

Повышение отношения сигнал/шум при проведении ультразвукового контроля ремонтных заварок с использованием технологии прореженных антенных решеток

Базулин Е.Г., Коколев С.А.

ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»

123458, Москва, ул. Твардовского, д. 8, Технопарк «Строгино»

E-mail: bazulin@echoplus.ru

В статье для контроля объектов из материалов с высоким уровнем структурного шума предлагается использовать прореженные антенные решетки, имеющие большую пространственную апертуру и состоящие из небольшого количества элементов расположенных на расстоянии друг от друга много больше, чем длина волны. Прореженная антенная решётка перемещается по поверхности объекта контроля, а эхосигналы регистрируются при излучении и приёме различными парами пьезопластин. Для каждой пары излучатель-приемник по измеренным эхосигналам методом SAFT восстанавливаются парциальные изображения, которые когерентно складываются для формирования итогового изображения. Разработана процедура калибровки каждой пьезопластины антенной решётки с целью определения координат её центра для эффективного когерентного сложения парциальных изображений. Процедура калибровки позволила снизить требования к точности размещения пьезопластин прореженной антенной решётки на призме. Использование технологии прореженных антенных решёток позволяет получать изображения дефектов в заварках с отношением сигнал/шум на 12 дБ большим, по сравнению с изображением, полученным по методике для одноэлементного преобразователя. В статье приведены результаты контроля образцов трубопроводов Ду800 с ремонтной заваркой в сварном шве. Показана эффективность данного метода в сравнении с методом, использующим одноэлементный пьезоэлектрический преобразователь.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, антенные решётки, 3D-M-SAFT, двойное сканирование, Full Matrix Capture, тройное сканирование, ремонтные заварки Ду800.

1. Введение

Контроль объектов с аустенитными или никельсодержащими ремонтными заварками, контроль сварных соединений в главных запорных задвижках (ГЗЗ) вызывает значительные трудности из-за высокого уровня структурного шума, который возникает из-за многократных переотражений зондирующего импульса от неоднородностей материала объекта контроля. Для уменьшения уровня шума часто применяют следующие простые приёмы: понижение частоты зондирующего импульса, что приводит к уменьшению чувствительности контроля и снижению разрешающей способности, использование продоль-

ных волн, что порождает большое количество ложных импульсов на поперечной волне, и уменьшение длины зондирующего импульса [1, 2].

Уменьшить влияние структурного шума можно и более сложными методами, используя когерентные методы восстановления изображения отражателей, например, с помощью метода проекции в спектральном пространстве (ПСП) [3]. Однако, применение этого метода возможно только при обработке эхосигналов, полученных с помощью пьезоэлектрических преобразователей, работающих в совмещенном [2] или раздельном режиме [4]. Как показано в работах [5, 6], минимальный уровень структурного шума при формировании изображения отражателей можно получить с помощью многоканальной пространственно-временной обработки эхосигналов. В общем случае, этот метод сводится к следующим этапам:

- регистрация эхосигналов в режиме двойного сканирования, при излучении и приеме между любыми каналами;
- оценка автокорреляционной функции $R(\Delta r)$ структурного шума данного объекта контроля;
- расчёт весовых коэффициентов, зависящих от вида автокорреляционной функции $R(\Delta r)$, для каждой пары излучатель-приёмник;
- восстановление изображения отражателей методом SAFT с найденными весовыми коэффициентами, что позволяет получить максимальное отношение сигнал/шум.

Предложенный в данной статье метод аналогичен рассмотренному выше, в предположении, что структурный шум имеет характеристики белого шума, что позволяет считать весовые коэффициенты равными единице.

Совершенствование технологий изготовления ультразвуковых антенных решёток (АР) и акустических многоканальных систем излучения и приёма ультразвука привело к созданию относительно дешёвых дефектоскопов, использующих технологию фазированных антенных решёток (ФАР). Их применение позволяет получать с частотой не менее 20 Гц изображения В-типа в объектах контроля, что вызвало огромный интерес у специалистов по ручному неразрушающему ультразвуковому контролю (УЗК) [7, 8].

Использование ФАР-дефектоскопов позволяет решать задачи по выявлению дефектов с измерением их высоты и протяженности с определением реальной конфигурации контролируемого сварного соединения (СС). Однако, для ряда практических приложений, применение ФАР-дефектоскопов может оказаться недостаточно эффективным. Примерами таких объектов являются объекты с толщиной более 200 мм, объекты с высоким уровнем структурного шума и объекты, внутри которых существуют области с различной скоростью звука.

Следует отметить, что с помощью АР можно проводить регистрацию эхосигналов в режиме двойного сканирования [9], когда регистрируются эхосигналы, излученные и принятые всеми парами элементов АР. В статье [13] регистрация эхосигналов методом двойного сканирования называется **Sampling Phased Array**, а в статье [10] - **Full Matrix Capture**. Так как элементы антенной решётки имеют размеры соизмеримые с длиной волны, и, следовательно, широкую диаграмму направленности [11], то удаётся измерить огромное количество импульсов на продольных и поперечных волнах, отражённых от дефекта на прямом луче, и после отражения от границ объекта контроля.

Один из алгоритмов, который позволяет обработать этот объем информации – метод **Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT)** или метод комбинированного SAFT (**C-SAFT**) [12, 13, 14] с учётом многолучевого распространения ультразвука в объекте контроля. В зарубежной литературе метод C-SAFT называется **Total Focusing Method (TFM)** [15].

Изображение, получаемое ФАР-дефектоскопом, имеет два недостатка, которые проявляются при удалении от линии фокусировки: смещение бликов, соответствующих отражателям, относительно их истинного положения и ухудшение фронтального разрешения. Эти особенности не позволяют использовать когерентное объединение изображений, полученных при разных положениях АР, для дополнительного повышения отношения сигнал/шум, так как они будут складываться не в фазе. Изображения, получаемые методом SAFT свободны от этих недостатков, так как имеет предельную разрешающую способность во всей области восстановления изображения (ОВИ) и их когерентное сложение будет повышать отношение сигнал/шум. В статье [16] было показано, что при сканировании антенной решёткой, работающей в режиме двойного сканирования, удаётся повысить отношение сигнал шум в ремонтной заварке более чем на 12 дБ, по сравнению с контролем одноэлементный пьезопреобразователем и последующем восстановлением изображения методом ПСП.

В настоящей статье предложена технология прореженных антенных решеток для контроля объектов с высоким уровнем структурного шума. Получено повышение отношения сигнал/шум на 12 дБ в сравнении с методикой предусматривающей применение одноэлементного преобразователя. Рассмотрен метод калибровки каждой пьезопластины антенной решётки, заключающийся в определении координат точечного источника, поле которого, в среднеквадратическом смысле, максимально совпадает с измеренным полем. Работоспособность предложенной технологии продемонстрирована во многих модельных экспериментах.

2. Получение изображений дефектов методом M-SAFT

Пусть объект контроля толщиной h с плоскопараллельными границами контролируется двумя разными преобразователями, движущимися синхронно (Рис. 1). Если передняя грань приёмника относительно центра системы координат xz расположена в точке \vec{r}_r , то координаты приёмника задаются вектором $\vec{r}_i = \vec{r}_r + \Delta\vec{r}$. Излучающий преобразователь изображён на Рис. 1 линиями красного цвета, а приёмник изображён линиями зелёного цвета. В результате сканирования по пространственной апертуре размерами A_x будут измерены эхосигналы $p(\vec{r}_i, \vec{r}_r, t)$, вид которых зависит от взаимного расположения излучателя и приёмника. Координаты центра пьезопластин излучателя и приёмника относительно передней грани корпуса преобразователя обозначим, как $(x_{t,w}, z_{t,w})$ и $(x_{r,w}, z_{r,w})$. Скорость звука в призмах преобразователей обозначим с помощью символа c_w . Символом c_o обозначим скорость распространения звука в объекте контроля. В общем случае ультразвуковой импульс может распространяться в виде продольной волны со скоростью звука c_l или в виде поперечной волны со скоростью c_t .

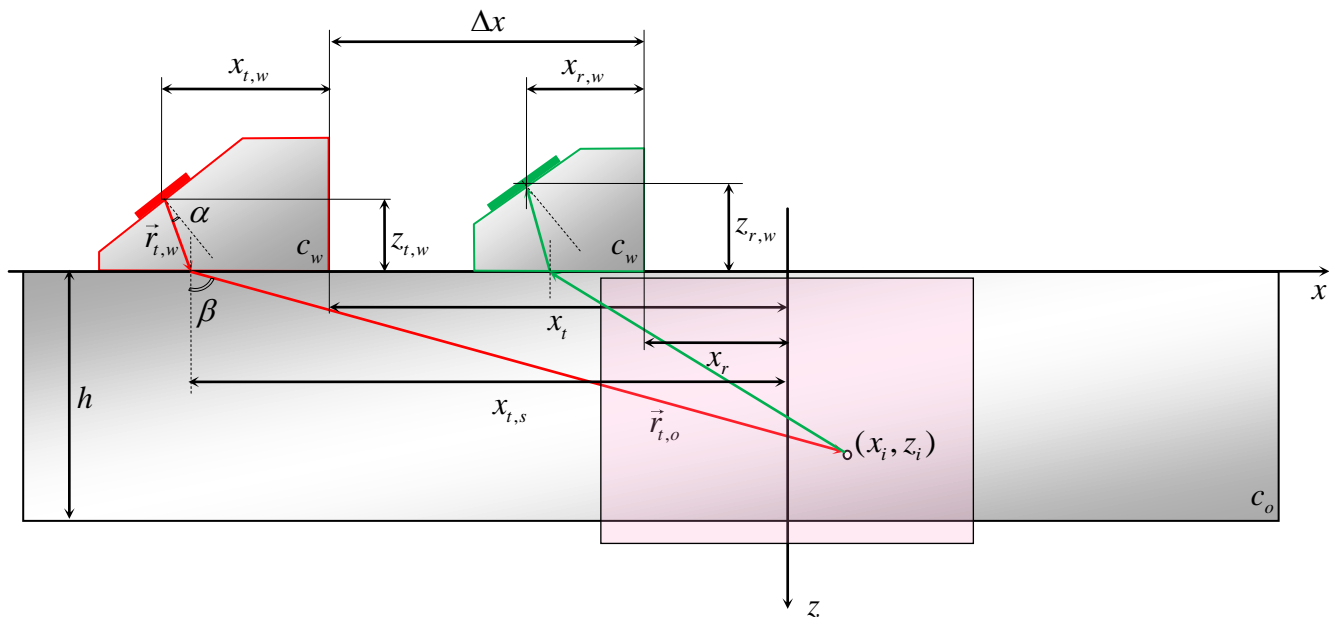


Рис. 1 Схема регистрации эхосигналов $p(\vec{r}_i, \vec{r}_r, t)$ двумя разными преобразователями. Квадратом розового цвета отмечена ОВИ.

Траекторию, по которой распространяется импульс при излучении до точки $r_i = (x_i, z_i)$ области восстановления изображения (ОВИ), можно описать в виде последовательности векторов $\{\vec{r}_{t,w}, \vec{r}_{t,o}\}$, а при приёме - в виде последовательности $\{\vec{r}_{r,w}, \vec{r}_{r,o}\}$ [22].

Время пробега импульса вдоль траектории при излучении и приёме можно записать в виде

$$t_i(\vec{r}_t, \vec{r}_i) = \frac{|\vec{r}_{t,w}|}{c_w} + \frac{|\vec{r}_{t,o}|}{c_o}, \quad t_r(\vec{r}_t, \vec{r}_i) = \frac{|\vec{r}_{r,w}|}{c_w} + \frac{|\vec{r}_{r,o}|}{c_o}. \quad (1)$$

Для определения пути распространения импульсов $\{\vec{r}_{t,w}, \vec{r}_{t,o}\}$ и $\{\vec{r}_{r,w}, \vec{r}_{r,o}\}$ можно воспользоваться принципом Ферма [17], гласящим, что свет (звук) распространяется из одной точки в другую в пространстве с заданным распределением скорости $c(x, z)$ по траектории с минимальным временем пробега. Такой подход позволяет учитывать многократные отражения от неровных границ объекта контроля, трансформацию типов волн при отражениях и преломлениях на границах разных сред. Таким образом, определив координату точки пресечения траектории $\{\vec{r}_{t,w}, \vec{r}_{t,o}\}$ с поверхностью объекта контроля $x_{t,s}$ (см. Рис. 1), длины векторов можно рассчитать по формулам

$$|\vec{r}_{t,w}| = \sqrt{(x_t + x_{t,w} - x_{t,s})^2 + z_{t,w}^2}, \quad |\vec{r}_{t,o}| = \sqrt{(x_i - x_{t,s})^2 + z_i^2}. \quad (2)$$

Расчёт времён задержек при излучении ультразвуковых импульсов $t_i(\vec{r}_t, \vec{r}_i)$ выполняется по формуле (1). Времена задержек при приёме определяются по аналогичным выражениям.

Набор эхосигналов $p(\vec{r}_r, \Delta\vec{r}, t) = p(\vec{r}_t, \vec{r}_i, t)$ будем считать комплексной функцией, к которой можно перейти от действительной функции с помощью преобразования Гильберта каждого эхосигнала. Получить оценку потенциала рассеивания $\hat{\varepsilon}(\vec{r})$ по измеренным эхосигналам $p(\vec{r}_r, \Delta\vec{r}, t)$ можно методом SAFT [18, 19]. Для этого, перебирая точки \vec{r}_i ОВИ, и, рассчитывая время задержек $t_i(\vec{r}_t, \vec{r}_i)$ и $t_r(\vec{r}_r, \vec{r}_i)$ согласно (1) и (2), можно получить оценку потенциала рассеивания по формуле

$$\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i; \vec{r}_r, \Delta\vec{r}) = \iint p(\vec{r}_r, \Delta\vec{r}, t) \delta(t - t_i(\vec{r}_t, \vec{r}_i) - t_r(\vec{r}_r, \vec{r}_i) + t_{\max}) d\vec{r}_i dt, \quad (3)$$

где t_{\max} - время нарастания эталонного сигнала $s(t)$. Смысл данной формулы заключается в том, что для заданной точки \vec{r}_i , в соответствии с рассчитанными задержками $t_i(\vec{r}_t, \vec{r}_i)$ и $t_r(\vec{r}_r, \vec{r}_i)$, выбираются и когерентно суммируются значения измеренных эхосигналов $p(\vec{r}_r, \Delta\vec{r}, t)$. Для анализа изображения дефектов обычно используют модуль комплексной функции $\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i; \vec{r}_r, \Delta\vec{r})$, которая будет называться парциальным изображением,

$$I(\vec{r}_i; \vec{r}_r, \Delta\vec{r}) = |\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i; \vec{r}_r, \Delta\vec{r})|.$$

Очевидно, что изменяя расстояние между излучателем и приёмником $\Delta\vec{r}_n$, регистрируя новый набор эхосигналов $p(\vec{r}_r, \Delta\vec{r}_n, t)$, восстанавливая изображение дефектов по

формуле (3) можно получить множество парциальных изображений. С технической точки зрения процесс регистрации эхосигналов можно реализовать с помощью антенной решётки, состоящей из M пьезоэлементов и работающей в режиме двойного сканирования, которая механически перемещается по поверхности объекта контроля. Такой режим в работе [16] называется режимом тройного сканирования. В каждом положении антенной решётки регистрируются эхосигналы для всех $N = M^2$ пар пьезоэлементов антенной решётки. Понятно, что излучение импульса первым элементом и приём эхосигнала вторым, практически эквивалентно излучению элементом номер два и приёмом первым элементом. Поэтому количество независимых акустических схем будет равно

$$N = \frac{(M + 1)M}{2}. \quad (4)$$

Отметим, что вместо одной антенной решётки можно использовать несколько многоэлементных преобразователей или несколько антенных решёток или матриц.

Когерентно складывая все парциальные изображения, полученные согласно (3), можно получить итоговое изображение по формуле

$$I(\vec{r}_i) = \left| \sum_{n=1}^N \hat{\varepsilon}(\vec{r}_i; \vec{r}_r, \Delta\vec{r}_n) \right|. \quad (5)$$

Алгоритм восстановления изображения отражателей согласно формуле (5) будем называть **M-SAFT**. Итоговое изображение $I(\vec{r}_i)$, полученное по формуле (5), обладает рядом преимуществ перед парциальными изображениями $I(\vec{r}_i; \vec{r}_r, \Delta\vec{r}_n)$. Так как для контроля объектов из материалов с высоким уровнем структурных шумов используют продольные волны, то на изображениях будут присутствовать ложные блики, сформированные импульсами на поперечных волнах. Причём амплитуда ложных бликов может быть соизмерима с амплитудой бликов, полученных на продольных волнах. По этой причине, анализ изображений $I(\vec{r}_i; \vec{r}_r, \Delta\vec{r})$ крайне затруднён. Когерентное сложение (5) позволяет понизить уровень амплитуд этих ложных бликов более чем на 12 дБ. Чем больше расстояние $\Delta\vec{r}$ между первым и последним элементом антенной решетки, тем эффективнее происходит уменьшение амплитуд ложных бликов рассмотренной природы. Фронтальная разрешающая способность изображения будет определяться размерами уже не антенной решётки, а размерами пространственной апертуры A_x . Сканирование вдоль оси x позволяет сделать шаг между элементами антенной решётки δx много больше, чем длина волны, не увеличивая уровень ложных бликов, сформированных из-за высокого уровня «боковых лепестков» антенной решётки. Поэтому антенные решётки с шагом $\delta x \gg \lambda$ в дальнейшем будут называться **прореженными** антенными решётками (ПРАР).

Если координаты центров пьезопластин известны с точностью менее $\lambda/4$, то когерентное сложение по формуле (5) будет неэффективным. В этом случае итоговое изображение можно получить, суммируя модули парциальных изображений по формуле

$$I(\vec{r}_i) = \sum_{n=1}^N |\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i; \vec{r}_r, \Delta\vec{r}_n)|. \quad (6)$$

Однако, подавление фантомных бликов в этом случае будет не таким эффективным, как в случае когерентного сложения (5).

Аппаратуру для регистрации эхосигналов достаточно легко разработать и изготовить на современной элементной базе, а вычислительная техника позволяет быстро восстанавливать изображения дефектов предложенным методом M-SAFT. Так, например, на графической плате с технологией CUDA [20, 21], позволяющей распараллеливать вычисления, скорость расчёта удалось увеличить в **тысячу** раз. Более качественные изображения, получаемые методом M-SAFT, должны позволить построить надёжную систему автоматизированного контроля с распознаванием типа дефектов и определения их размеров.

3. Калибровка многоэлементного преобразователя

Для выполнения экспериментов по выше изложенной методике был изготовлен пьезоэлектрический преобразователь типа 6L2.5H45T55 для работы на продольных волнах на частоте 2.5 МГц с шестью пьезопластинами ($M = 6$, $\delta x \approx 5.5$ мм), эскиз которого представлен на Рис. 2. Пьезопластины имеют размеры 4 на 12 мм, что позволяет сформировать диаграмму направленности в плоскости xz шириной более 50 градусов по уровню 0.1.

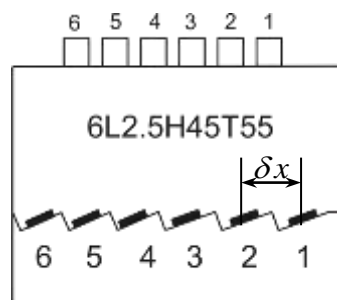


Рис. 2 Эскиз шестиэлементного пьезоэлектрического преобразователя типа 6L2.5H45T55.

Первые три пластины предназначены для ввода продольной волны под углом 45 градусов, а пластины с номерами от четырёх до шести – под углом 55 градусов. Угол ввода у последних трех пластин сделан больше для более эффективного пересечения их диаграмм направленности с диаграммами направленности первых трёх пластин. При использовании преобразователя такого типа, можно получить, согласно формуле (6), **двадцать**

одно парциальное изображение, которые можно использовать для формирования итогового изображения по формуле (5). Если координаты центров пьезопластин (x_w, z_w) известны с точностью не меньше чем $\lambda/8$, то ошибка фазы парциальных изображений будет меньше чем $\pi/2$, и когерентное сложение парциальных изображений согласно (5) будет эффективным. Процесс поиска координат (x_w, z_w) с означенной точностью называется калибровкой.

Процедура калибровки заключается в следующем. На первом этапе многоэлементный преобразователь перемещается по поверхности образца для регистрации эхосигналов, отражённых от отверстия бокового сверления диаметром d_{SDH} с центром в точке $(0, z_{SDH})$. Для калибровки можно использовать эхосигналы $p_n(x, t)$ отражённые от отверстия диаметром 6 мм в образце СО-2, зарегистрированные для каждого элемента преобразователя, работающего в совмещённом режиме. На втором этапе для пьезопластины с номером n рассчитывается оценка принятого эхосигнала $\hat{p}(x, t; x_{n,w}, z_{n,w})$ в предположении, что точечный отражатель находится в точке $(0, z_{SDH})$, а приём и излучение происходят в точке с координатами $(x_{n,w}, z_{n,w})$ относительно передней грани преобразователя. Те значения координат «точечного пьезоэлемента» $(x_{n,w}, z_{n,w})$, которые доставляют минимум выражению

$$\left\| p_i(x, t + \frac{d_{SDH}}{c_0}) - \hat{p}(x, t; x_{n,w}, z_{n,w}) \right\|_{(x_{n,w}, z_{n,w})} \rightarrow \min, \quad (7)$$

и будут считаться результатом калибровки. Проводя аналогичную процедуру для всех пьезопластин ПРАР, можно определить все координаты эквивалентных точечных пьезоэлементов относительно передней грани преобразователя.

Очень важная особенность разработанной процедуры калибровки состоит в том, что можно провести калибровку нескольких произвольных многоэлементных преобразователей, установленных в специальную обойму для их жёсткой фиксации. После определения координат центров пьезопластин можно когерентно складывать парциальные изображения для всех пар синтезированной прореженной антенной решётки согласно (5). Такой подход может оказаться очень эффективным при контроле толстостенных объектов или при многократных отражениях от границ объекта контроля, когда прореженную антенную решётку можно будет набирать из нескольких многоэлементных преобразователей.

На Рис. 3 представлен график с координатами центров пьезопластин, согласно чертежу призмы и определенных по результатам калибровки. Как видно из графика, коор-

динаты определённые по чертежу и по результатам калибровки могут отличаться на 0.2 мм по оси z , что составляет $1/5$ длины волны в призме из плексигласа, и более чем на 1 мм по оси x .



Рис. 3 Координаты центров пьезопластин по чертежу и по результатам калибровки

Если под эффективностью когерентного сложения подразумевать отношение амплитуды блика при сложении парциальных изображений точечного дефекта по модулю (6) к амплитуде блика после когерентного сложения (5), то после калибровки эффективность когерентного сложения была более 90%.

При отработанной технологии изготовления многоэлементных преобразователей, от процедуры калибровки можно отказаться. Однако, для контроля качества фокусировки будет необходимо периодически проводить измерения на специальном тест-образце, и сравнивать восстановленное изображение с эталонным. Если разница между изображениями будет меньше допустимой, то многоэлементный преобразователь признаётся годным для проведения контроля. В противном случае необходимо провести его повторную калибровку и проверку качества фокусировки на специальном тест-образце.

Немаловажным аспектом является и то, что изготовление прореженных антенных решёток существенно проще, чем изготовление антенных решёток. Как следствие, прореженные антенные решётки могут быть существенно дешевле антенных решёток используемых в ФАР-дефектоскопах.

4. Модельный эксперимент

Модельные эксперименты проводились с помощью когерентного ультразвукового дефектоскопа серии «Авгур», разработанного и изготавливаемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+».

4.1. Тест-образец с отверстиями бокового сверления

Измерения производились на тест-образце, который представляет из себя стальной блок с размерами $210 \times 30 \times 59$ мм с восемью отверстиями бокового сверления диаметром 2 мм, расположенными на разных глубинах и отверстием диаметром 6 мм, расположенным на глубине 44 мм.

На Рис. 4 представлены изображения, полученные на этом тест-образце по технологии ПРАР. Слева – изображение, полученное по схеме $1 \rightarrow 1$ (пластина №1 – излучатель и приемник), справа – объединенное изображение по всем каналам согласно формуле (6). При восстановлении изображений использовалась схема $T(L)-T(L)$, согласно правилам обозначения изложенным в статье [22]. На обоих изображениях отчетливо видны блики, соответствующие всем отверстиям. Однако на изображении слева присутствуют ложные блики с большой амплитудой, сформированные импульсами, соответствующими поперечным волнам (акустическая схема $T(S)-T(S)$). При данной схеме восстановления эти блики никакой полезной информации не несут и являются, по сути дела, шумовыми. В результате когерентного сложения изображений по всем схемам, отношение сигнал/шум повысилось на 16 дБ, по сравнению с изображением, полученным по схеме $1 \rightarrow 1$. На изображении линиями чёрного цвета нанесены контуры отверстий бокового сверления и границы образца.

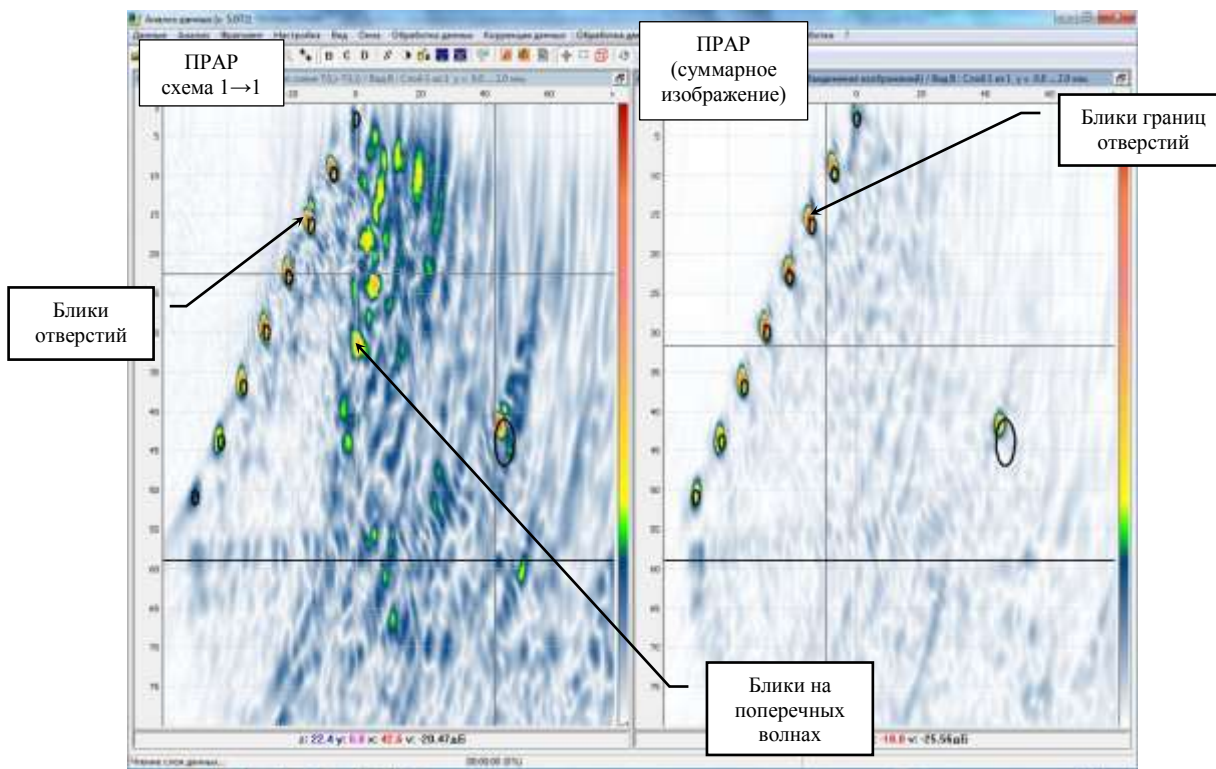


Рис. 4 Изображения, полученные на образце с отверстиями бокового сверления по технологии ПРАР. Слева – по схеме 1→1, справа – суммарное изображение.

4.2. Образец ДУ800 с усталостной трещиной в сварном шве

Были проведены измерения на образце, представляющим собой фрагмент сварного шва трубопровода ДУ800 в котором была «накачана» усталостная трещина. На Рис. 5 представлено изображение, полученное по технологии и с применением ФАР-дефектоскопа «Х-32». При контроле в режиме ФАР-дефектоскопа использовалась антенная решётка PE-5.0M32E0.8P (количество элементов 32, расстояние между центрами элементов 0.8 мм, частота 5 МГц) и призма T1-35W0R-1 (материал – рексолит, угол ввода в сталь – 52 градуса). Справа представлено изображение, полученное по технологии ПРАР по схеме **T(L)-T(L)**, слева – изображение, полученное в режиме ФАР-дефектоскопа с фокусировкой на глубину 30 мм. На изображения линиями красного цвета наброшены контуры трещины и границы образца.

На обоих изображениях отчетливо видны блики, соответствующие верхнему и нижнему краям висячей трещины. На изображении, полученном с в режиме ФАР-дефектоскопа, присутствует реверберационный шум, который возможно удалить только с использованием специальной обработки, например, с помощью вычитания медианного шаблона В-типа. Этот шум, при наложении на блик от дефекта, может исказить его форму и амплитуду. Так же на изображении слева видна граница наплавки, которой на изображении справа не видно. Это объясняется тем, что в режиме ФАР-дефектоскопа

использовалась антенная решетка на 5 МГц и призма для работы на поперечных волнах. Этим же объясняется и то, что на изображении, полученном ФАР-дефектоскопом, выше лучевая разрешающая способность.

На изображении справа, полученном по технологии ПРАР, присутствуют ложные блики большой амплитуды, сформированные по акустическим схемам **T(L)-TB(LL)** и **T(L)-TB(SL)**. Имея информацию о реальной толщине образца, можно получать максимально сфокусированные изображения отражателей при контроле с использованием данных акустических схем [22]. Это позволит получить дополнительную информацию о типе и размере несплошности.

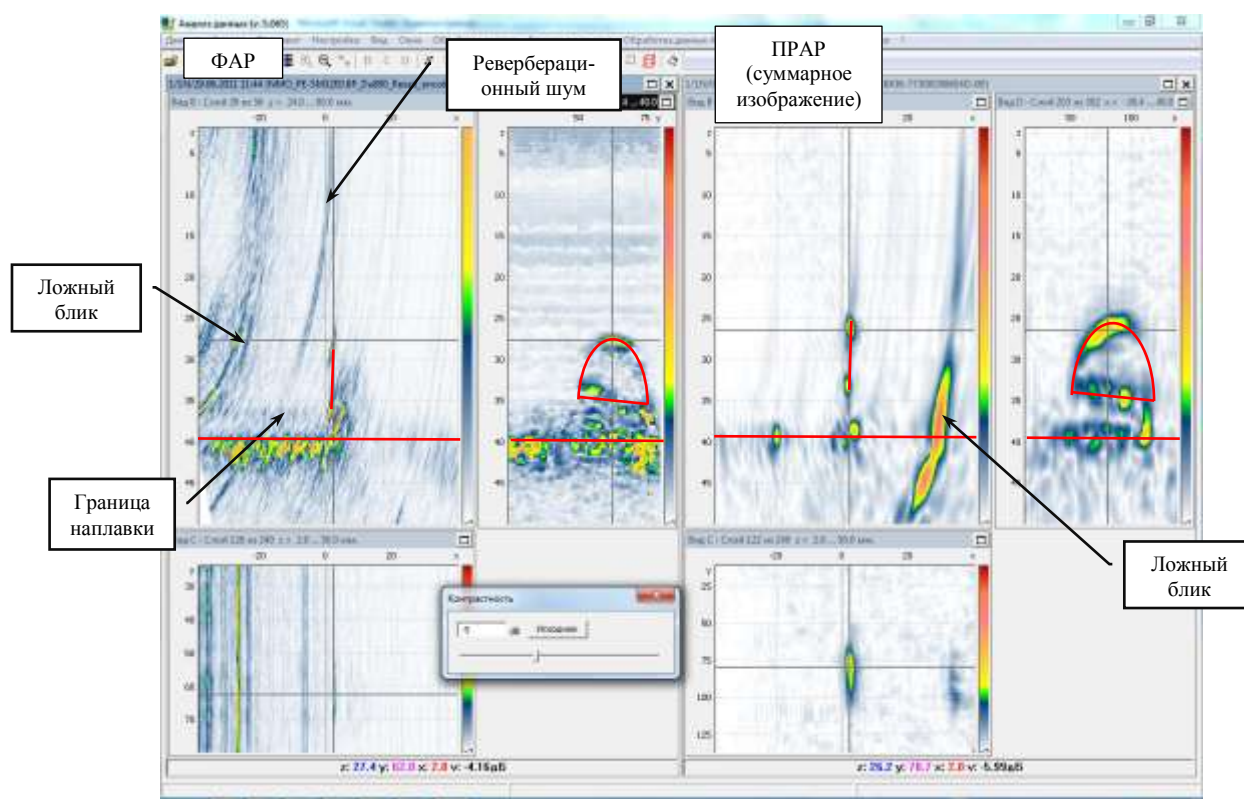


Рис. 5 Изображения усталостной трещины в сварном шве ДУ800. Слева – в режиме ФАР-дефектоскопа, справа – по технологии ПРАР.

4.3. Образец ДУ800 с ремонтной заваркой

Для проверки эффективности разработанного алгоритма были проведены измерения на фрагменте трубопровода ДУ800 с аустенитной ремонтной заваркой, в котором были выполнены придонные пазы, отверстия бокового сверления и два плоскодонных отверстия.

Сложность контроля объектов такого типа заключается в том, что при одностороннем контроле необходимо выявлять дефекты находящиеся за заваркой, скорость распространения ультразвуковых волн в которой отличается от скорости в основном металле трубопровода. Например, в исследуемом образце скорость звука в

основном металле была равна 3.23 мм/мкс, а в заварке – 3.1 мм/мкс. Если при восстановлении изображения эту разницу не учитывать, то изображение получается менее сфокусированным.

На Рис. 6 представлены изображения, восстановленные по технологии ПРАР. Слева – суммарное изображение по всем 21 схемам, справа – парциальное изображение, полученное по схеме 2→5 (пластина №2 – излучатель, №5 – приемник). На изображениях линиями зеленого цвета показана граница объекта контроля, а красными линиями – контуры пазов. На обоих изображениях видны блики, соответствующие корню придонного паза. Но на правом изображении этот блик виден с отношением сигнал/шум 20 дБ, а на левом только 12 дБ, что особенно хорошо видно на изображениях D-типа. Ложный блик, сформированный импульсами по акустическим схемам **T(L)-ТВ(LL)** и **T(L)-ТВ(SL)**, на парциальном изображении имеет амплитуду соизмеримую с бликом от пропила. А вот на изображении, восстановленном по технологии ПРАР, этот блик практически исчез.

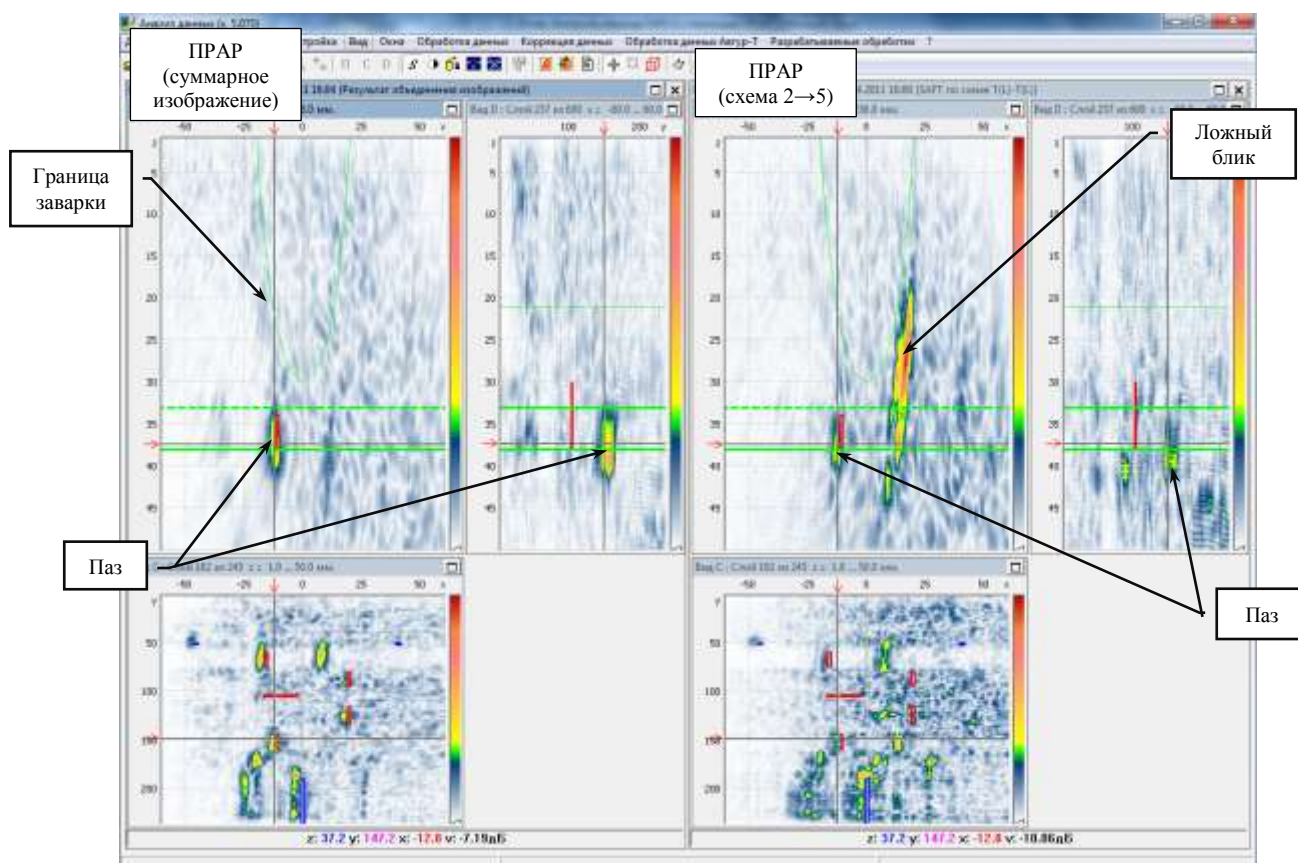


Рис. 6 Изображения придонного паза перед заваркой, полученные на образце ДУ800 с ремонтной заваркой по технологии ПРАР. Слева – суммарное изображение, справа – по схеме 2→5.

На Рис. 7 представлены изображения, полученные на образце ДУ800 с ремонтной заваркой. Слева представлено суммарное изображение по технологии ПРАР, справа – по

стандартной методике с использованием преобразователя 2L2R45 (частота 1.8 МГц, угол ввода 45 градусов), при восстановлении изображения методом 2D ПСП. Линиями зеленого цвета показана граница объекта контроля, а красными линиями – контуры пазов. На изображении, полученном по технологии ПРАР, отчетливо видны блики, соответствующие верхним и нижним краям пазов с номерами 1 и 2, расположенных за заваркой. Для того, чтобы на изображении полученному по стандартной методике увидеть блики, соответствующие нижним краям пропилов, контрастность изображения пришлось увеличить на 10 дБ, но бликов, соответствующих вершинам пазов, обнаружить не удалось. Повышение отношения сигнал/шум особенно хорошо заметно на изображениях С-типа.

На изображении полученном по технологии ПРАР (слева) видна граница заварки. Это позволяет, определив реальный профиль заварки и зная скорость звука в ней, получить максимально сфокусированные изображения отражателей, расположенных за заваркой. Алгоритм восстановления изображения дефектов в объекте контроля с областями с разными скоростями звука рассмотрен в статье [23].

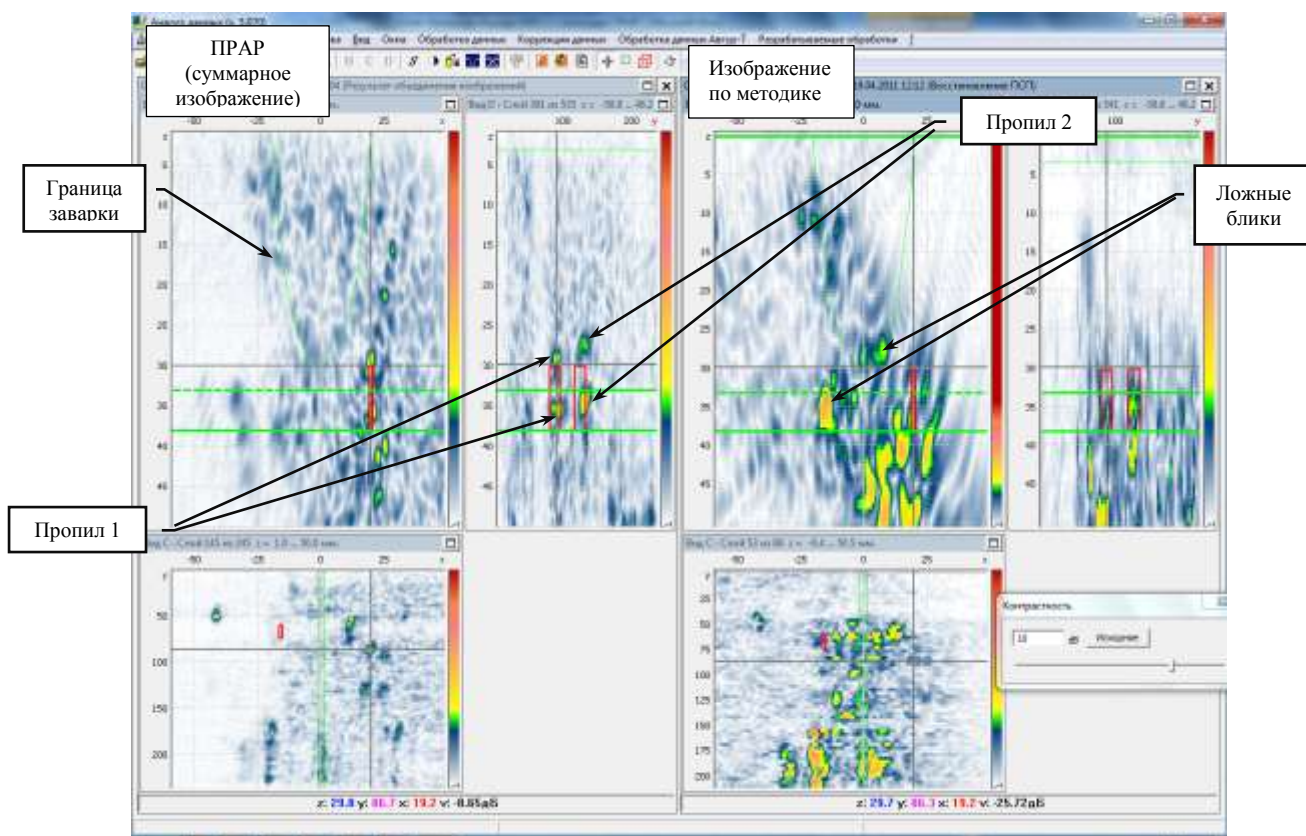


Рис. 7 Изображения двух придонных пазов за заваркой, полученные на образце ДУ800 с ремонтной заваркой по технологии ПРАР (слева) и по стандартной методике (справа).

Представленные выше изображения были получены в предположении, что по одному слою с эхосигналами восстанавливается один слой с изображениями по формулам (3) и (6). Метод M-SAFT для обеспечения максимальной фокусировки не только в

основной, но и в дополнительной плоскости преобразователя, легко обобщается на трёхмерный случай. Суть метода 3D-M-SAFT заключается в том, для формирования одного слоя изображения, используется не один, а несколько слоёв исходных эхосигналов. Их количество определяется шириной диаграммы направленности преобразователя в дополнительной плоскости. Технологию получения изображения указанным выше способом мы будем называть 3D-M-SAFT.

На Рис. 9 представлены изображения придонного паза, полученные по технологии M-SAFT и 3D-M-SAFT на образце ДУ800 с ремонтной заваркой. На обоих изображениях видны блики, соответствующие корню и верхнему краю паза. Как видно, после применения 3D обработки разрешающая способность вдоль оси y возросла примерно в два раза. К сожалению, ложный блик, сформированный по акустической схеме **T(L)-TB(LL)**, ни формы, ни амплитуды практически не изменил.

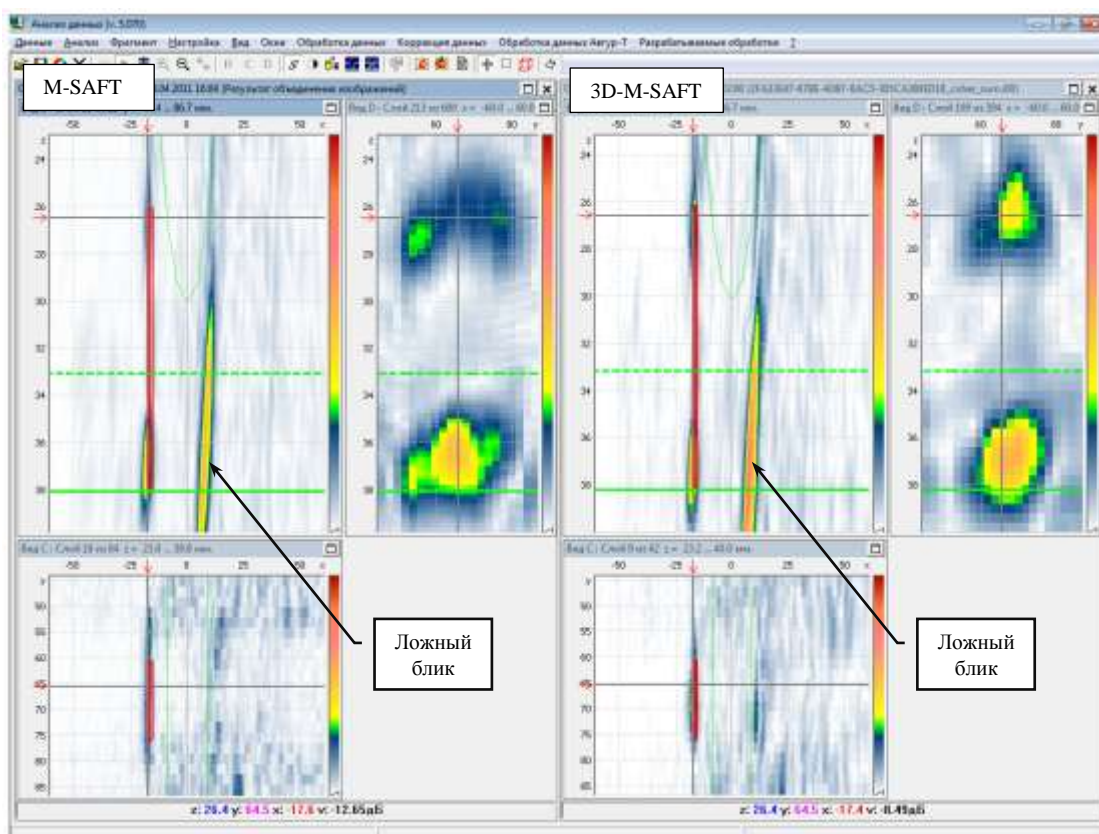


Рис. 8 Изображения паза, полученные на образце ДУ800 с ремонтной заваркой по технологии M-SAFT в режиме 2D (слева) и 3D (справа).

На Рис. 8 представлены изображения дна плоскодонного отверстия диаметром 1,6 мм (площадь 2 мм²) в тест-образце, полученные по технологии ПРАР и по стандартной методике с использованием преобразователя 2L2R45 (частота 1.8 МГц, угол ввода 45 градусов) при восстановлении изображения методом 2D ПСП. На оба изображения линиями синего цвета нанесены контуры плоскодонного отверстия. На изображении слева

виден блик, соответствующий дну плоскодонного отверстия. Его амплитуда превышает уровень шума на 6 дБ. На изображении справа не наблюдается бликов, соответствующих плоскодонному отверстию.

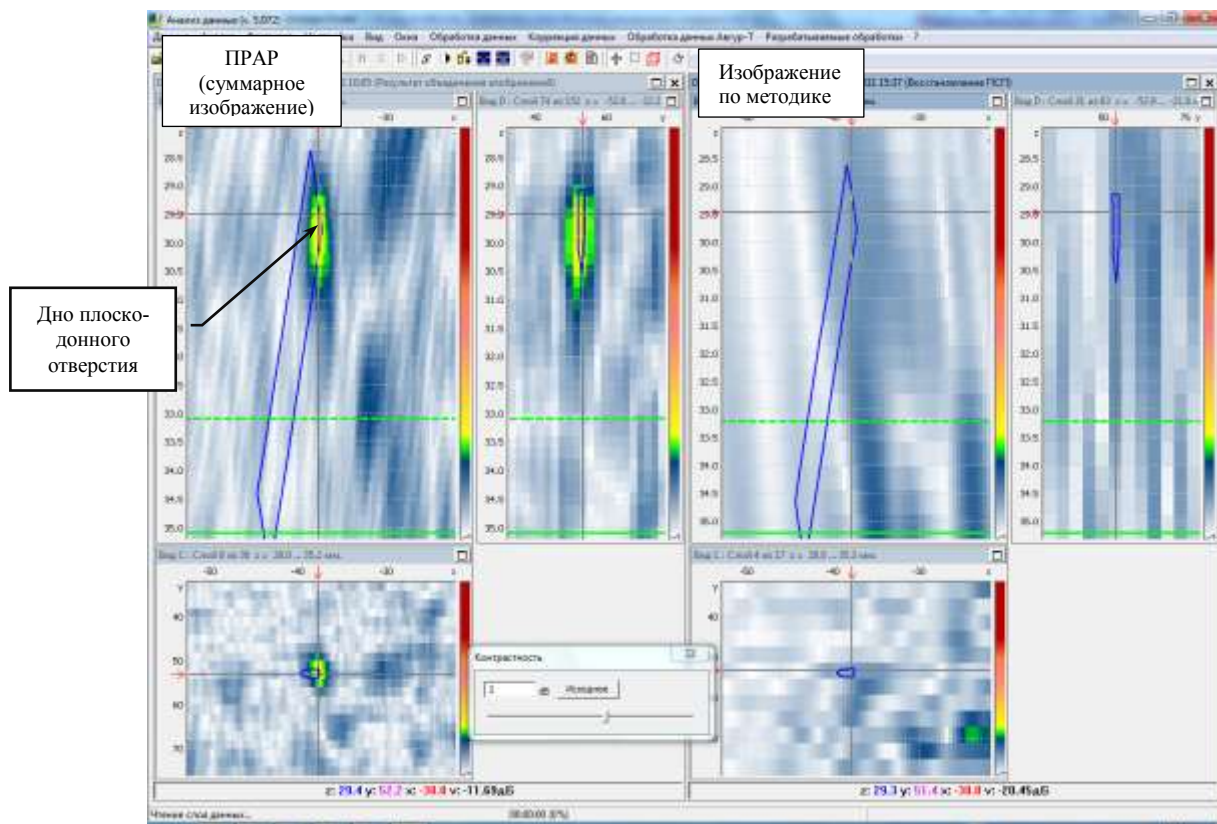


Рис. 9. Изображения плоскодонного отверстия за заваркой, полученные на образце ДУ800 с ремонтной заваркой по технологии ПРАР (слева) и по стандартной методике (справа).

5. Выводы

Подводя итоги исследований изложенных в представленной статье, можно сделать следующие выводы:

- Технология ПРАР в 2D варианте, и тем более в 3D-варианте, показала лучший результат в сравнении со стандартной методикой контроля ремонтных заварок, использующей одноэлементный преобразователь.
- На изображениях, полученных по технологии ПРАР, отношение сигнал/шум для бликов от пазов за заваркой, на 12 дБ больше, чем при использовании стандартной методики контроля ремонтных заварок с использованием одноэлементного ПЭП.
- 3D обработка дополнительно увеличивает отношение сигнал/шум как минимум на 3 дБ, а разрешающая способность вдоль оси y повышается в 1.5–2 раза.

Список литературы

- 1 Ермолов И.Н. К вопросу о выборе оптимальных параметров эхо-метода ультразвуковой дефектоскопии. – Дефектоскопия, 1965, №6, с. 51-61.
- 2 Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вовилкин А.Х., Гребенников Д.В., Тихонов Д.С. Применение методов сверхразрешения при экспертном контроле сварных швов трубопроводов АЭС. - Дефектоскопия, 2000, №1, с. 58-65.
- 3 Бадалян В.Г., Базулин Е.Г. Цифровое восстановление изображения рассеивателей методом проекции в спектральном пространстве. - Акустический журнал, 1988, XXXIV, № 2, с. 222-231.
- 4 Базулин Е.Г., Когерентное восстановление изображений дефектов при регистрации эхо-сигналов в раздельном режиме. - Дефектоскопия, 2005, №11, с. 80-96
- 5 Кремер И.Я., Кремер А.И., Петров В.М. и др. Пространственно-временная обработка сигналов. Под ред. Кремера И.Я. - М.: Радио и связь, 1984, 223 с.
- 6 Карташев В.Г., Качанов В.К., Шалимова Е.В. Основные положения теории пространственно-временной обработки сигналов применительно к задачам ультразвуковой дефектоскопии изделий из сложноструктурных материалов. - Дефектоскопия, 2010, №4, с. 19–29.
- 7 Дефектоскоп «Х-32», <http://www.harfang.ru/content/x-32.html>
- 8 Дефектоскоп «OmniScan MX», <http://www.olympus-ims.com/ru/omniscan-mx/>
- 9 Базулин Е.Г., Голубев А.С., Коколев С.А. Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхосигналов методом двойного сканирования для получения изображений дефектов. - Дефектоскопия, 2009, №2, с. 18-32.
- 10 Chatillon S, Fidahoussen A, Iakovleva E, Calmon P Time of flight inverse matching reconstruction of ultrasonic array data exploiting forwards models. - NDT in Canada 2009 National Conference, Aug 25-27, 2009.
- 11 Данилов В.Н., Самокрутов А.А., Люткевич А.М. Теоретические и экспериментальные исследования малоапертурных прямоугольных преобразователей. М.: Машиностроение. Контроль. Диагностика. – 2003. № 7. с. 29 – 33.
- 12 Дефектоскоп A1550 IntroVisor, <http://www.introvisor.ru/>
- 13 Bulavinov A., Dalichow M., Kröning M., Kurz J. H., Walte F. and Reddy K., Quantitative Ultrasonic Testing of Pressurized Components Using Sampling Phased Array. - Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation Dec. 7 - 9, 2006, Hyderabad, p, 437-448.

-
- 14 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.
 - 15 Jobst M., Connolly G.D Demonstration of the Application of the Total Focusing Method to the Inspection of Steel Welds. - 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow, 2010, June 07-11.
 - 16 Базулин Е.Г. Контроль заварок Ду800 антенными решётками методом тройного сканирования. - Дефектоскопия, 2010, №7(46), с. 30–41.
 - 17 Борн М., Вольф Э. Основы оптики: Пер. с англ. Изд.2, испр. М.: Наука, 1973. 720 с.
 - 18 Cheney M., Borden B. Problems in synthetic-aperture radar imaging. – Inverse Problems, 2009, № 25.
 - 19 Schmitz, V.; Chakhlov, S.; Müller, W. Experiences with synthetic aperture focusing in the field. - Ultrasonics, Vol. 38, 2000, pp. 731–38.
 - 20 Технология NVIDIA CUDA™, http://www.nvidia.ru/object/cuda_what_is_ru.htmlCUDA.
 - 21 Боресков А. Харламов А, Основы работы с технологией CUDA – М.: ДМК-Пресс, 2010, 232 с.
 - 22 Базулин Е.Г. Определение типа дефекта по изображениям, полученным методом C-SAFT, с учетом трансформации типов волн при отражении ультразвуковых импульсов от неровных границ объекта контроля. - Дефектоскопия, 2011, №1, с. 39–56.
 - 23 Базулин Е.Г. Получение изображения дефектов методом SAFT с учётом переменной скорости звука в объекте контроля. - Дефектоскопия, 2011, №11, с. 3-13.