис. 15 показаны изображения, восстановленные по эхосигналам, измеренным в режиме тройного сканирования FMC и PWI. В режиме PWI плоские волны генерировались в диапазоне от 30 до 80 град через 2 град. Оба изображения ПДО принципиально отличаются друг от друга. Однако блики ПДО на рис. 15а сфокусированы лучше по причине наличия краевой волны и ограниченной области формирования плоской волны (см. раздел 2.2). Так как АР состоит из 32 элементов и усреднения эхосигналов не проводилось, то увеличение скорости регистрации эхосигналов в режиме PWI по сравнению с FMC не так заметно, как в разделах 4.1.1.2 и 4.2.1.2.

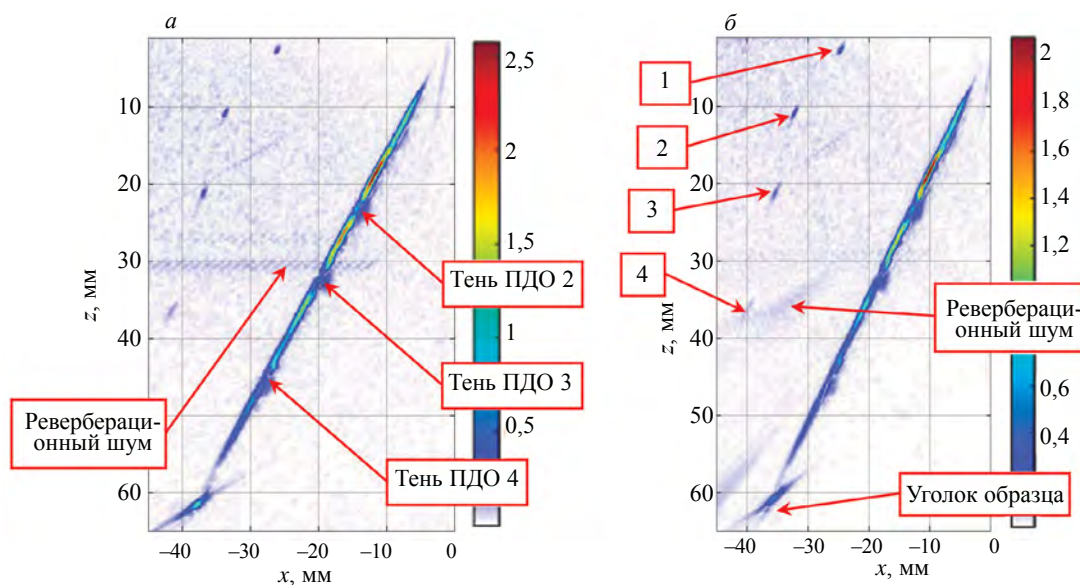


Рис. 15. Изображения, восстановленные по эхосигналам, измеренным в режиме тройного сканирования: а — FMC; б — PWI.

На рис. 16а приведено FMC-C-SAFT-изображение самого глубокого ПДО номер 4, для начального положения призмы на ОК, а на рис. 16б — PWI-C-SAFT-изображение. На каждый рисунок линиями черного цвета наброшена маска ПДО. На рис. 16а, отношение сигнал/шум около 2 дБ, а на рис. 16б, из-за свойства PWI вводить большее, по сравнению с режимом FMC, количество энергии в ОК, отношение сигнал/шум около 6 дБ, что позволяет считать блик ПДО 4 обнаруженным.

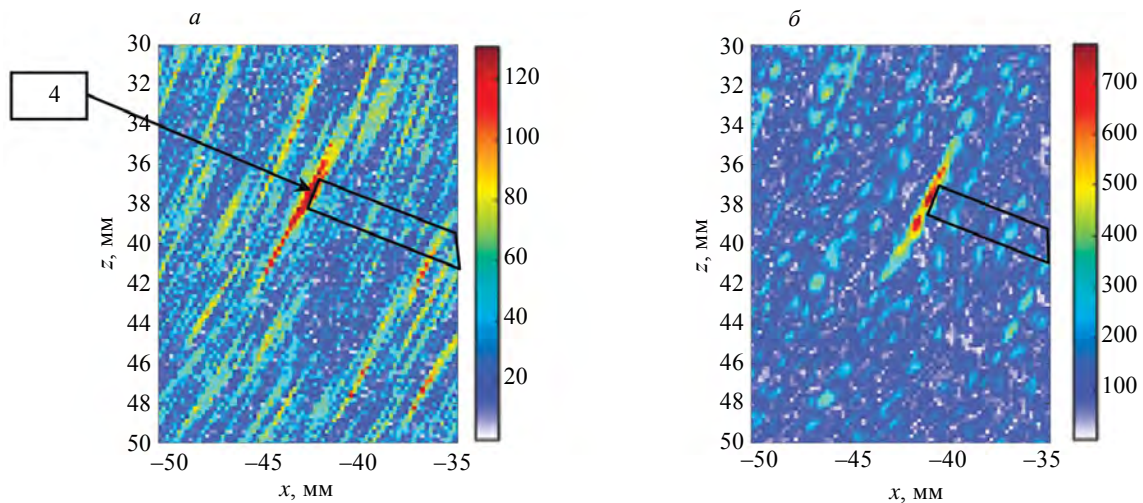


Рис. 16. Изображения, восстановленные по эхосигналам, измеренным в положении -96 мм в режиме: а — FMC; б — PWI.

Следует обратить внимание на то, что амплитуда блика ПДО на рис. 16б оказалась модулированной. Это можно объяснить тем, что при увеличении глубины залегания отражателей в эту область будет приходить всего нескольких плоских волн (см. рис. 2). Излучая плоские волны с шагом по углу 1 или 0,5 град, можно получить блик ПДО без модуляции (как на рис. 16а). В этом случае отношение сигнал/шум возрастет еще больше, но в два или четыре раза уменьшится скорость регистрации эхосигналов. По этой же причине блики ПДО на рис. 15б уменьшают амплитуду быстрее, чем на рис. 15а при увеличении глубины залегания отражателя. Чем больше размер АР, тем меньше будет сказываться этот эффект на качестве PWI-изображения. Эту особенность работы в режиме PWI нужно учитывать при разработке методик.

5. ВЫВОДЫ

По результатам исследований, изложенных в данной статье, можно сделать несколько выводов.

1. При использовании 64-элементной АР без призмы для восстановления изображения БЦО в образце Т-Б-39-60-Пл №19200 можно ограничиться восемью плоскими волнами, то есть повысить скорость регистрации в восемь раз. Эффективность применения режима PWI для ускорения регистрации эхосигналов тем выше, чем больше элементов в АР.

2. Восстановление изображений БЦО в образце СО-1 в спектральном пространстве не такое эффективное, как для образца Т-Б-39-60-Пл №19200. Это связано с двумя причинами: нарушение теоремы Котельникова и из-за того, что размеры ОВИ в два раза больше апертуры АР. В статьях часто проводятся изображения отражателей в металле с использованием призмы с нулевым углом наклона. Алгоритм (3) в этом случае легко модифицируется [9]. Так как использовалось 21 плоская волна, то скорость регистрации возросла в три раза.

3. Применение технологии PWI не повысило отношение сигнал/шум при работе с образцом СО-НК-036 №3 («кораблик») при регистрации эхосигналов 32-элементной АР на призме. При тройном сканировании качество изображений, восстановленных по эхосигналам, измеренным в режиме PWI и FMC, примерно одинаково. Только при обработке эхосигналов для положения 2 можно утверждать, что PWI повысило примерно на 3 дБ отношение сигнал/шум (см. рис. 16). Использование 25 плоских волн не позволило значительно увеличить скорость регистрации эхосигналов.

4. Эффективность применения технологии PWI снижается при уменьшении количества элементов АР и для области ОВИ, существенно превышающей размеры АР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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: 26.11.2020).
2. *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.
3. *Базулин Е.Г.* Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—75.
4. *Hunter A.J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D.* The Wavenumber Algorithm for Full-Matrix Imaging Using and Ultrasonic Array // NDT Int. 2006. V. 39. №. 7. P. 525—541.
5. *Парфенов В.И., Голованов Д.Ю.* Обнаружение дискретных разреженных сигналов с частотой дискретизации, не превышающей частоту Найквиста // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. № 6. Режим доступа: URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/1/text.pdf> (дата обращения: 09.12.2018).
6. *Авагян В.К., Базулин Е.Г.* Увеличение скорости регистрации эхосигналов ультразвуковой антенной решеткой с применением технологии множественного доступа с кодовым разделением // Дефектоскопия. 2020. № 11. С. 3—16.
7. *Montaldo G., Tanter M., Bercoff J., Benech N., Fink M.* Coherent planewave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2009. V. 56. P. 489—506. DOI: 10.1109/TUFFC.2009.1067
8. *Jeune L.* Imagerie ultrasonore par emission d'ondes planes pour le contrôle de structures complexes en immersion // Pour l'obtention du grade de Docteur de l'université Paris-Diderot. Paris. 2016. P. 119.
9. *Merabet L., Robert S., Prada C.* Comparative study of 2D ultrasound imaging methods in the f-k domain and evaluation of their performances in a realistic NDT configuration // IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 2019. V. 66. №. 4. P. 772—788. DOI: 10.1063/1.5031654
10. *Dolmatov D.O., Sednev D.A., Bulavinov A.N.* et al. Applying the Algorithm of Calculation in the Frequency Domain to Ultrasonic Tomography of Layered Inhomogeneous Media Using Matrix Antenna Arrays // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 7. P. 499—506. [Долматов Д.О., Седнев Д.А., Булавинов А.Н., Пинчук Р.В. Применение алгоритма расчета в частотной области в ультразвуковой томографии с использованием матричных фазированных антенных решеток и компенсацией непараллельности поверхности объекта контроля относительно плоскости сканирования // Дефектоскопия. 2019. № 7. С. 12—19.]
11. *Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н.* Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
12. *Taki H., Taki K., Sakamoto T., Yamakawa M., Shiina T., Kudo M., Sato T.* High range resolution ultrasonographic vascular imaging using frequency domain interferometry with the Capon method // IEEE Trans. Med. Imaging. 2012. V. 31. №. 2. P. 417—429.
13. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
14. *Базулин Е.Г.* Учет анизотропных свойств сварного соединения при восстановлении изображения отражателей по эхосигналам, измеренным ультразвуковой антенной решеткой // Дефектоскопия. 2017. № 1. С. 11—25.
15. Технология NVIDIA CUDA™. URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/technologies/cuda-x/> (дата обращения: 21.11.2020).
16. *Угрюмов Е.П.* Программируемые логические матрицы, программируемая матричная логика, базовые матричные кристаллы. Гл. 7. / Цифровая схемотехника. Учеб. пособие для вузов. Изд. 2. БХВ-Петербург, 2004. С. 357.
17. *Базулин Е.Г.* Контроль заварок Ду800 антенными решетками методом тройного сканирования // Дефектоскопия. 2010. № 7. С. 30—41.
18. *Горюнов А.А., Сасковец А.В.* Обратные задачи рассеяния в акустике. М.: Издательство МГУ, 1989. 152 с.
19. *Базулин Е.Г.* О возможности использования в ультразвуковом контроле двойного сканирования для повышения качества изображения рассеивателей // Акуст. Журн. 2001. Т. 47. № 6. С. 741—745.
20. *Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Коколев С.А.* Применение линейной интерполяции для повышения качества изображений дефектов, получаемых методом проекции в спектральном пространстве, при ультразвуковом неразрушающем контроле // Дефектоскопия. 2009. № 12. С. 3—21.
21. Официальный сайт фирмы «ЭХО+» URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 21.11.2020).