

# Ультразвуковой контроль УЗК двух образцов труб из полиэтилена с использованием технологии PWI

## 1 Цель

Проведение ультразвукового контроля (УЗК) двух образцов толстостенных труб из полиэтилена высокого давления по технологии Plane Wave Imaging (PWI) [1] и объединения парциальных изображений с использованием технологии когерентного фактора (CF) [2] с целью повышения отношения сигнал/шум.

## 2 Регистрация эхосигналов

Для регистрации эхосигналов использовался ЦФА-дефектоскоп «АВГУР АРТ», разработанный и изготавливаемый «Научно-производственным центром неразрушающего контроля «ЭХО+» [3]. Эхосигналы регистрировались антенной решёткой (АР) (2.25 МГц, 20 элемента, размер пьезоэлемента 1,1×10 мм, зазор между пьезоэлементами 0,1 мм) установленной на плексигласовую призму с углом наклона 20 градусов. Эхосигналы регистрировались при сканировании АР поперёк сварного соединения и изображение отражателей восстанавливалось с учётом всех положений АР (режим тройного сканирования). Такой способ восстановления изображения отражателей позволяет повысить его поперечную разрешающую способность и уменьшить уровень шума.

## 3 Уменьшение уровня шума

Для уменьшения уровня структурного шума, кроме известного приёма связанного с уменьшением длительности импульсов за счёт математической обработки эхосигналов [4], можно воспользоваться следующим способом [5]. Пусть АР находится в точке  $\mathbf{r}_w$ . Обозначим через  $I_m(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$  ЦФА-изображение, восстановленное в заданных точках  $\mathbf{r}_i$  ОВИ по выстрелу номер  $m$ , то есть по эхосигналам измеренным всеми элементами АР при излучении элементом номер  $m$ . Тогда обычное ЦФА-изображение можно получить, когерентно сложив все изображения по выстрелам

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

где  $N_e$  число элементов АР. Но объединить парциальные повывстрельные изображения  $I_m(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$  можно иными способами. Например, можно рассчитать когерентный фактор для каждой точки  $\mathbf{r}_i$  повывстрельных изображений по формуле

$$I_{CF}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) = CF(I_m(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)), \quad (2)$$

а в качестве восстановленного изображения рассматривать функцию

$$I(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) = I_S(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) \cdot I_{CF}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w). \quad (3)$$

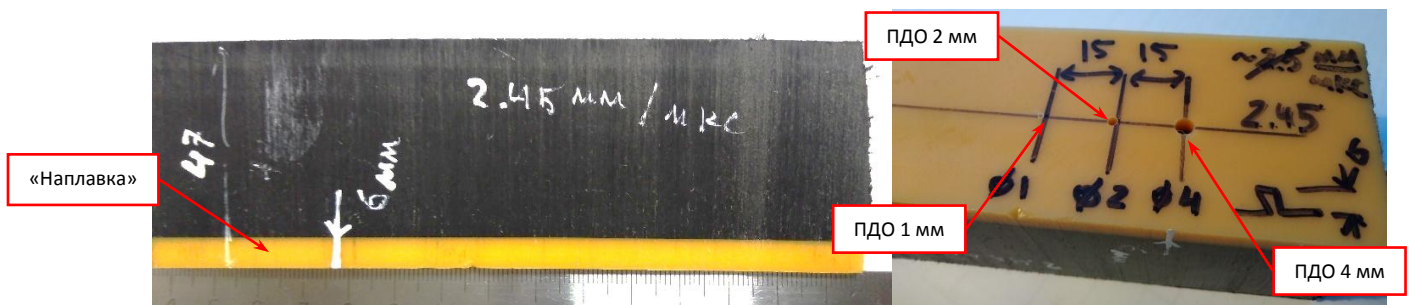
Важное свойство когерентного фактора состоит в том, что при отсутствии шума амплитуды  $CF$  бликов отражателей равны единице. Поэтому амплитуды бликов изображения полученные по формуле (1) или (3) будут примерно одинаковы.

В режиме тройного сканирования, когда АР сканирует, итоговое изображение можно получить по формулам (1) или (3), но в качестве парциальных изображений используются будут использоваться  $N_p$  изображений  $I_S(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$  или  $I(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$ , восстановленных для каждого положения АР

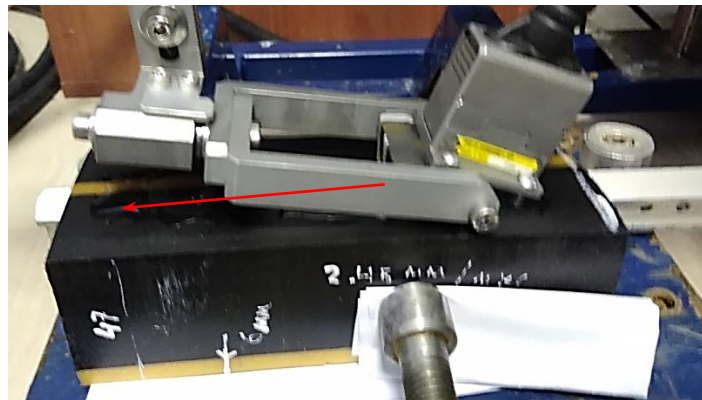
$$I(\mathbf{r}_i) = \sum_{p=1}^{N_p} I(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_{w,p}). \quad (4)$$

## 4 Образец толщиной 47 мм

На фотографии ниже показан образец толщиной 47 мм, в котором были просверлены три плоскодонных отверстия (ПДО) диаметром 1, 2 и 4 мм на глубину 6 мм. Эхосигналы регистрировались в 70 положениях антенной решётки при перемещении её по внешней поверхности образца с шагом 0.9884 мм.



На рисунке ниже показана установка и исследуемый образец. Антенная решётка находится в начальном положении апертуры сканирования. Линия сканирования показана стрелкой красного цвета.



### 4.1 Регистрация эхосигналов в режиме FMC

На Рис. 1 показано объединённое изображение как когерентная сумма, полученное по формулам (1) и (4), на котором уверенно выявляются блики всех трёх ПДО.

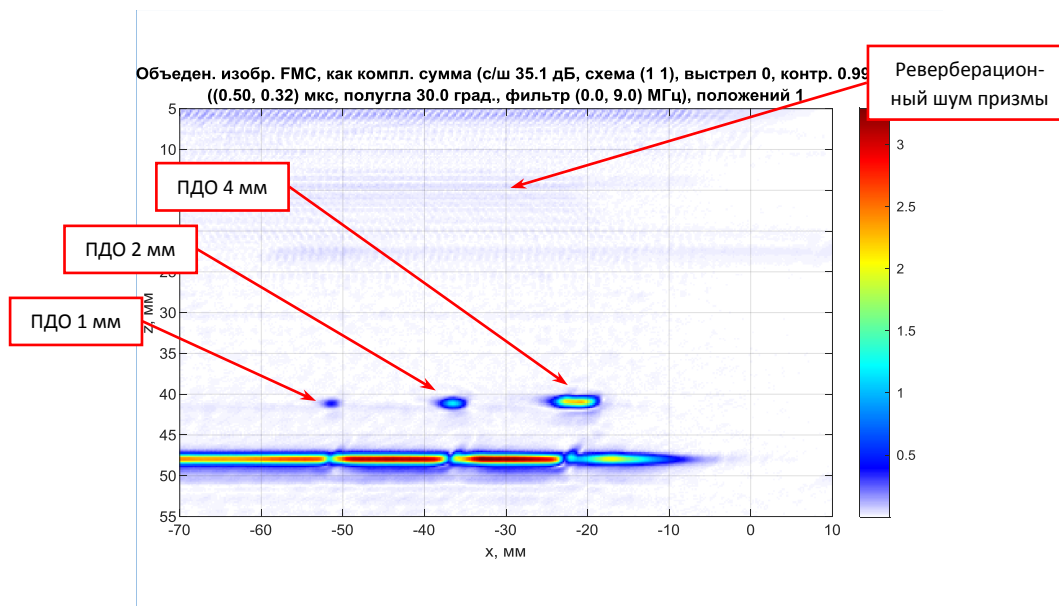


Рис. 1.

На Рис. 2 показано объединённое изображение, но не как сумма парциальных изображений, а с учётом когерентного фактора по формулам (3) и (4). Отношение сигнал/шум возросло примерно на 5 дБ, и стала более заметна граница «наплавки» (граница между материалами чёрного и коричневого цвета).

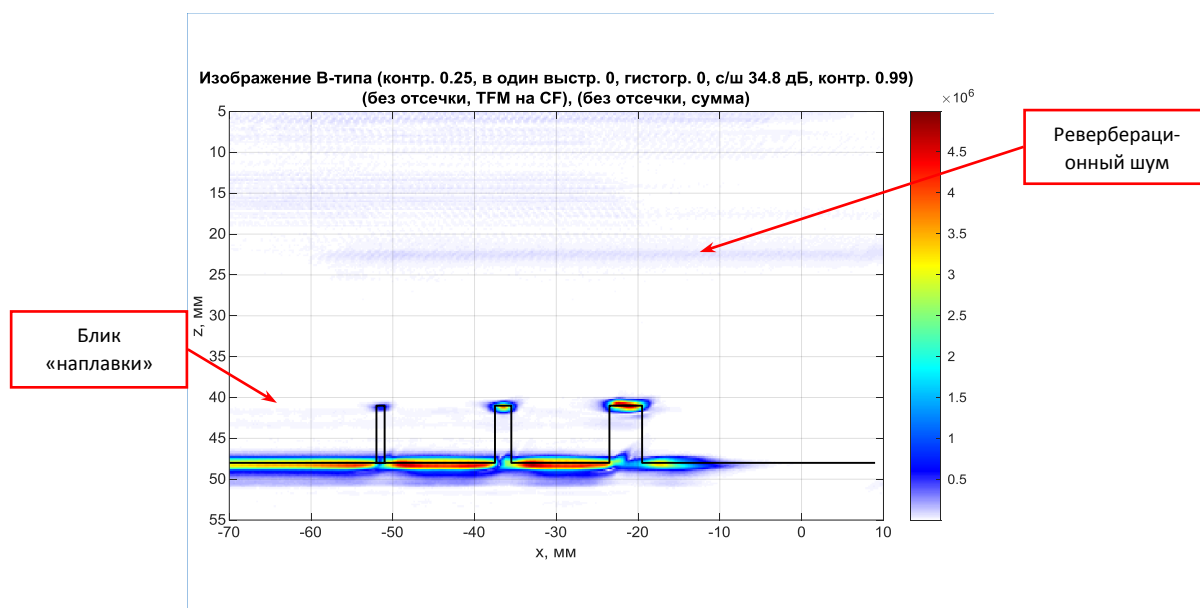


Рис. 2.

## 4.2 Регистрация эхосигналов в режиме PWI

Регистрация эхосигналов в режиме PWI подразумевает излучение плоской волны в объект контроля, как это происходит в режиме фазированной антенной решётки (ФАР), а эхосигналы регистрируются всеми элементами АР. Обычно используют набор из нескольких плоских волн с разными углами ввода.

На Рис. 3 слева показаны PWI-эхосигналы, а справа FMC-эхосигналы. На PWI-эхосигналах хорошо видны эхосигналы от ПДО диаметром 1 мм и эхосигналы от входных отверстий всех ПДО.

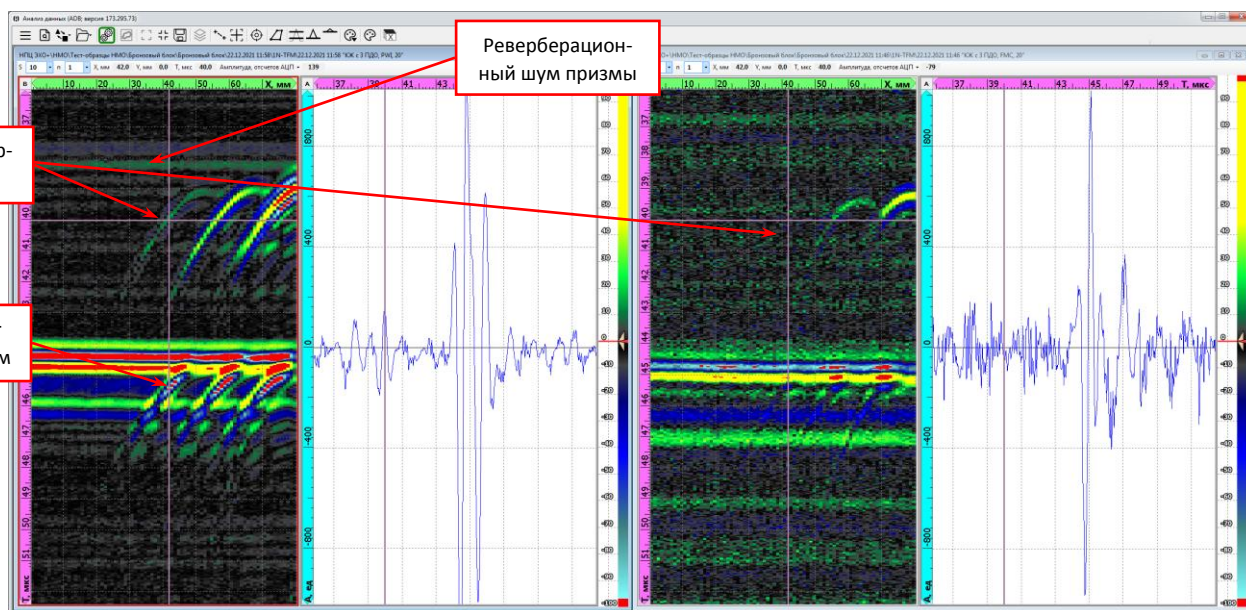


Рис. 3.

На Рис. 4 показано объединённое, как когерентная сумма по формулам (1) и (4), изображение, на котором выявляются все ПДО. По сравнению с Рис. 1 блик границы «наплавки» стал более заметен.

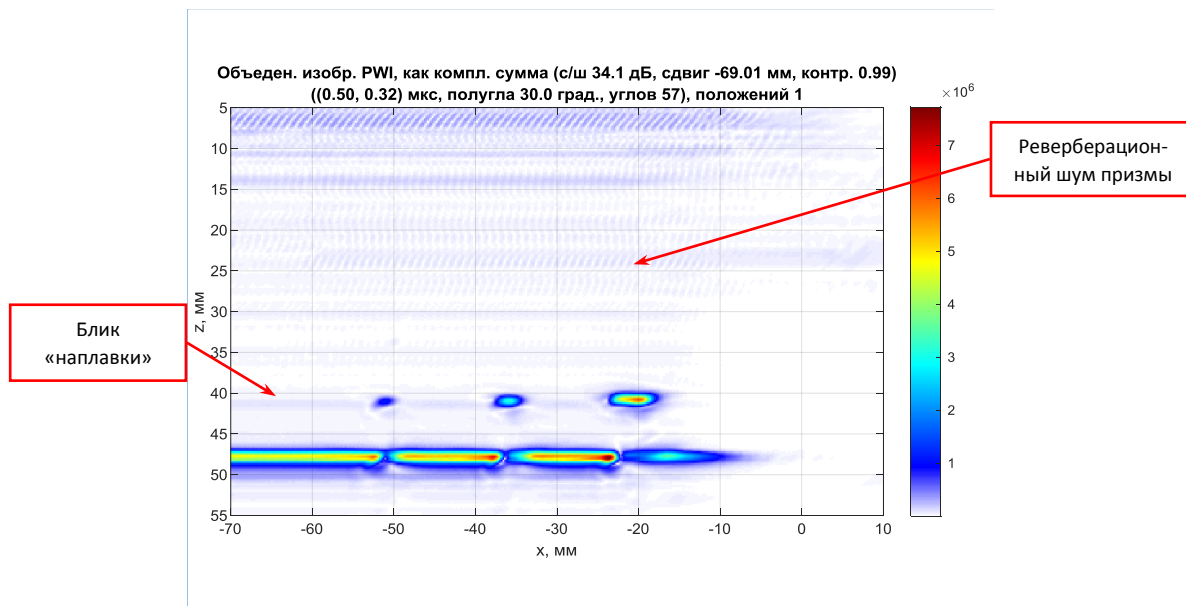


Рис. 4.

На Рис. 5 показано объединённое изображение, но не как сумма парциальных изображений, а с учётом когерентного фактора по формулам (3) и (4). Отношение сигнал/шум возросло примерно на 5 дБ.

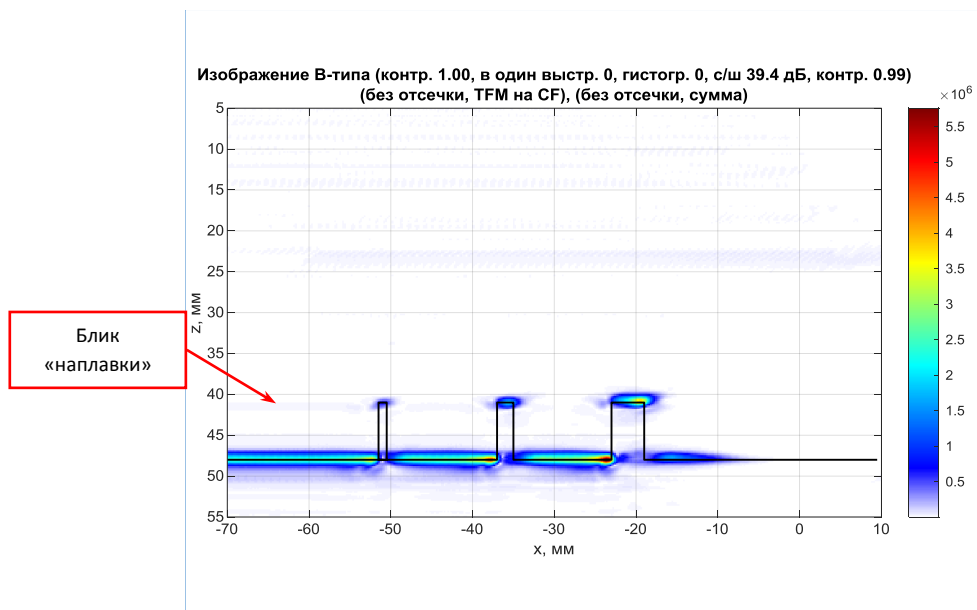


Рис. 5.

## 5 Образец толщиной 120 мм

В образце толщиной 120 мм были просверлены 5 боковых цилиндрических отверстий (БЦО) диаметром 3 мм (Рис. 6, слева). Поверхность образца неровная (Рис. 6, справа).

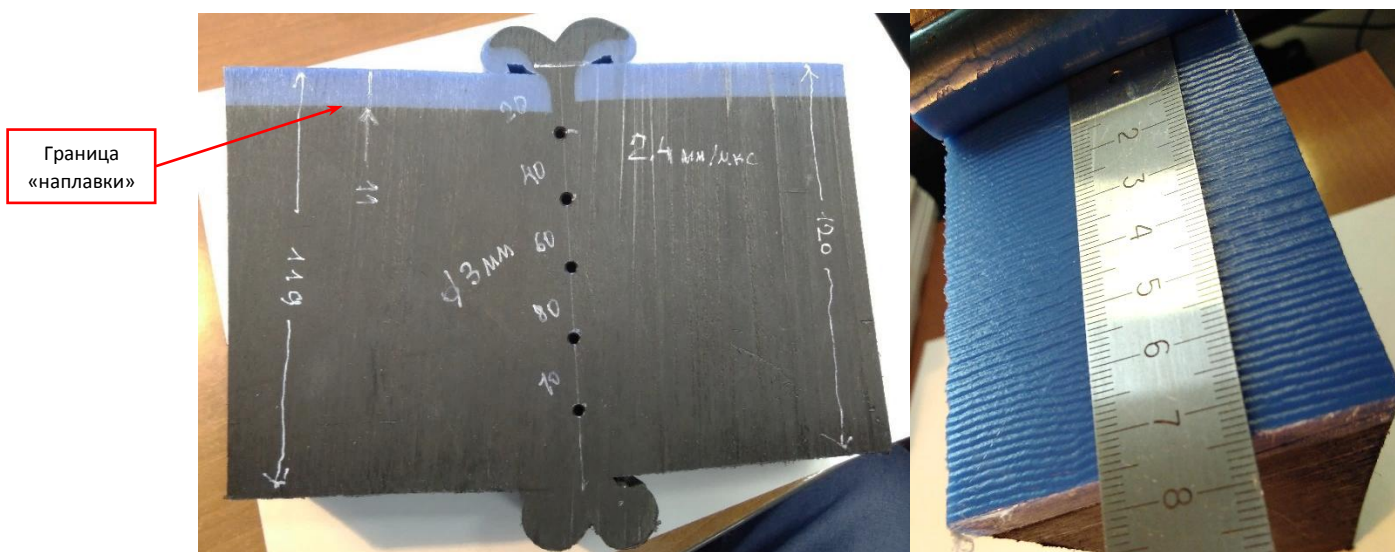


Рис. 6.

На Рис. 7 показана фотография корня сварного соединения, на котором обозначены точки L и R.

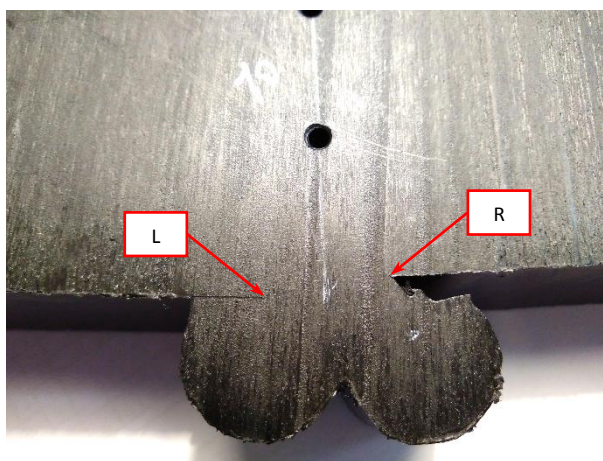
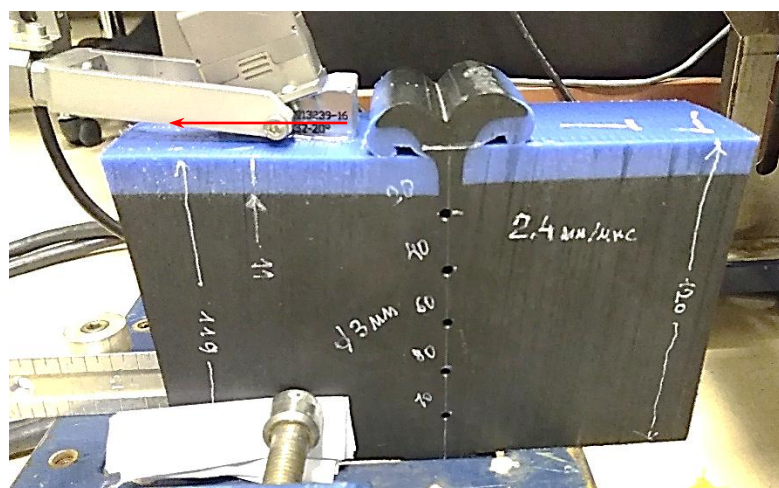


Рис. 7.

На фотографии ниже показан образец и АР в начале сканирования. Направление сканирования показано стрелкой красного цвета. Эхосигналы регистрировались в 35 положениях антенной решётки при перемещении её по внешней поверхности образца с шагом 0.9884 мм.



### 5.1 Регистрация эхосигналов в режиме FMC

На Рис. 8, слева показано объединённое, как сумма парциальных, изображение по формулам (1) и (4), а справа его фрагмент, на котором видна граница «наплавки» (граница между материалами чёрного и голубого цвета), блик незаложенного отражателя и подозрительная область с бликами малой амплитуды. Блики БЦО за исключением самого верхнего можно обнаружить на восстановленном изображении. То, что не удалось увидеть блик самого верхнего БЦО объясняется тем, что скорость продольной волны материала призмы равна 2.7 мм/мкс, а скорость продольной волны в полиэтилене высокого давления около 2.4 мм/мкс. Поэтому максимальный угол ввода в трубу равен 58 градусов. Выбор для призмы другого материала, например, рексолита позволит вводить ультразвук в трубу под большими углами.

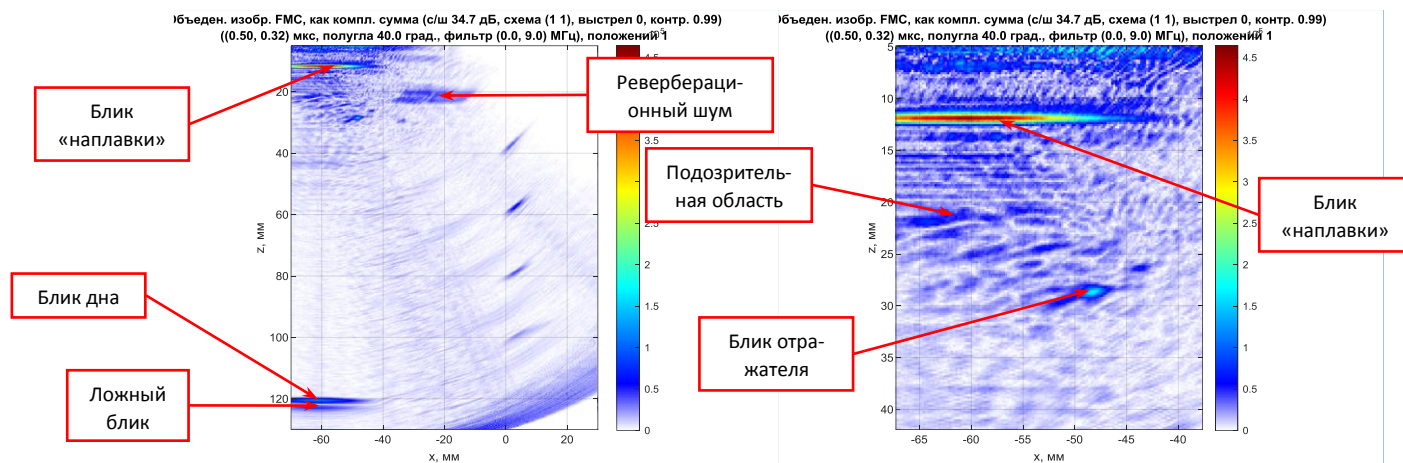


Рис. 8.

На Рис. 9 показано объединённое изображение, но не как сумма парциальных изображений, а с учётом когерентного фактора по формулам (3) и (4). Отношение сигнал/шум возросло примерно на 8 дБ, однако амплитуда блика самого глубокого БЦО уменьшилась.

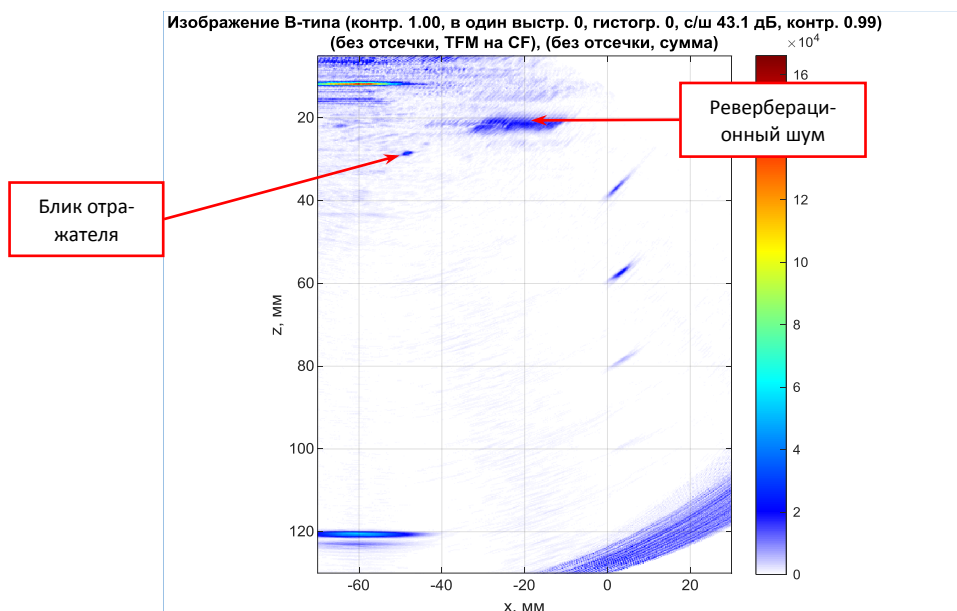


Рис. 9.

## 5.2 Регистрация экосигналов в режиме PWI

На Рис. 10 показано объединённое, как когерентная сумма по формулам (1) и (4), изображение, на котором выявляются все БЦО, кроме верхнего. По сравнению с Рис. 8 слева амплитуда бликов БЦО значительно возросла. Однако, неровная граница поверхности образца (Рис. 6, справа) привела к тому, что на изображении появились ложные блики. Они возникли из-за того, что зондирующий импульс многократно перерассеивается на неровностях, заполненных глицерином, который использовался в качестве контактной жидкости.

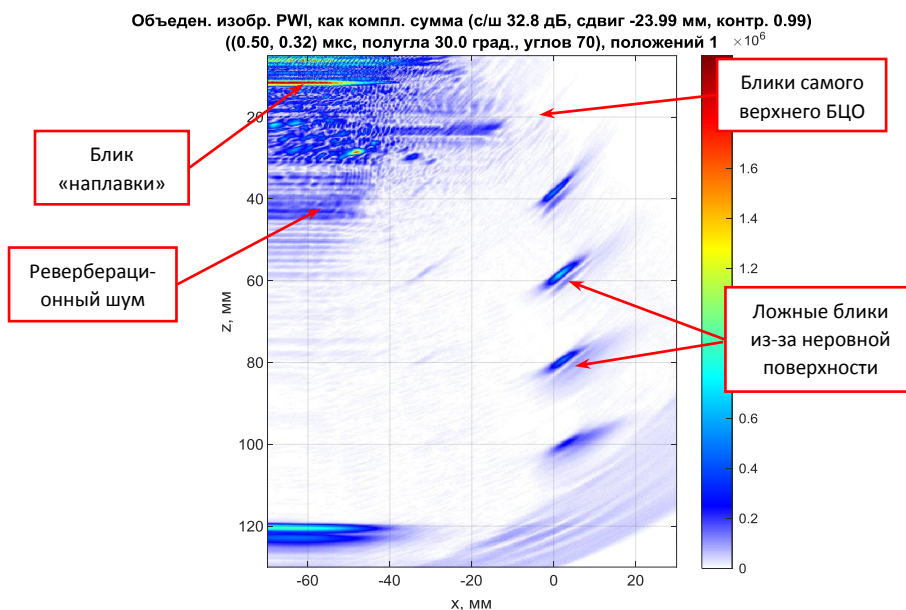


Рис. 10.

На Рис. 11, слева показано объединённое изображение с учётом когерентного фактора по формулам (3) и (4). Отношение сигнал/шум, по сравнению с Рис. 10, возросло примерно на 10 дБ. Можно предположить, что этом изображении видны точки L и R, показанные на Рис. 7. Блик между ними, скорее всего сформирован по акустической схеме «прямой луч – отражатель – луч с отражением от дна». Такие блики характерны для одноэлементных преобразователей или для антенных решёток малых размеров и для больших глубин. На Рис. 11, справа показан фрагмент изображения. На нём подтверждается наличие незаложенного рассеивателя и подозрительной области, которые видны и на Рис. 8, справа.

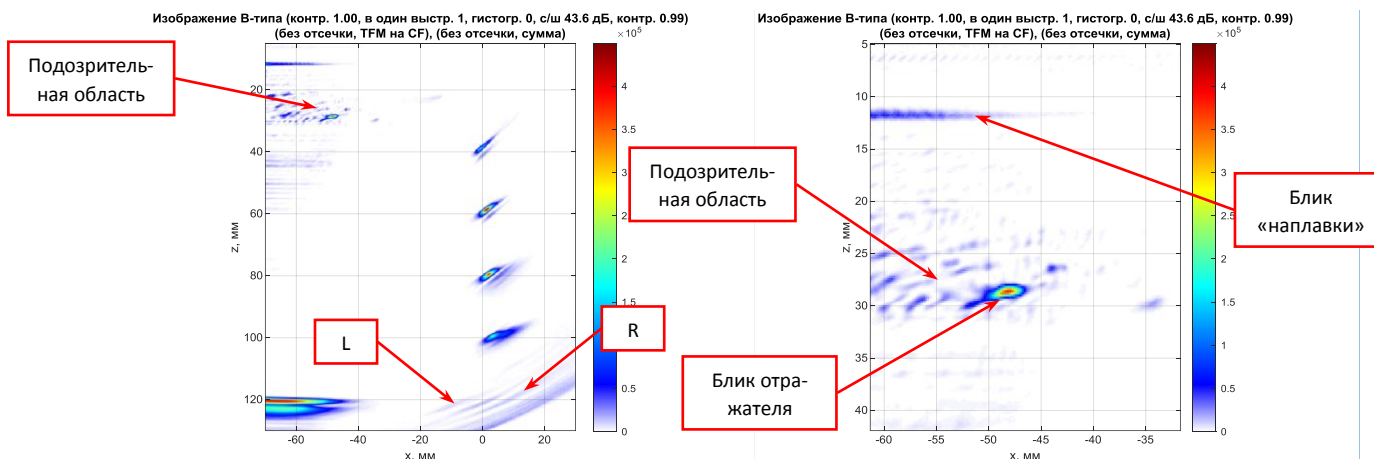


Рис. 11.

## 6 Выводы

1. Объёмные дефекты надёжно выявляются методами PWI и FMC для двух исследуемых образцов. Наличие бликов точек L и R (Рис. 11) позволяют предположить, что края трещин будет обнаруживаться при использовании технологии PWI.
2. Режим PWI для такого рода образцов значительно лучше, чем FMC. Внимание! Эхосигналы от ПДО видны на PWI-эхосигналах (Рис. 3). Два образца можно контролировать на частоте 2.25



- МГц, но число элементов AP целесообразно увеличить в два или три раза. Тогда можно будет отказаться от режима тройного сканирования.
3. Контроль можно проводить по неровной поверхности (Рис. 6, справа). При этом блики отражателей не «разваливается», но на РWИ-изображениях возникают ложные блики (Рис. 10, слева, Рис. 11, слева).
  4. Фронтальное разрешение на FMC-изображениях несколько лучше, чем на РWИ-изображениях! Однако увидеть блики точек L и R удалось увидеть только на РWИ-изображениях (Рис. 11)
  5. Нужны специальные призмы, по крайней мере из рексолита, для возможности ввода плоских волн в образцы из полиэтилена под углами до 90 градусов.
  6. В образце толщиной 120 мм обнаружен отражатель и область с подозрительными бликами (Рис. 8, справа, Рис. 11, справа).

Базулин Е.Г.

27 декабря 2021 года

22 января, 01 февраля 2022 года

## 7 Литература

---

1. Базулин Е.Г., Евсеев И.В. Применение технологии Plane Wave Imaging в ультразвуковом неразрушающем контроле // Дефектоскопия. 2021. №6. С. 3-16.
2. Базулин Е.Г. Использование коэффициента когерентности для повышения качества изображения отражателей при проведении ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 2017. №6. С. 5-17.
3. Официальный сайт фирмы «ЭХО+» URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 22.01.2022).
4. Ермолов И.Н. К вопросу о выборе оптимальных параметров эхо-метода ультразвуковой дефектоскопии // Дефектоскопия. 1965. №6. С. 51-61.
5. Базулин Е.Г., Евсеев И.В. Уменьшение уровня шума изображения отражателей, восстановленного по эхосигналам, измеренным ультразвуковой антенной решёткой // Россия, Москва, «XXVII международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», МЭИ, 11-12 марта 2021 года, С. 303.