

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ НА ГРАНИЦЕ ОСНОВНОГО И НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ PLANE WAVE IMAGING

© 2023 г. Е.Г. Базулин^{1,*}

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

Поступила в редакцию 28.11.2022; после доработки 16.12.2022
Принята к публикации 23.12.2022

Предлагается использовать технологию Plane Wave Imaging (PWI) для ультразвукового контроля сварных соединений с узкой разделкой для выявления трещин на границе сплавления основного и наплавленного металла. В сравнении с методом цифровой фокусировки изображения (ЦФА) данный способ позволяет восстанавливать изображения отражателей с более высоким отношением сигнал/шум, с большей скоростью как регистрации эхосигналов, так и восстановления изображения несплошностей по разным акустическим схемам с учетом трансформации типа волны при отражении от границ объекта контроля. Численные и модельные эксперименты подтвердили эффективность применения технологии PWI для повышения скорости зонального контроля. Применение когерентного фактора повысило отношение сигнал/шум изображения моделей трещин как для режима FMC, так и для режима PWI.

Ключевые слова: антенная решетка, двойное сканирование, Full Matrix Capture (FMC), Plane Wave Imaging (PWI), C-SAFI, Total Focusing Method (TFM), цифровая фокусировка антенной (ЦФА), зональная фокусировка, Coherence Factor (CF).

DOI: 10.31857/S013030822302001X, EDN: BWEUXH

1. ВВЕДЕНИЕ

При автоматизированном ультразвуковом контроле (АУЗК) возникает противоречие между достижением предельно высокой скорости проведения контроля и максимальной вероятностью выявления дефектов [1]. Пытаясь получить предельно высокую скорость АУЗК, в методиках контроля используется меньшее количество излучателей и приемников, увеличиваются шаги сканирования, уменьшаются пространственные и временные апертуры регистрации эхосигналов, применяются простые методы обработки информации. Но при этом повышается вероятность пропуска дефекта или неточного определения типа и размера отражателя. В зависимости от способа контроля (производственный или эксплуатационный) и от степени техногенной опасности объекта контроля (корпус ядерного реактора или водопроводные трубы жилого дома) приходится выбирать золотую середину.

В настоящее время для восстановления изображения отражателей в объекте контроля широко применяют две технологии: технология фазированных антенных решеток (ФАР) [2], которая на сегодняшний день является наиболее распространенной, и технология цифровой фокусировки антенной (ЦФА) [3]. В статье [4], посвященной сравнению возможностей ФАР- и ЦФА-дефектоскопов, сделан вывод, что с алгоритмической точки зрения ЦФА-технология более перспективна.

Эффективным способом обнаружения вертикально ориентированной трещины является работа с эхосигналами, отраженными от ее поверхности, с использованием двух пьезопреобразователей при нечетном количестве отражений импульса от границ объекта контроля. Такие импульсы возникают при падении на трещину зондирующего импульса на прямом луче и регистрации эхосигнала, однократно отраженного от дна объекта контроля (эхо-зеркальный метод «тандем»). В дальнейшем под акустической схемой, которая будет обозначаться как *as*, будем подразумевать описание лучевой траектории распространения импульса от излучателя до отражателя и до приемника при отражении от неровных границ объекта контроля с учетом трансформации типа волны. Акустическая схема будет определяться последовательностью букв L (продольная волна), T (вертикально поляризованная поперечная волна) и буквы d (отражение от несплошности). Контроль методом «тандем» может проводиться с использованием разным акустических схем, например, TTdT или LLdT [5]. Обозначение акустической схемы, показанной на рис. 1, будет следующим TLdTTT.

При монтаже сварных соединений магистральных трубопроводов, кроме соблюдения требований достоверности определения вертикально ориентированных трещин, необходимо обеспечивать высокую скорость ультразвукового контроля, сопоставимую со скоростью выполнения сварки. Системы зонального контроля, реализующие такой подход с применением множества традиционных одноэлементных преобразователей, работающих по методу «тандем», разрабатывались с середины 1950-х годов и стали широко применяться на практике с 1980-х гг. В 2000-х годах с развитием многоканальной электроники стала возможной быстродействующая реализация тех же схем контроля, но с применением антенных решеток (АР). В статье [6] приведен обзор стандартов на применение АУЗК сварных швов трубопроводов с применением зонального контроля. Но ФАР-зональный контроль имеет ряд недостатков, к которым можно отнести сложность настройки каналов перед проведением контроля. Кроме того, достоверность контроля сильно зависит от изменений как толщины объекта контроля, так и от расположения АР относительно середины сварного соединения в силу требования попадания эхосигнала от трещины в пределы заданного строба.

В статье [7] для проведения зонального контроля предложено использовать технологию ЦФА, так как такой подход позволяет получать высококачественное изображение отражателей по многим акустическим схемам, по которому с точностью около половины длины волны можно оценить размеры трещины [8—12]. В отличие от методов, основанных лишь на анализе амплитуды эхосигнала, ЦФА-технология снижает влияние ориентации и формы дефекта на результат измерения при использовании оптимального набора акустических схем [13]. Точность определения размеров плоскодонных отверстий на частоте 5 МГц в работе [7] оценена как 0,2 мм, в то время как ФАР-зональный контроль позволяет достигнуть точности около 1 мм, что равно примерно 1,5 длины поперечной волны в стали. Однако скорость проведения ЦФА-контроля может оказаться недостаточно высокой, а такая технология контроля более подходит для эксплуатационного контроля, поэтому задача повышения скорости регистрации эхосигналов, восстановления изображения отражателей и подготовки протокола контроля является актуальной.

В статье [14] приведен краткий обзор методов повышения скорости регистрации эхосигналов с помощью АР. Перспективным является метод регистрации эхосигналов в режиме Plane Wave Imaging (PWI) [15—17], который был разработан для регистрации эхосигналов АР с большим количеством элементов. В объект контроля, как и в ФАР-технологии, всеми элементами АР излучается плоская волна с заданным углом падения, а регистрация эхосигналов происходит всеми элементами АР, как в режиме Full Matrix Capture (FMC) [18]. Измеренные эхосигналы по аналогии с технологией ЦФО так же будем называть выстрелом. По эхосигналам выстрела восстанавливается парциальное изображение отражателей. Для повышения качества изображения в объект контроля последовательно излучается несколько плоских волн N_{pw} и все парциальные изображения объединяются. Режим PWI обладает рядом достоинств. Так как для регистрации можно использовать порядка 10 плоских волн ($N_{pw} = 10$), то скорость регистрации эхосигналов, в сравнении с режимом FMC, повышается тем больше, 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 — $N_e N_{pw} = 640$, скорость их регистрации возрастет примерно в 6,4 раза. Для АР из 128 элементов скорость регистрации эхосигналов возрастет примерно в 13 раз. Так как одна из плоских волн формируется всеми элементами АР, то акустическая энергия, передаваемая в среду, будет больше, чем для режима FMC. Поэтому режим PWI более помехозащищен при работе с объектами контроля с большим поглощением.

В статье для решения актуальной задачи повышения скорости проведения АУЗК сварных соединений с узкой разделкой для выявления трещин на границе сплавления основного и наплавленного металла предлагается использовать технологию PWI. В сравнении с методом ЦФА предлагаемый способ позволяет восстанавливать изображения отражателей с более высоким отношением сигнал/шум, с большей скоростью как регистрации эхосигналов, так и восстановления изображения несплошностей по разным акустическим схемам с учетом трансформации типа волны при отражении от границ объекта контроля.

2. СРАВНЕНИЕ FMC И PWI-ТЕХНОЛОГИИ

Восстановление изображения отражателей с использованием FMC и PWI-технологии происходит в два этапа: на первом этапе излучаются зондирующие импульсы и регистрируются эхосигналы, а на втором — по измеренным эхосигналам восстанавливается изображение отражателей. Для простоты будем рассматривать задачу в двумерном случае.

2.1. Регистрация эхосигналов

2.1.1. Режим FMC

Для описания геометрии задачи введем систему координат (x, z) , в которой будут проводиться расчеты (см. рис. 1). Центр излучающего элемента номер m АР описывается вектором $\mathbf{r}_{i,m}$, а центр принимающего элемента с номером n — вектором $\mathbf{r}_{i,n}$. Призма может быть смещена по оси x на расстояние x_w . Граница основного и наплавленного металла отмечена пунктирной линией черного цвета, а две трещины по границе показаны утолщенными линиями черного цвета. Область восстановления изображения (ОВИ) показана прямоугольником с границей черного цвета с полупрозрачной розовой заливкой¹.

Рассмотрим для примера акустическую схему LTLdTT, когда в режиме FMC первый элемент АР в точке $\mathbf{r}_{i,1}$ излучает зондирующий сигнал. На рис. 1 тремя многоугольниками с зеленой и красной полупрозрачной заливкой показаны области распространения зондирующего импульса с учетом двух отражений от границы объекта контроля и трансформации типа волны. Сегментами окружностей зеленого цвета схематически показаны фронты излученной продольной волны. В дальнейшем на рисунках лучи продольной волны будут отмечаться зеленым цветом, а лучи вертикально поляризованной поперечной волны — красным цветом. Облучение двух трещин в ОВИ в целом равноправны, так как на них падает «цилиндрическая» волна, искаженная широкой диаграммой направленности элемента АР. На рис. 1 двумя стрелками красного цвета схематически показана траектория эхосигнала после зеркального рассеяния продольной волны на поверхности верхней трещины и при однократном отражении поперечной волны от дна объекта контроля. Набор эхосигналов, измеренных всеми элементами АР, будем называть первым выстрелом. Процедура излучения и регистрации повторяется для всех элементов АР. Эхосигналы всех выстрелов будем называть залпом. Лучи продольной волны в призме не показаны. На рис. 1 схематически показаны лучи при зеркальном рассеянии продольной волны на нижней трещине по акустической схеме LTLdLT. Таким образом, в режиме FMC удастся зарегистрировать эхосигналы от двух трещин по двум акустическим схемам, в идеале, для всех выстрелов.

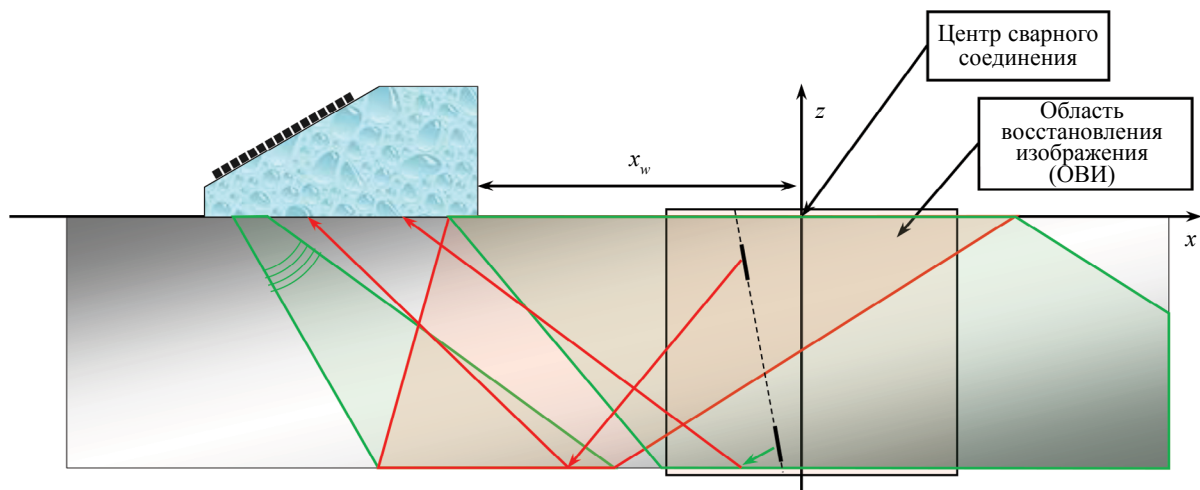


Рис.1. Схема регистрации эхосигналов в режиме FMC с использованием призмы.

Как упоминалось ранее, измеренные N_e^2 эхосигналов могут иметь достаточно большой объем, например, больше нескольких десятков Мбайт. Их передача между модулями ЦФА-дефектоскопа может потребовать значительного времени, что уменьшит скорость сканирования и, следовательно, скорость проведения контроля.

¹Использование цвета для пояснения рисунков доступно только в электронном варианте статьи или в ее печатном издании журнала «Дефектоскопия».

2.1.2. Режим PWI

Описание геометрии измерений в режиме PWI по акустической схеме LTLdTT совпадает с геометрией, описанной в разделе 2.1.1. В объект контроля, как и в ФАР-технологии, одновременно всеми элементами АР излучается плоская волна с волновым вектором $\mathbf{k}_i$ [16, 17] (рис. 2). Так как плоская волна формируется в ограниченном объеме пространства, то это приводит к особенностям работы в режиме PWI. На рис. 2 схематически показаны области распространения плоской волны с учетом двух отражений от границы объекта контроля и трансформации типа волны. Видно, что на нижнюю трещину плоская зондирующая волна не попадет. Поэтому для повышения качества изображения нужно последовательно излучить несколько плоских волн N_{pw} , т.е. зарегистрировать N_{pw} выстрелов. Понятно, что чем больше размеры антенной решетки, тем менее существенна данная особенность режима PWI. Для режима PWI очень важным является выбор параметров ОВИ, в которой могут находиться отражатели, и выбор набора углов плоских волн, который не обязательно должен быть эквидистантным.

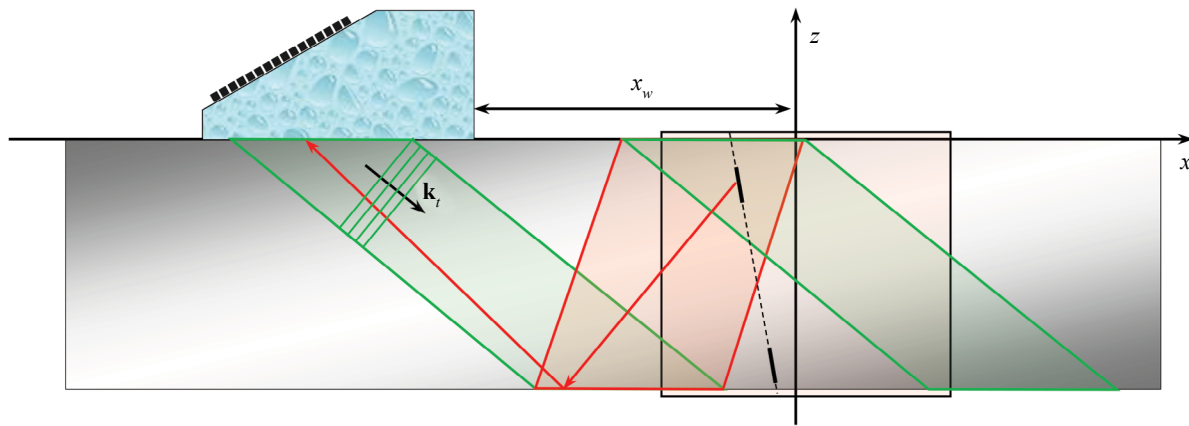


Рис. 2. Схема регистрации эхосигналов в режиме PWI с использованием призмы.

Отметим, что для любой призмы можно рассчитать задержки, которые формируют набор плоских продольных волн. Понятно, что будет генерироваться и набор плоских поперечных волн с меньшими углами ввода. Такой режим будем обозначать PWI-L. Можно рассчитать задержки для формирования плоских поперечных волн (PWI-T), которые до первого критического угла будут формировать и набор продольных плоских волн.

В заключении этого раздела заметим, что регистрация эхосигналов 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 такой же энергии для одной плоской волны за один такт излучения, как и для полного залпа в ЦФА-режиме, но за N_e тактов излучения. Для повышения скорости регистрации эхосигналов и уменьшения времени восстановления изображения можно использовать около 10 плоских волн, что дополнительно повышает отношение сигнал/шум.

2.2. Методы восстановления изображения отражателей

2.2.1. Во временной области

На втором этапе по измеренным эхосигналам изображение отражателей восстанавливается методом комбинированного SAFT (C-SAFT) [19]. Метод C-SAFT в литературе, посвященной ультразвуковому контролю, называется Total Focusing Method (TFM) [20].

Пусть АР находится в точке $\mathbf{r}_w$ и регистрация эхосигналов $p(\mathbf{r}_{i,m}, \mathbf{r}_{i,n}, t)$ проводится в режиме FMC. Перед восстановлением изображения обычно измеренные эхосигналы переводят в комплексный вид с помощью преобразования Гильберта. Обозначим через $I_m(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_w)$ комплексное FMC-

изображение, восстановленное в точках $\mathbf{r}_i$ ОВИ по выстрелу номер m , т.е. по эхосигналам, измеренным всеми элементами АР при излучении элементом номер m . Тогда обычное ЦФА-изображение можно получить, сложив когерентно все изображения по выстрелам:

$$I_S(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) = \sum_{m=1}^{N_e} I_m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w), \quad (1)$$

где N_e — число элементов АР, а парциальное изображение рассчитывается по формуле:

$$I_m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) = \sum_{n=1}^{N_e} p(\mathbf{r}_{t,m}, \mathbf{r}_{r,n}, t - t_{del}(\mathbf{r}_{t,m}, \mathbf{r}_{r,n}, \mathbf{r}_i; as) + t_{\max}), \quad (2)$$

$t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_p, \mathbf{r}_i; as)$ — время пробега импульса от излучателя $\mathbf{r}_i$ до точки $\mathbf{r}_i$ и к приемнику $\mathbf{r}_r$ для заданной акустической схемы as ; $t_{\max}$ — время нарастания импульса. Для расчета времени пробега импульса по лучевой траектории применялся метод трассировки [21], который позволяет рассчитывать времена задержек для объекта состоящего из нескольких областей с разными акустическими свойствами.

Но объединить парциальные повыстрельные изображения $I_m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$ можно и иными способами. Например, можно рассчитать когерентный фактор [22, 23] для каждой точки $\mathbf{r}_i$ набора повыстрельных изображений:

$$I_{CF}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) = CF \sum_{m=1}^{N_e} (I_m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)), \quad (3)$$

а в качестве восстановленного изображения рассматривать функцию:

$$I(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) = I_S(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w) \cdot I_{CF}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w). \quad (4)$$

Такое представление результатов контроля возможно из-за важного свойства когерентного фактора, которое заключается в том, что при отсутствии шума амплитуды $I_{CF}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$ бликов отражателей разной силы близки к единице. Поэтому амплитуды бликов изображения, полученные по формуле (1) или (4), будут примерно одинаковы. Такой подход позволяет увеличить отношение сигнал/шум и разрешающую способность изображения отражателей.

В режиме тройного сканирования, когда АР сканирует, итоговое изображение можно получить по формулам (1) или (4), но в качестве парциальных изображений будут использоваться N_p изображений $I_S(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$ или $I_{CF}(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$, восстановленных для каждого положения АР:

$$I(\mathbf{r}_i; as) = \sum_{p=1}^{N_p} I(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_{w,p}). \quad (5)$$

Понятно, что вышесказанное подходит и для повышения качества изображения при регистрации эхосигналов в режиме РWІ. Для этого в формуле (1) суммирование происходит по числу используемых плоских волн N_{pw} , а расчет задержек в формуле (2) проводится в предположении, что всеми элементами решетки с заданными задержками излучается плоская волна. Отметим, что обычно анализируется модуль комплексного изображения.

2.2.2. В области пространственных частот

Для восстановления изображения отражателей по эхосигналам, измеренным как в режиме FMC, так и в режиме РWІ, расчеты из временной области можно перенести в область пространственных частот [17, 24]. 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, особенно для больших размеров ОВИ и большого количества элементов АР. Однако такой алгоритм требует серьезной модификации для учета отражения импульсов от неровных границ объекта контроля с учетом эффекта трансформации типа волны. Обычно изображения в частотной области получают для акустических схем LdL, LdT, TdL и TdT.

3. РАСЧЕТ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ

Точный расчет отношения сигнал/шум изображения является нетривиальной задачей, так как нет возможности отделить идеальное изображение от шума. Поэтому в данной статье отношение сигнал/шум определялось следующим образом:

$$SNR = 20 \log \frac{I_{\max} - \langle I_{cut} \rangle}{\langle I_{cut} \rangle}, \quad (6)$$

где $I_{\max}$ — максимум модуля фрагмента восстановленного изображения; $\langle I_{cut} \rangle$ — среднее значение модуля изображения без учета отсчетов вокруг блика с максимальной амплитудой, превышающих уровень 0,1. Такой подход является приблизительным и поэтому не позволяет работать с сильно зашумленными изображениями и требует, чтобы в выбранном фрагменте изображения был только один блик отражателя.

4. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проверки предложенного способа проведения зонального контроля и его программной реализации использовались эхосигналы, рассчитанные по теории лучевых трубок в твердом теле с помощью программы CIVA [25]. Полагалось, что эхосигналы от трещины высотой 3,5 мм с углом наклона 7 град регистрируются антенной решеткой (5 МГц, 64 элемента размерами 0,55×10 мм, зазор между краями элементов 0,05 мм), установленной на рексолитовую 35-градусную призму со стрелой 40 град. Расчет поля в режимах FMC и PWI-L проводился с учетом эффекта трансформации типа волны при отражении от границ для 5 положений призмы, которая перемещалась с шагом 5 мм, начиная с точки –30 мм по ее передней грани (режим тройного сканирования). На рис. 1 призма схематически показана в самой удаленной точке $x_w = -30$ мм. Такой подход для восстановления изображения отражателей целесообразно применять, когда для максимальной достоверности контроля нужно получить высококачественное изображение, не считаясь с временными затратами, например, при проведении эксплуатационного контроля ответственных объектов энергетики.

В дальнейшем изображение, восстановленное по формулам (1) и (2) по эхосигналам, измеренным в режиме FMC, будет обозначаться как FMC-изображение. Изображение, восстановленное с учетом когерентного фактора по формулам (4) и (5), будет обозначаться как FMC-CF-изображение. В имя изображения, восстановленного в режиме тройного сканирования, будет добавляется буква X, например, FMC-X-изображение. Изображения, восстановленные по эхосигналам, измеренным в режиме PWI, будут обозначаться по такому же принципу.

На рис. 3а показано FMC-CF-X-изображение, восстановленное по акустической схеме LTLdTT, по пяти положениям АР по эхосигналам залпа (полное число выстрелов 320). В центре рисунка — пиктограмма акустической схемы. Восстановленное изображение достаточно высокого качества, так как образ трещины в виде блика ее поверхности хорошо виден, а амплитуды двух ложных бликов имеют амплитуду примерно –26 дБ. Трещина на рисунке выделена линией черного цвета. На рис. 3б показано PWI-L-CF-X-изображение, восстановленные по пяти положениям АР

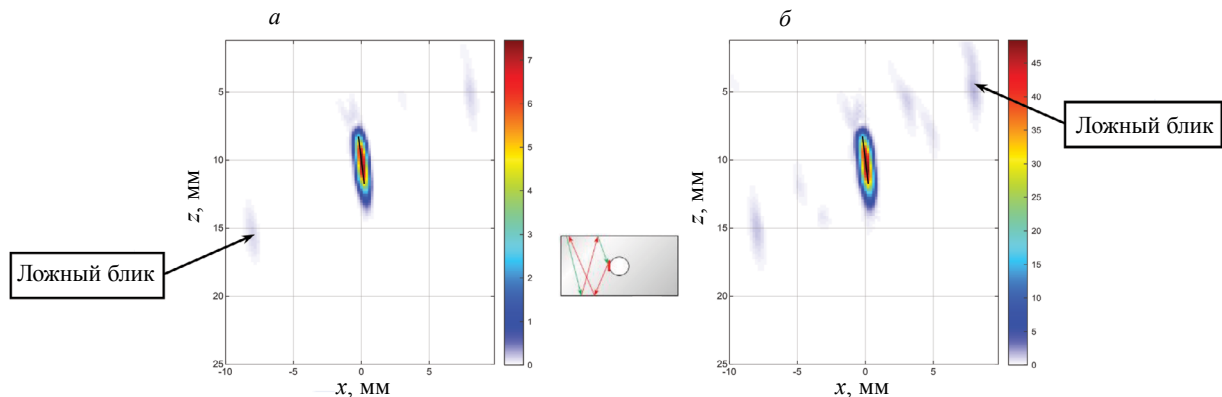


Рис. 3. FMC-CF-X-изображение (а) и PWI-L-CF-X-изображение (б), восстановленные по акустической схеме LTLdTT по всем выстрелам.

с использованием 31 плоской волны (полное число выстрелов, то есть плоских волн, 155) по той же акустической схеме. Полученное изображение несколько хуже, чем FMC-CF-X-изображение, так как на нем больше ложных бликов, и поэтому PWI-L-CF-X-изображение имеет отношение сигнал/шум на 8 дБ меньше.

Для прореживания выстрелов можно воспользоваться способом, изложенным в статье [26], но в данной работе использовалось регулярное прореживание как выстрелов для режима FMC, так и плоских волн для режима PWI-L. На рис. 4а показано FMC-CF-X-изображение, восстановленное по пяти положениям АР с прореживанием через 8 выстрелов для каждого положения (полное число выстрелов 40). По сравнению с изображением на рис. 3а уровень ложных бликов и их число возросло, а отношение сигнал/шум уменьшилось на 17 дБ. На рис. 4б показано PWI-L-CF-X-изображение, восстановленное по 4 плоским волнам для каждого положения АР (полное число выстрелов 20). По сравнению с изображением на рис. 3б качество PWI-L-CF-X-изображения практически не изменилось, но при сравнении его с FMC-CF-X-изображением на рис. 4а отношение сигнал/шум PWI-L-CF-X-изображения на 5 дБ больше.

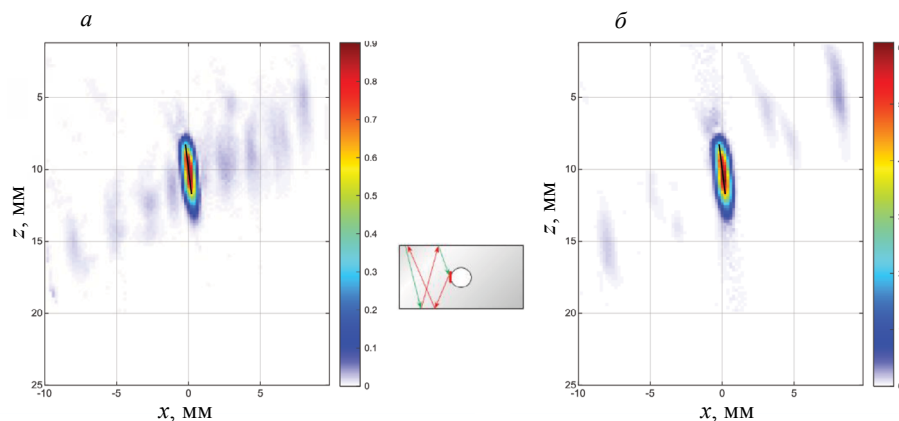


Рис. 4. FMC-CF-X-изображение (а) и PWI-L-CF-X-изображение (б), восстановленные по акустической схеме LTLdTT по 40 выстрелам и 20 плоским волнам.

Таким образом, в режиме тройного сканирования для формирования PWI-L-CF-X-изображения по пяти положениям АР понадобилось излучить всего 20 плоских волн. Восстановленное FMC-CF-X-изображение по 40 выстрелам для пяти положений имеет отношение сигнал/шум на 5 дБ меньше. Для получения FMC-CF-X-изображения с таким же отношением, что и PWI-L-CF-X-изображение на рис. 3б, нужно прореживать выстрелы вдвое, т.е. использовать 160 выстрелов.

5. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные эксперименты проводили с использованием дефектоскопа «АВГУР АРТ», разработанного и изготавливаемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [27]. Пять плоскодонных отверстий (ПДО) диаметром 2 мм были расположены по всей толщине образца из стали Ст20 в разных положениях вдоль оси y , которая направлена вдоль «сварного соединения». Толщина образца равна 20 мм. Наклон дна ПДО был равен 7 град, что является характерным значением угла наклона разделки для технологий автоматической сварки, применяемой при монтаже трубопроводов. АР на призме находилась на расстоянии $x_w = -20$ мм от центра «сварного соединения».

5.1. Антенная решетка из 64 элементов с шагом 0,6 мм

Эхосигналы регистрировались АР (5 МГц, 64 элемента, размеры пьезоэлемента $0,55 \times 10$ мм, зазор между элементами 0,05 мм), установленной на рексолитовую 35-градусную призму со стрелой 40 мм. Измерения в режиме FMC проводили с усилением 40 дБ, а в режиме PWI-T — с усилением 20 дБ. Амплитуда зондирующего импульса была равна 100 В.

На рис. 5а показано FMC-изображение ПДО № 1 на глубине 5 мм, восстановленное по эхосигналам полного заппа, а на рис. 5б — PWI-T-изображение, восстановленное по 11 плоским волнам (акустическая схема TLLdTT, пиктограмма которой показана в центре рисунка). Изображения

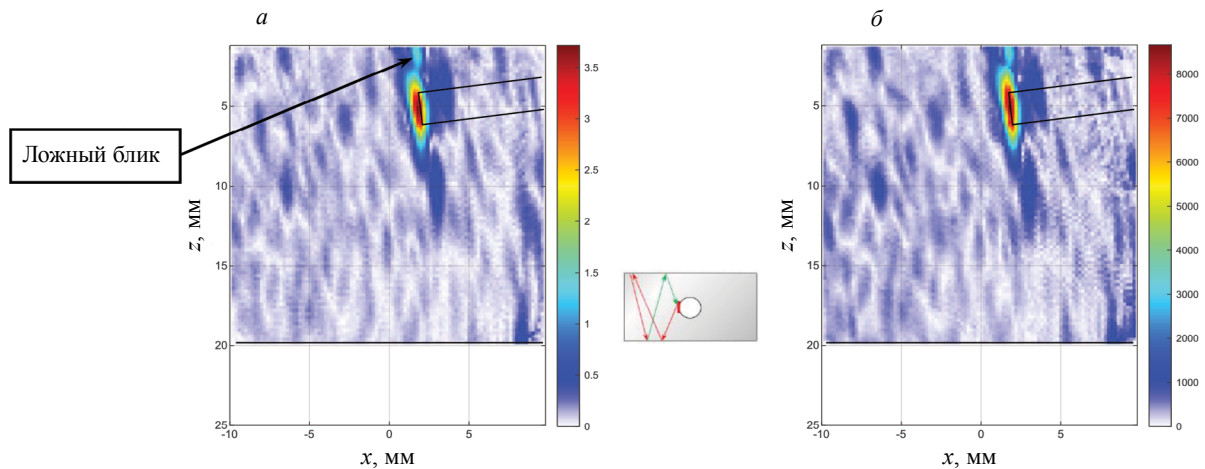


Рис. 5. FMC-изображение, восстановленное по 64 выстрелам (а), и PWI-T-изображение, восстановленное по 11 углам (б), (акустическая схема TLLdTT).

довольно близки друг к другу и имеют отношение сигнал/шум около 31 дБ, несмотря на то, что PWI-T-изображение восстановлено по 11 плоским волнам, что почти в шесть раз меньше, чем 64 выстрела, использованных при получении FMC-изображения.

Близость FMC- и PWI-T-изображений говорит о том, что точность позиционирования антенной решетки относительно центра сварного соединения не такая критичная, как при ФАР-зональном контроле [7].

Изображения ПДО с номерами от 2 до 5 не приводятся, так как они подобны тем, что показаны на рис. 5. Таким образом для восстановления PWI-T-изображения, соизмеримого по качеству с FMC-изображением, нужно в шесть раз меньше времени при регистрации эхосигналов и, следовательно, при восстановлении изображения отражателей.

На рис. 6 показаны графики амплитуд бликов пяти ПДО диаметром 2 мм для четырех акустических схем, восстановленных в режиме FMC (а) и PWI-T (б). Для режима FMC оптимальной является схема TLLdTT (линия желтого цвета), так как у нее самые большие амплитуды бликов ПДО и их разница не превышает 1 дБ. Это означает, что настройку усиления приемного тракта дефектоскопа перед проведением контроля можно сделать по настроечному образцу с одним ПДО. Хороший результат получается и для акустической схемы TTTdTL (линия серого цвета): амплитуды бликов уменьшились примерно на 30 %, а разница амплитуд бликов меньше 2 дБ. Для режима PWI-T оптимальной оказалась схема TTTdTL (линия серого цвета), так как у нее в целом большие амплитуды бликов и их разница не превышает 2 дБ. Неплохой результат получается и для акустической схемы TLLdTT (линия желтого цвета): амплитуда бликов уменьшилась примерно на 40 %, а разница амплитудами бликов меньше 3 дБ.

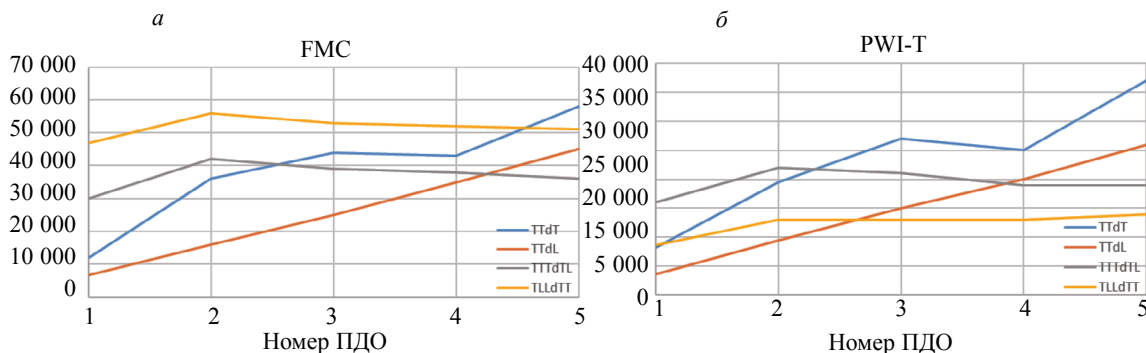


Рис. 6. График амплитуд бликов пяти ПДО диаметром 2 мм для четырех акустических схем, восстановленных в режиме FMC (а) и PWI-T (б).

5.2. Антенная решетка из 64 элементов с шагом 1 мм

В следующем эксперименте для уменьшения влияния на изображение ограниченной области формирования плоской волной (см. рис. 2) эхосигналы регистрировались АР (5 МГц, 64 элемента, размеры пьезоэлемента $0,9 \times 10$ мм, зазор между элементами 0,1 мм), установленной на рексолитовую 35-градусную призму со стрелой 52 мм, находящейся на расстоянии $x_w = -20$ мм.

5.2.1. Амплитуда зондирующего сигнала 100 В

Измерения в режиме FMC проводили с усилением 40 дБ, а в режиме PWI-T — с усилением 20 дБ. Амплитуда зондирующего импульса была равна 100 В. На рис. 7а показано FMC-изображение ПДО № 1, восстановленное по полному залпу, а на рис. 7б приведено PWI-T-изображение, восстановленное по 11 плоским волнам (акустическая схема TLLdTT). Изображения довольно близки друг к другу и имеют отношение сигнал/шум около 32 дБ, несмотря на то, что PWI-T-изображение восстановлено по 11 плоским волнам, что почти в шесть раз меньше, чем 64 выстрела, использованных для получения FMC-изображения. Использование решетки с большей апертурой повышает разрешающую способность изображений и уменьшает амплитуду ложных бликов, что видно при сравнении изображений на рис. 5 и рис. 7.

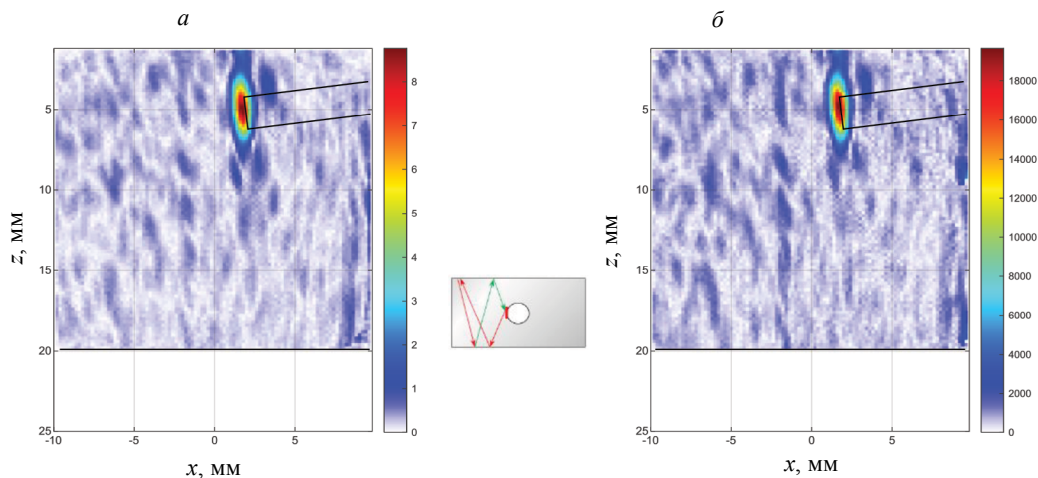


Рис. 7. FMC-изображение, восстановленное по 64 выстрелам (а), и PWI-T-изображение, восстановленное по 11 углам (б) (акустическая схема TLLdTT).

На рис. 8 показаны изображения, подобные тем, что представлены на рис. 7, но при восстановлении учитывался когерентный фактор. Изображения на рис. 8 близки друг к другу, но по сравнению с рис. 7 отношение сигнал/шум повысилось более чем на 20 дБ. Амплитуда ложного блика у поверхности образца на рис. 8б уменьшилась.

Как упоминалось в статье [7], изображение дна ПДО можно получить по нескольким акустическим схемам. На рис. 9 показано FMC-CF-изображение для акустической схемы TTTdTT, которое из-за того, что на каждом отрезке луча распространяется только поперечная волна, имеет разрешающую способность в два раза выше, чем на акустической схеме TLLdTT (см. рис. 8а). Однако у поверхности имеется ложный блик амплитуды около -8 дБ от блика ПДО, а эхосигналы на всех других акустических схемах формируют шум порядка -16 дБ от блика ПДО.

5.2.2. Амплитуда зондирующего сигнала 10 В

Следующий модельный эксперимент осуществлялся с целью показать большую устойчивость к белому шуму режима PWI. Измерения в режиме FMC проводились с усилением 60 дБ, а в режиме PWI-T — с усилением 54 дБ. Амплитуда зондирующего импульса была равна 10 В. На рис. 10а показано парциальное FMC-изображение, восстановленное по акустической схеме TLLdTT по эхосигналам 59 выстрела, на котором невозможно обнаружить блик ПДО № 1. На рис. 10б пред-

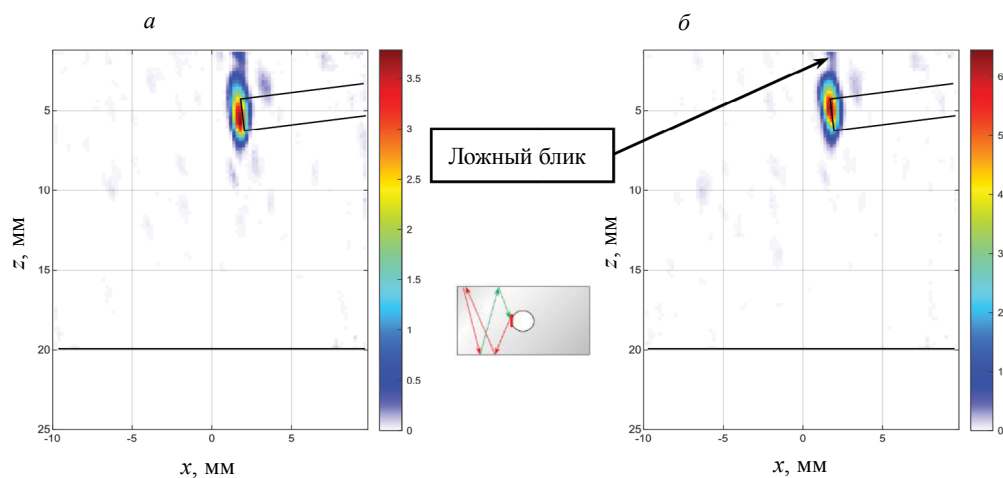


Рис. 8. FMC-CF-изображение, восстановленное по 64 выстрелам (а), и PWI-T-CF-изображение, восстановленное по 11 углам (б) (акустическая схема TLLdTT).

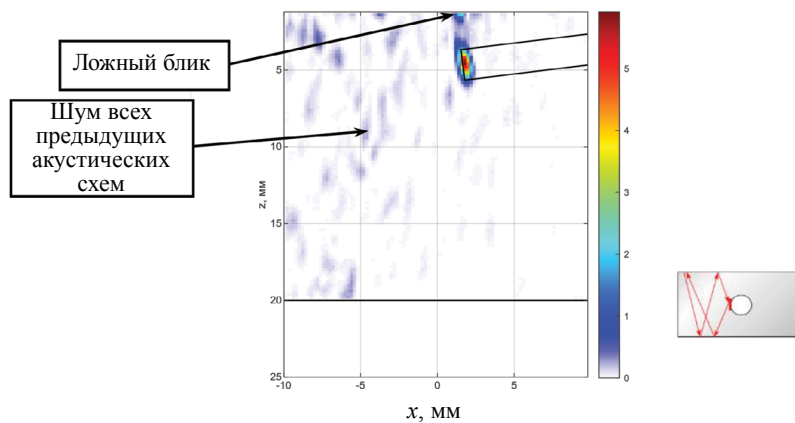


Рис. 9. FMC-CF-изображение для акустической схемы 9 (TTTdTT).

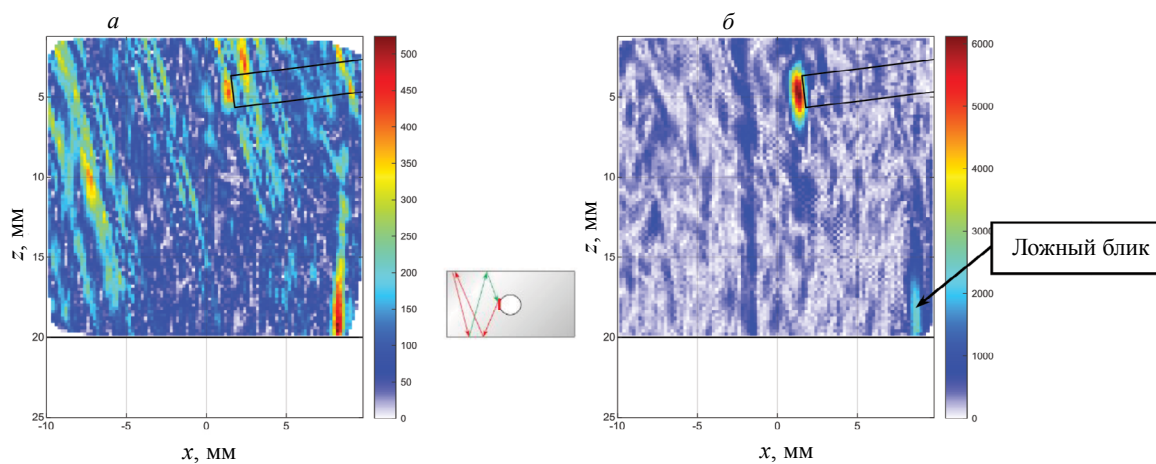


Рис. 10. Парциальное FMC-изображение для выстрела 59 (а) и парциальное PWI-T-изображения для плоской волны с углом 31 град (б) (акустическая схема TLLdTT).

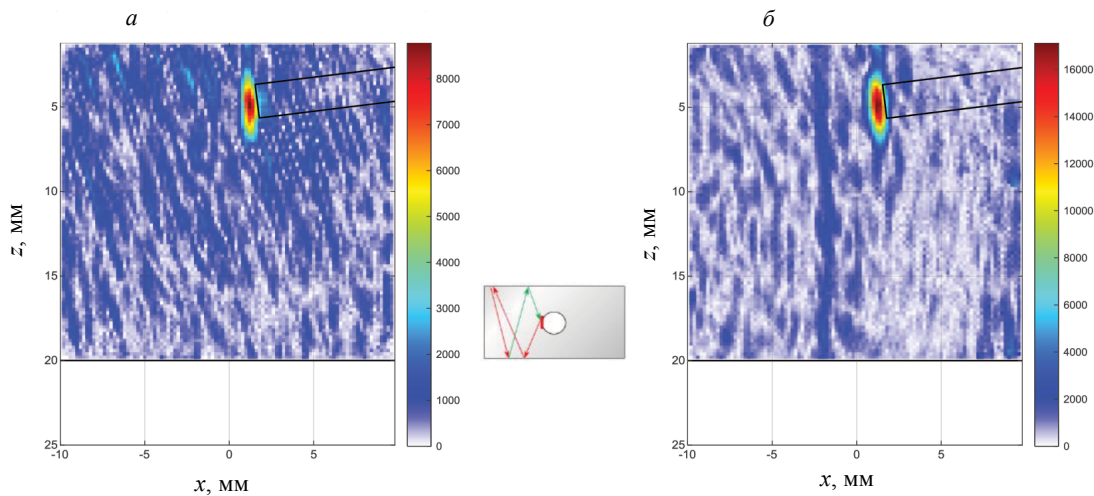


Рис. 11. FMC-изображение, восстановленное по 64 выстрелам (а), и PWI-T-изображение, восстановленное по 11 углам (б) (акустическая схема TLLdTT).

ставлено парциальное PWI-T-изображение, восстановленное по эхосигналам при излучении одной плоской волна с углом падения 31 град, на котором можно уверенно обнаружить блик ПДО № 1, так как имеет отношение сигнал/шум около 28 дБ.

На рис. 11а показано FMC-изображение ПДО № 1, восстановленное по эхосигналам полного залпа (акустическая схема TLLdTT). На нем, в отличие от рис. 10а, из-за эффекта усреднения повыстрельных изображений $I_m(\mathbf{r}_i; as, \mathbf{r}_w)$ отношение сигнал/шум возросло до 25 дБ, что позволило обнаружить блик ПДО № 1. На рис. 11б представлено PWI-T-изображение, восстановленное по 11 плоским волнам. Данное изображение довольно близко к изображению, полученному по излучению одной плоской волны (см. рис. 10а). Этот результат говорит о том, что подбор набора углов плоских волн является важной процедурой: для получения примерно одного уровня шума можно использовать всего одну плоскую волну (см. рис. 10б), но для уменьшения амплитуды ложного блика нужно около 10 плоских волн (см. рис. 11б). Полученный результат демонстрирует более высокую помехоустойчивость к белому шуму режима PWI.

6. ВЫВОДЫ

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

1. В численном эксперименте в режиме тройного сканирования для формирования PWI-L-CF-X-изображения для пяти положений АР понадобилось излучить всего 20 плоских волн. Для получения FMC-CF-изображения с таким же отношением сигнал/шум потребовалось 160 выстрелов.
2. Проведенные модельные эксперименты показывают, что в режиме PWI-T для 64-элементной антенной решетки с шагом 1 мм можно использовать около 10 углов излучения плоской волны с шагом 1 град. Подобное изображение в режиме FMC можно получить, используя 64 выстрела. Это означает, что скорость регистрации эхосигналов в режиме PWI можно увеличить в 6,4 раза по сравнению с режимом FMC. Для 128-элементной антенной решетки преимущества режима PWI перед режимом FMC будут еще заметнее.
3. Точность позиционирования антенной решетки относительно центра сварного соединения для PWI-контроле не такая критичная, как при ФАР-зональном контроле.
4. Определение набора акустических схем, варианта прореживания выстрелов для режима FMC или набора плоских волны для режима PWI для уменьшения объема измеренных эхосигналов проводится при разработке методики контроля конкретного объекта контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бадалян В.Г. Выявление и достоверность контроля в ультразвуковой дефектоскопии и дефектометрии // Контроль. Диагностика. 2020. № 7. С. 4—7. DOI: 10.14489/td.2020.07.pp.004-017

2. *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: 22.11.2022).
3. 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.
4. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—75.
5. ГОСТ Р ИСО 16826—2016 Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль. Выявление дефектов, перпендикулярных к поверхности.
6. *Mirmajid G. Codes for Automatic Ultrasonic Testing (AUT) of Pipeline Girth Welds* / 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014). Prague 2014. Oct. 6—11. URL: https://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/338_Ghaemi.pdf (дата обращения: 22.11.2022).
7. Bazulin A.E., Bazulin E.G., Vopilkin A.K., Tikhonov D.S. Reconstructing the image of reflectors at base-metal–weld interface using ultrasonic antenna arrays // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. No. 9. P. 739—752. [Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Восстановление изображения отражателей на границе основного металла и сварного соединения с использованием ультразвуковых антенных решеток // Дефектоскопия. 2021. № 9. С. 3—17.]
8. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Возможности оценки характера несплошности металла ультразвуковым томографом с цифровой фокусировкой антенной решетки // Контроль. Диагностика. 2011. № 10. С. 63—70.
9. Deleye X., Hörchens L., Chougrani K. Experimental comparison of wave-field based ultra-sonic imaging with other advanced ultrasonic weld inspection techniques / 18th World Conference on Nondestructive Testing. 16—20 April 2012. Durban. South Africa.
10. Chatillon S., Fidahoussen A., Iakovleva E., Calmon P. Time of flight inverse matching re-construction of ultrasonic array data exploiting forwards models / 6th Int'l Workshop. NDT Signal Processing. August 25—27. 2009. London. Ontario. Canada.
11. Budyn N., Bevan R., Zhang J., Croxford A.J., Wilcox P.D. A Model for Multiview Ultra-sonic Array Inspection of Small Two-Dimensional Defects // *IEEE Transactions on Ultra-sonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2019. V. 66. № 6. DOI: 10.1109/TUFFC.2019.2909988
12. Базулин Е.Г. Восстановление изображения отражателей методом C-SAFT при многократном отражении эхосигналов от границ цилиндрического объекта контроля // Дефектоскопия. 2013. № 2. С. 23—42.
13. van der Ent Jan, Fandika Ardian, Brisac Gaspard, Pinier Ludovic, Pomie Laurent. Validation and Qualification of IWEX 3D Ultrasonic Imaging for Girth Weld Inspection. Rio Pipeline Conference & Exhibition, 2017.
14. Avagyan V.K., Bazulin E.G. Increasing the Rate of Recording Echo Signals with an Ultrasonic Antenna Array Using Code Division Multiple Access Technology // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 11. P. 873—886. [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.]
15. Montaldo G., Tanter M., Bercoff J., Benech N., Fink M. Coherent plane wave 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
16. 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.
17. 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
18. Hunter A.J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. The wavenumber algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. 2008. V. 55. No. 11. P. 2450—2462. DOI:10.1109/tuffc.952
19. 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.
20. Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation // *NDT&E International*. 2005. V. 38. P. 701—711.
21. Базулин Е.Г. Учет анизотропных свойств сварного соединения при восстановлении изображения отражателей по эхосигналам, измеренным ультразвуковой антенной решеткой // Дефектоскопия. 2017. № 1. С. 11—25.
22. Kang S., Lee J., Chang J.H. Effectiveness of synthetic aperture focusing and coherence factor weighting for intravascular ultrasound imaging // *Ultrasonics*. 2021. V. 113. P. 106364. DOI:10.1016/j.ultras.2021.106364
23. Базулин Е.Г. Использование коэффициента когерентности для повышения качества изображения отражателей при проведении ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 2017. № 6. С. 5—17.

24. 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.
25. Официальный сайт фирмы EXTENDE. URL: <http://www.extende.com/> (дата обращения: 22.11.2022).
26. Bazulin E.G., Medvedev L.V. Increasing rate of recording of echo signals with ultrasonic antenna array using optimum sparsing of switching matrix with a genetic algorithm // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 11. P. 945—952. [Базулин Е.Г., Медведев Л.В. Повышение скорости регистрации эхосигналов ультразвуковой антенной решеткой за счет оптимального прореживания коммутационной матрицы с помощью генетического алгоритма // Дефектоскопия. 2021. № 11. С. 15—23.]
27. Официальный сайт фирмы «ЭХО+»: URL: <http://www.echoplus.ru/> (дата обращения: 22.11.2022).
-