

Учёт неровной поверхности при получении изображения отражателей методом цифровой фокусировка антенной (ЦФА)

Введение

При подготовке к проведению ультразвукового контроля поверхность объекта часто подвергается механической обработке, например, для удаления защитных красок. В результате на поверхности может образоваться множество впадин глубиной до нескольких миллиметров и протяжённостью несколько десятков миллиметров. Для проведения автоматизированного ультразвукового контроля некогерентными методами наличие таких неровных участков не критично, но для когерентного ультразвукового контроля неровности поверхности уже в четверть длины волны может заметно исказить восстановленное изображение несплошностей.

Для восстановления изображения отражателей по эхосигналам, измеренным в режиме двойного сканирования, часто используется метод C-SAFT, который можно модернизировать для учёта неровной поверхности объекта контроля. В работе [1] восстановление изображения отражателей методом C-SAFT по эхосигналам, измеренным в режиме двойного сканирования, предложено называть цифровой фокусировкой антенной решёткой (ЦФА). Восстановление изображения по эхосигналам, измеренным при сканировании антенной решёткой вдоль оси x , будем называть методом ЦФА-Х.

На первом этапе метода ЦФА, полагая, что скорость звука в объекте контроля такая же, как и в локальной иммерсионной ванне, по измеренным эхосигналам восстанавливается изображение поверхности. По нему оценивается форма профиля поверхности. На втором этапе, в методе C-SAFT можно провести расчёт времён задержек распространения эхосигналов с учётом профиля поверхности и восстановить изображение отражателей по тем же эхосигналам. Такой подход не требует изменения аппаратных средств ЦФА-дефектоскопа. Такой режим работы реализован в многоканальном дефектоскопе GEKKO [2] и называется Adaptive Total Focusing Method (ATFM).

Модельные эксперименты

Измерения проводились ЦФА-дефектоскопом АВГУР-АРТ, разработанным и изготавливаемым в научно-производственном центре «ЭХО+».

Тест-образец с имитацией валика усиления и предваликовой впадины

Для проведения испытаний использовался тест-образец толщиной 38 мм с неровным профилем поверхности, имитирующим валик усиления и предваликовую впадину (рис. 1) [3]. В

образце были сделаны четыре сквозных боковых отверстия диаметром 2 мм, пронумерованных на рис. 1 цифрами от одного до четырёх.

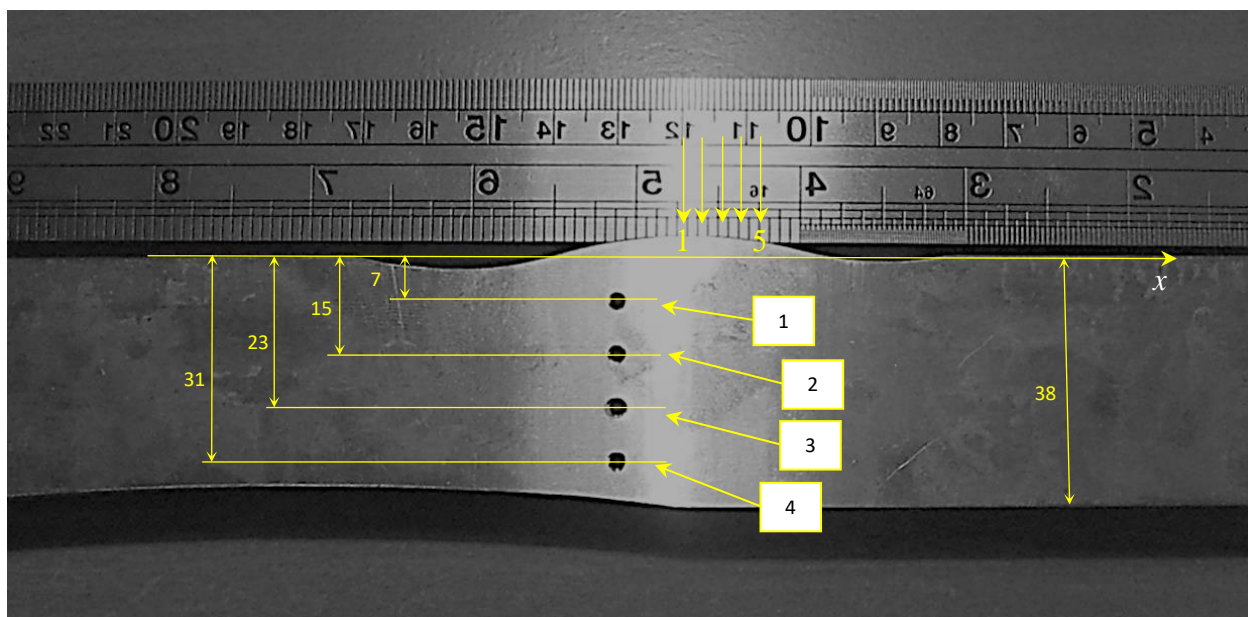


Рис. 1 Тест-образец с неровной поверхностью с четырьмя боковыми отверстиями диаметром 2 мм. Положения центра антенной решётки отмечены стрелками жёлтого цвета с цифрами 1 и 5.

Эхосигналы измерялись антенной решёткой PE-5.0M32E0.8P (5 МГц, 32 элемента, размер элемента 0.8 мм). Был изготовлен специальный прижим, обеспечивающий её акустический контакт с акваполимером, выполняющим функцию локальной иммерсионной ванны (рис. 2). Измерения проводились для пяти положений антенной решётки с шагом 3 мм. Центр антенной решётки соответствует стрелкам жёлтого цвета, которые показаны на рис. 2. Акустический контакт между антенной решёткой и акваполимером, между акваполимером и образцом обеспечивался за счёт контактного слоя из глицерина.

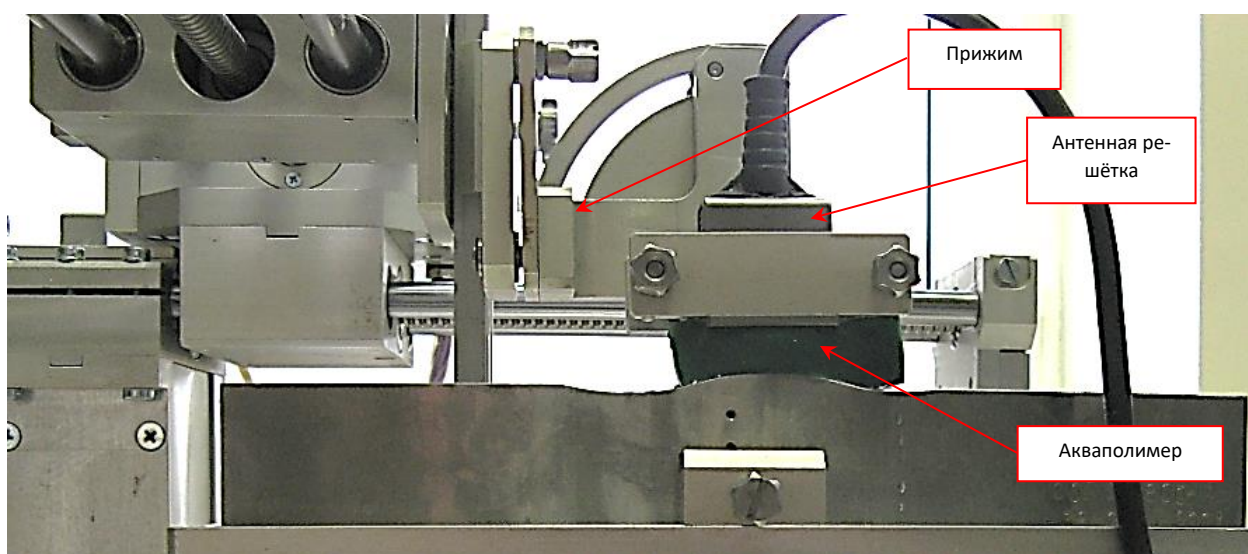


Рис. 2. Тест-образец, система сканирования, прижим для антенной решётки и акваполимера

На рис. 3 показаны изображения отражателей, восстановленные для всех пяти положений антенной решётки, но в предположении, что поверхность образца ровная. Контрастность изображения увеличена в три раза. Для первого положения антенной решётки, когда под ней относительно ровная поверхность, удалось получить хорошо сфокусированные, но смещённые от правильных положений более чем на 4 мм, блики. А для пятого положения антенной решётки, когда она находилась над поверхностью с максимальной кривизной, блики отверстий практически исчезли. Таким образом, по изображениям, полученным без учёта неровной поверхности, не удаётся уверенно определить количество отражателей, за исключением первого положения антенной решётки. А определить координаты отражателей с точностью меньше, чем 4 мм невозможно ни по одному изображению.

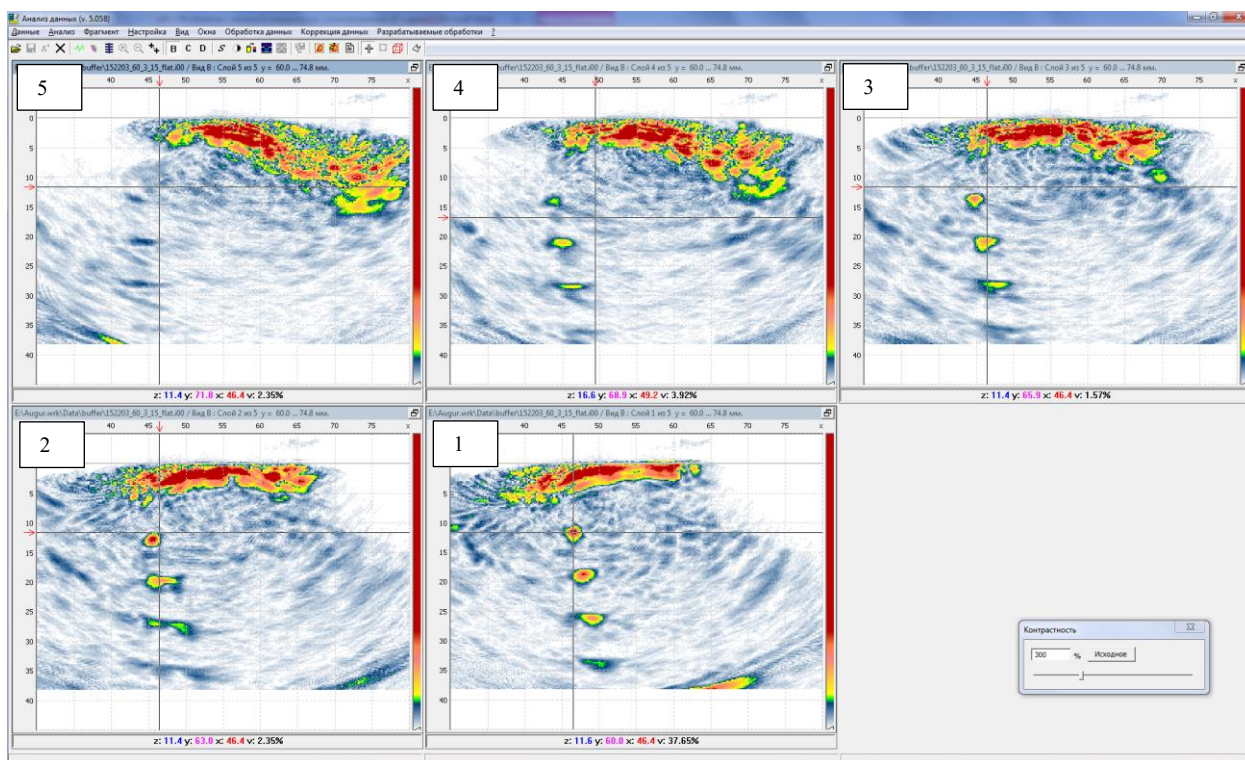


Рис. 3. Изображения отверстий без учёта формы поверхности. Цифры в квадратах указывают на номер положения антенной решётки

На рис. 4 показаны изображения отверстий, полученные с учётом автоматизированного определения профиля поверхности. Контрастность изображения увеличена в три раза. По каждому из этих изображений можно определить наличие четырёх бликов, соответствующих отверстиям бокового сверления, причём координаты бликов на всех пяти изображениях в целом совпадают (крестообразный маркер на рис. 4). Но блики отверстий бокового сверления №4 на больших глубинах, когда область пересечения лучей с поверхностью максимальна, недостаточно хорошо сфокусированы. В отличие от рис. 3, на рис. 4 на всех изображениях появилось изображение дна

объекта контроля, что можно рассматривать как критерий правильного определения учёта профиля поверхности.

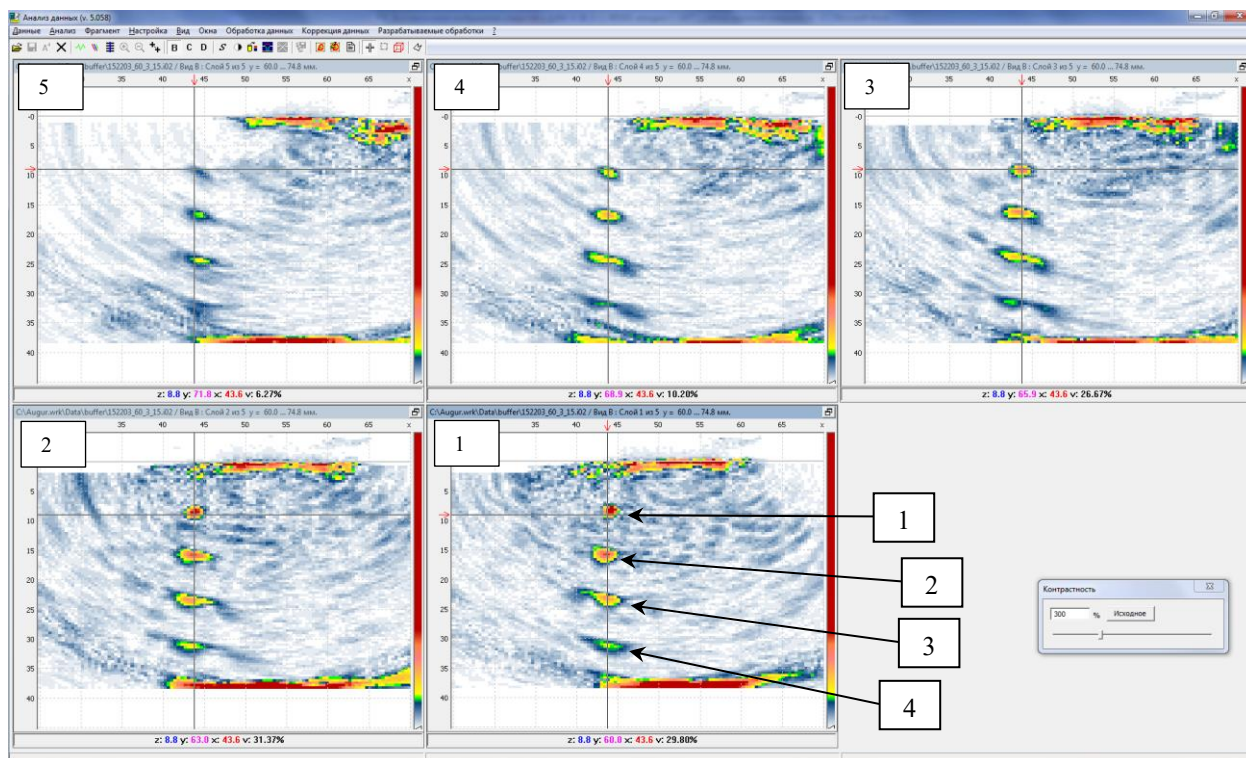


Рис. 4. Изображения отверстий при учёте поверхности. Цифры в квадратах указывают на номер положения антенной решётки

На Рис. 5 показано ЦФА-Х-изображение, на котором хорошо видна неровная внешняя поверхность образца и блики границы всех четырёх отверстий. Из-за увеличения апертуры излучения-приёма поперечная разрешающая способность возросла примерно в два раза по сравнению с Рис. 4.

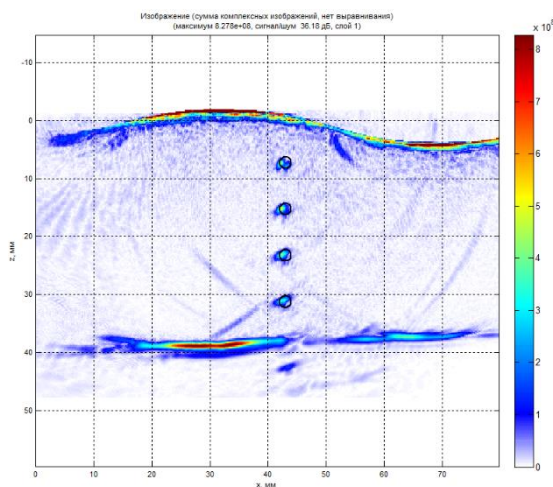


Рис. 5. ЦФА-Х-изображение отверстий при учёте поверхности

На рис. 6 показаны результаты восстановления изображения по всем пяти положениям антенной решётки с учётом формы поверхности, измеренной профилометром. Контрастность изображения увеличена в три раза. По сравнению с изображением на рис. 4 полученный результат лучше, так как блики отверстий на больших глубинах лучше сфокусировались. Это обстоятельство говорит о том, что на практике целесообразно проводить измерения поверхности лазерным профилометром.

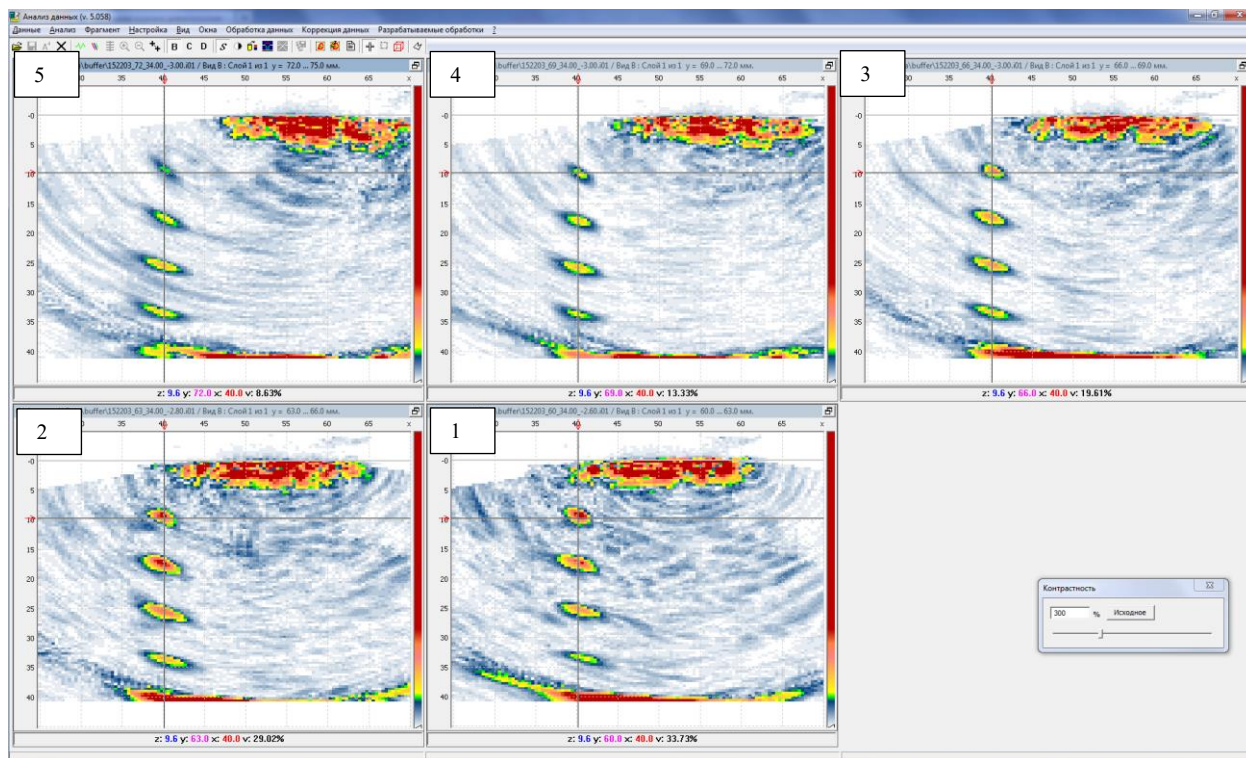


Рис. 6. Изображения отверстий при учёте формы поверхности по результатам профилометрии. Цифры в квадратах указывают на номер положения антенной решётки

Фрагмент трубопровода Ду800

Измерения эхосигналов проводились антенной решётки (5 МГц, 64 элемента, размер пьезоэлемента 0,55×10 мм, зазор 0,05 мм) [4]. Для создания локальной иммерсионной ванны из воды использовался адаптивный протектор (Рис. 7), резиноподобный материал которого позволял облегать неровности поверхности. Координаты z внешней поверхности слева и справа от сварного соединения отличаются примерно на 1 мм, а на поверхности имеются неровности глубиной около 0,5 мм, возникшие при подготовке объекта к контролю. Антенная решётка перемещалась 150 раз с шагом $2\pm 0,05$ мм по оси y и 9 раз с шагом $4,96\pm 0,05$ мм по оси x. Применение адаптивного протектора позволяет восстанавливать ЦФА-Х-изображения в неограниченной области вдоль оси x. В данном конкретном примере изображения восстановлены в интервале вдоль оси x ± 55 мм.

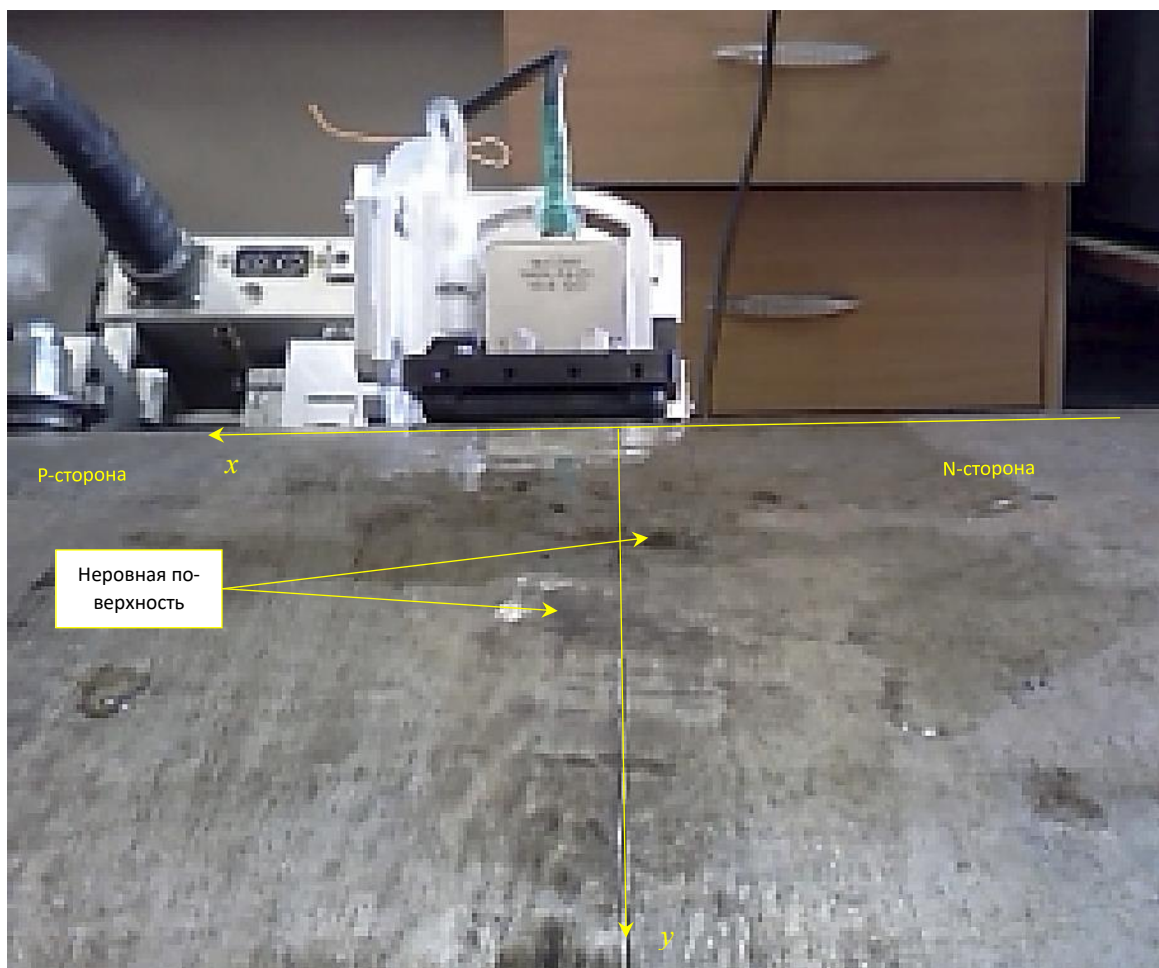


Рис. 7. Проведение измерений с помощью адаптивного протектора

На Рис. 8 слева показано ЦФА-Х-изображение придонного пропила высотой 7 мм выполненного фрезой шириной 1 мм (отражатель 5) без учёта неровной поверхности. Несмотря на то, что изменения профиля поверхности меньше 1 мм, блик верхней грани отражателя 5 раздвоился. На изображении линиями чёрного цвета нанесены контуры паза и наплавки. После учёта в методе ЦФА-Х неровной поверхности образца удалось получить компактный блик верхней грани паза, ширина которого равна примерно 1 мм (см. Рис. 8, справа). На обоих изображениях видна граница наплавка-основной металл и дно с валиком усиления и несколько незаложенных отражателей. Контрастность изображений увеличена в два раза.

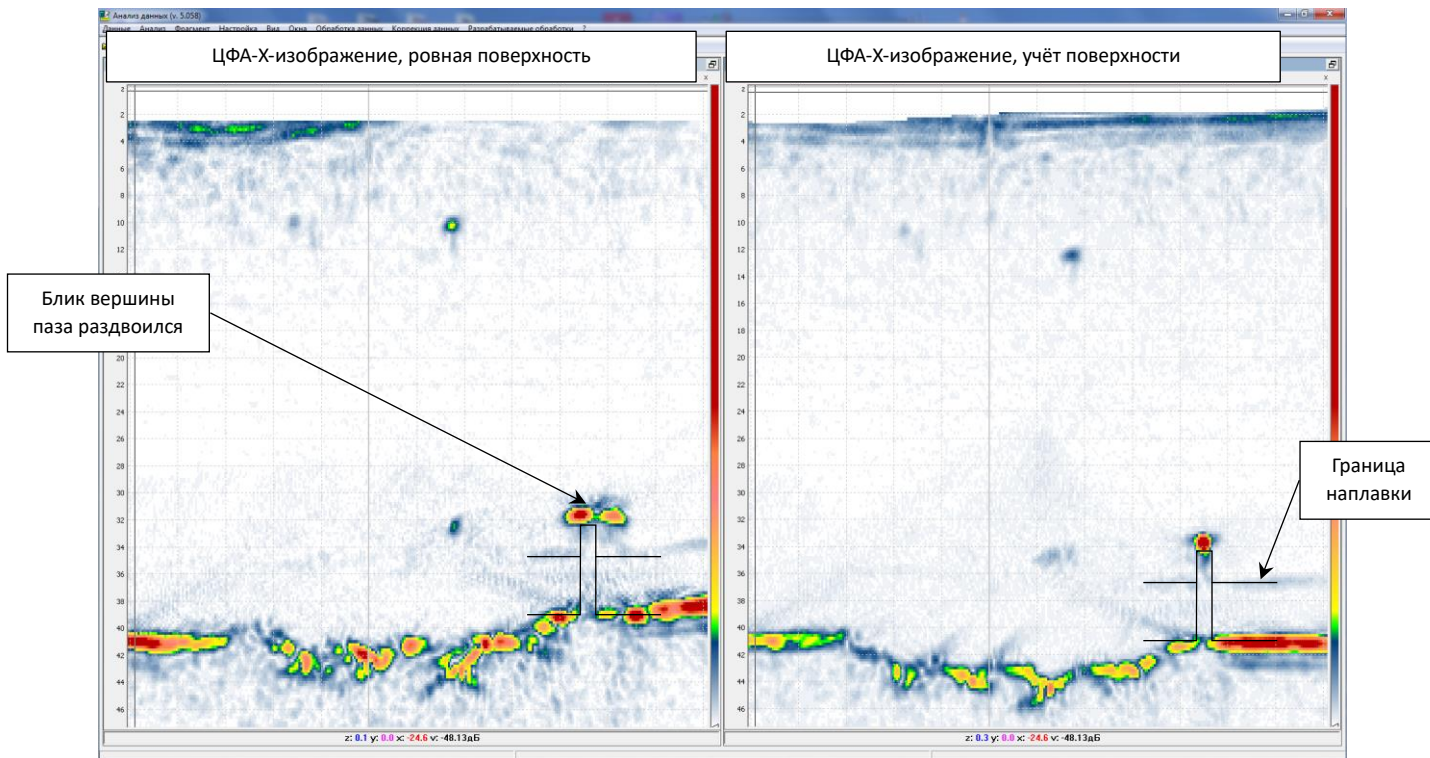


Рис. 8. ЦФА-Х-изображения придонного паза (отражатель 5) по акустической схеме **LdL**: слева – без учёта неровной поверхности, а справа – с учётом.

Выводы

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. показана возможность применения локально иммерсионной ванны в виде акваполимера или адаптивного протектора для проведения ультразвукового контроля антенными решетками с учётом неровной внешней поверхности;
2. модельные эксперименты показали, что эффективнее проводить измерения профиля поверхности лазерным профилометром, который позволит точнее привязать положение антенной решётки к поверхности образца;

-
1. 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 (51), с. 64-70.
 2. Дефектоскоп GEKKO, URL: <https://www.eddyfi.com/en/product/gekko> (дата обращения 18 июля 2023 года).
 3. Базулин А.Е., Базулин Е.Г. Применение антенных решёток и кремнийорганического полимера в качестве иммерсионной среды для проведения ультразвукового контроля объектов с неровной поверхностью // Дефектоскопия. 2014. №7. С. 3-11.
 4. Базулин Е.Г. Ультразвуковой контроль сварных соединений трубопровода типа Ду800. Часть 2. Повышение качества изображения, сравнение с результатами рентгеновского контроля // Дефектоскопия. 2017. №5. С. 12-24.