

Контроль образца из бронзы БрХ0,8 толщиной 100 мм

Цель

Проблема в том, что многие сорта бронзы плохой для ультразвукового контроля материал [1, 2], так как в бронзе высокий уровень структурного шума и заметная анизотропия. В данной заметке уровень структурного шума предполагается уменьшить за счёт:

1. применения технологии PWI для увеличения вводимой в образец энергии (!!!) [3],
2. объединения повыстрельных парциальных изображений с использованием когерентного фактора, а не как когерентной суммы [4],
3. уменьшения длительности импульсов [5] за счёт применения методов сверхразрешения (метод максимальной энтропии (МЭ) и метод compressive sensing (CS) [6, 7]).

Для восстановления изображения отражателей использовались ультразвуковые антенные решётки (АР) с достаточно высокой частотой 2.25 и 5 МГц.

Акустические свойства образца

Общий вид образца с двумя боковыми цилиндрическими отверстиями (БЦО) диаметром 6 мм, простреленных на глубинах 30 и 50 мм со стороны «дна», показан на рисунке ниже.

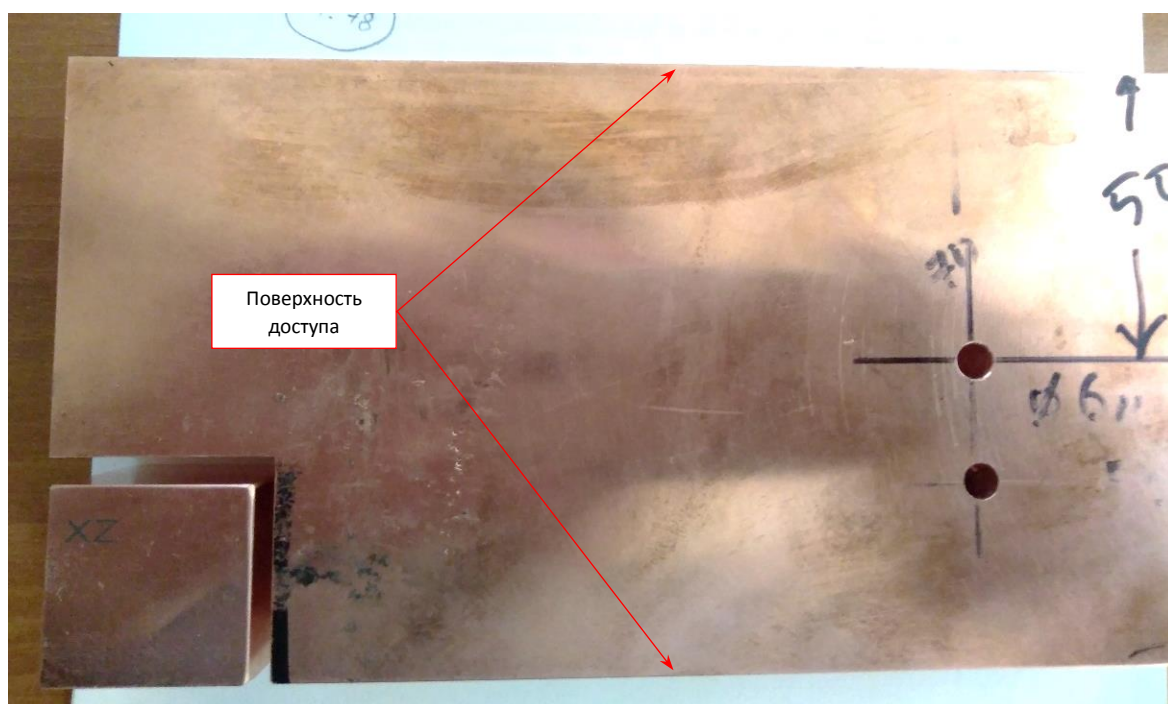


Рис. 1. Образец из бронзы

Для оценки акустических свойств образца из него был вырезан фрагмент в виде кубика с рёбрами размерами около 30 мм, как показано на Рис. 2.

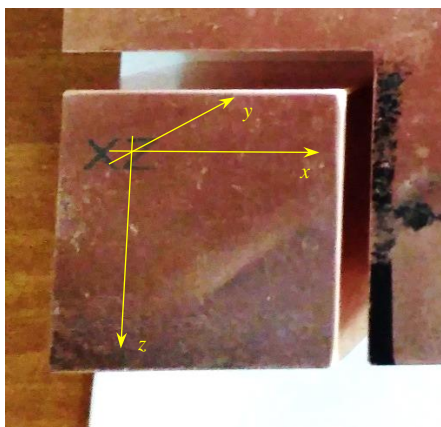


Рис. 2. Фрагмент образца для изучения его акустических свойств

Оценка затухания

Оценка затухания проходила следующим образом. Дефектоскоп «Авгур АРТ» был настроен на получение ЦФА-изображения. Амплитуды блика дна при работе вдоль оси x и y были примерно равны, а вот для получения изображения дна вдоль оси z усиление пришлось увеличить в **восемь** раз. К сожалению, контроль образца планируется проводить с поверхностями (Рис. 1) для которых затухание будет высоким.

Оценка скорости продольной волны

С помощью обычного толщиномера с использованием преобразователя на 4 МГц удалось измерить скорость продольной волны вдоль оси x и y . Вдоль оси z толщиномер не смог стабилизировать показания при максимальной чувствительности. Результаты измерений приведены в таблице ниже.

	Скорость, мм/мкс
x	5.00
y	4.93
z	4.58 или 5.00

С помощью программного обеспечения системы «Авгур АРТ» с использованием обычного пьезопреобразователя на 1.8 МГц удалось измерить скорость звука по всем трём осям. Результаты сведены в таблицу ниже.

	Скорость, мм/мкс
x	4.91
y	4.90
z	4.60

Поведение скорости продольной волны в трёх направлениях говорит, что образец, скорее всего обладает трансверсально-изотропной анизотропией.

Оценка анизотропии

Пять коэффициентов [8], по которым можно рассчитать шесть коэффициентов упругости для трансверсальной симметрии, определялись следующим образом. АР на призме сканировалась по поверхности образца (режим тройного сканирования или ЦФА-Х [9]). Зная координаты отражателя,

восстанавливались изображения БЦО для всех наборов коэффициентов. Те коэффициенты при которых получалось ЦФА-Х-изображение, сфокусированное в нужном месте, и полагались ответом на вопрос о параметрах анизотропии. На рисунке ниже показаны графики зависимости групповых скоростей от группового угла для трёх типов волн в плоскости хz. Зелёным цветом на Рис. 3 показан график для продольной волны, а красным и сиреневым для поперечных волн двух поляризаций.

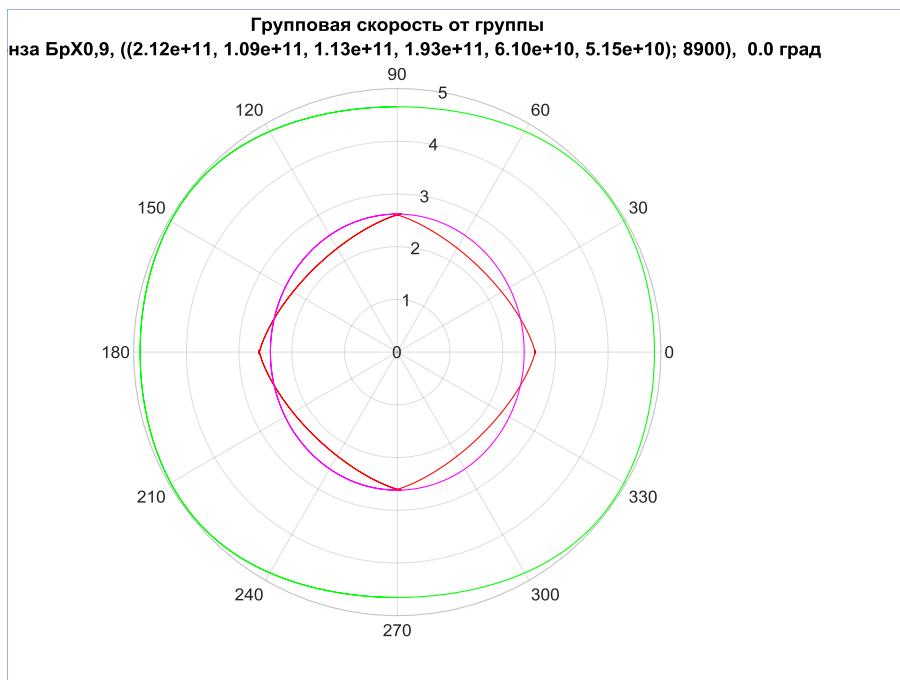


Рис. 3. Графики групповых скоростей

Таким образом при восстановлении изображений полагалось, что коэффициенты упругости равны (212.0, 109.0, 113.0, 193.0, 61.0, 51.5) ГПа, плотность равна 8600 кг/м³, угол поворота кристаллических осей в плоскости хz полагался равным 0.0 град.

Антенная решётка на 2.25 МГц

Для регистрации эхосигналов использовалась АР (2,25 МГц, 20 элементов, размер пьезоэлемента 1,1×10 мм, зазор между пьезоэлементами 0,1 мм) установленная на плексигласовую призму с углом наклона 20 градусов. Эхосигналы измерялись в режиме тройного сканирования или ЦФА-Х, когда АР перемещалась вдоль оси х 70 раз с шагом 1 мм по поверхности образца. На Рис. 4 показана фотография образца при измерении эхосигналов.

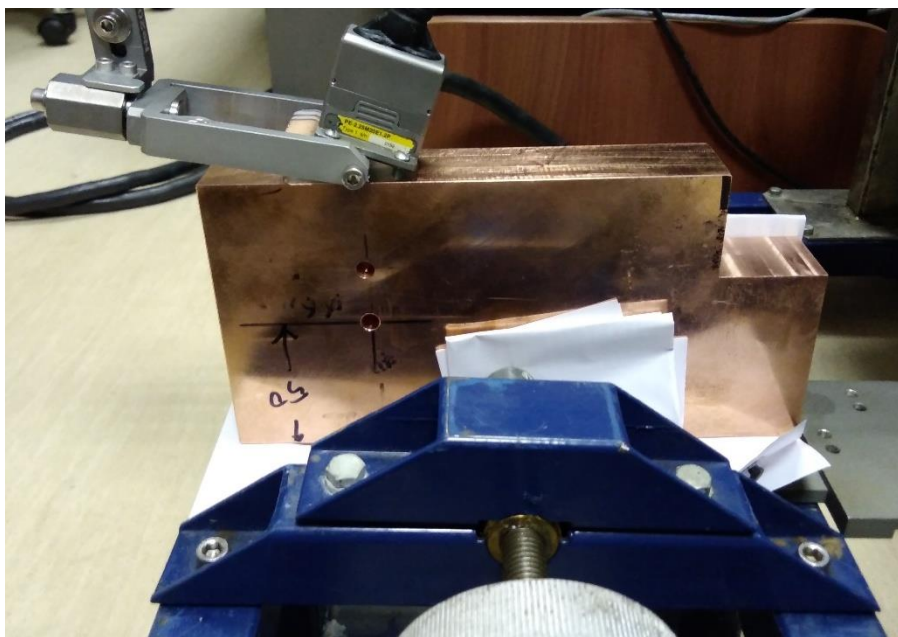


Рис. 4. Образец при измерении экосигналов

Отношение сигнал/шум определялось следующим образом: на выделенном фрагменте изображения находилась амплитуда максимума блика I_{\max} , по заданному уровню удалялся блик отражателя, после чего определялось среднее значение модуля изображения M . Отношение сигнал/шум определялось по формуле

$$\text{SNR} = 20 \log((I_{\max} - M) / M).$$

Такая оценка отношения сигнал/шум может применяться в случае, когда уровень шума достаточно маленький, например, меньше -6 дБ.

БЦО диаметром 6 мм на глубине 30 и 50 мм

На Рис. 5а показано парциальное изображение на продольной волне (акустическая схема LdL) для одного положения антенной решётки. Видно, что на изображении очень высокий уровень структурного шума и блик отражателя на глубине 50 мм обнаружить не удаётся, а Рис. 5б представлена когерентная сумма изображений для всех положений антенной решётки. Несмотря на то, что простое суммирование парциальных изображений не является оптимальным способом уменьшения уровня структурного шума, на Рис. 5б уровень структурного шума уменьшился не меньше чем на 9 дБ, и блик БЦО на глубине 50 мм стал заметен. На рисунках окружностями чёрного цвета нанесены контуры БЦО.

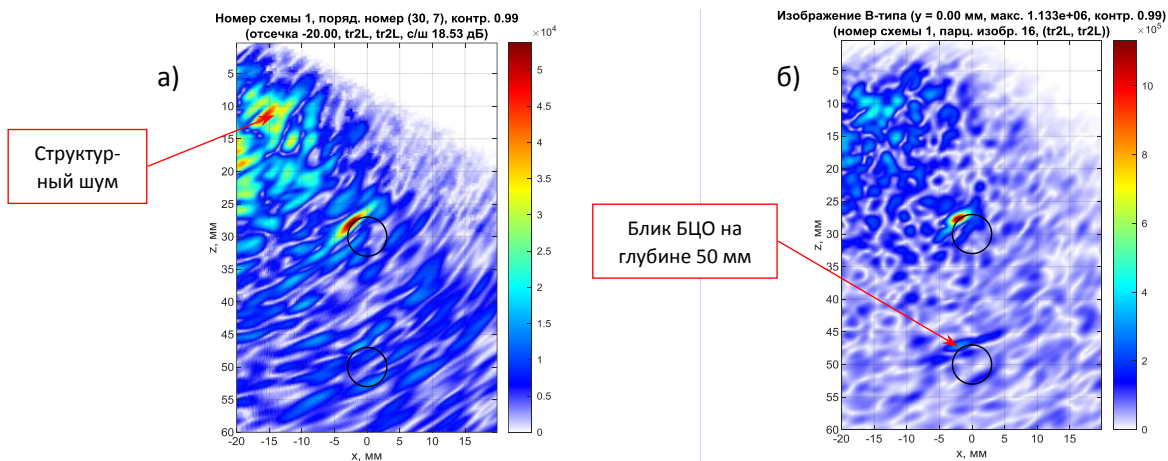


Рис. 5. Одно парциальное изображение (а) и когерентная сумма всех парциальных изображений (б) при объединении повыстрельных изображений как когерентную сумму

Если объединять повыстрельные изображения с учётом когерентного фактора (Рис. 6) [4], то уровень шума уменьшится ещё на 8 дБ, и блик БЦО на глубине 50 мм на Рис. 6б стал более заметен по сравнению с Рис. 5б. Отметим, что восстановление изображения отражателей без учёта анизотропии привело к смещению бликов границ БЦО примерно на -3 мм по оси x и к увеличению их поперечных размеров примерно в два раза.

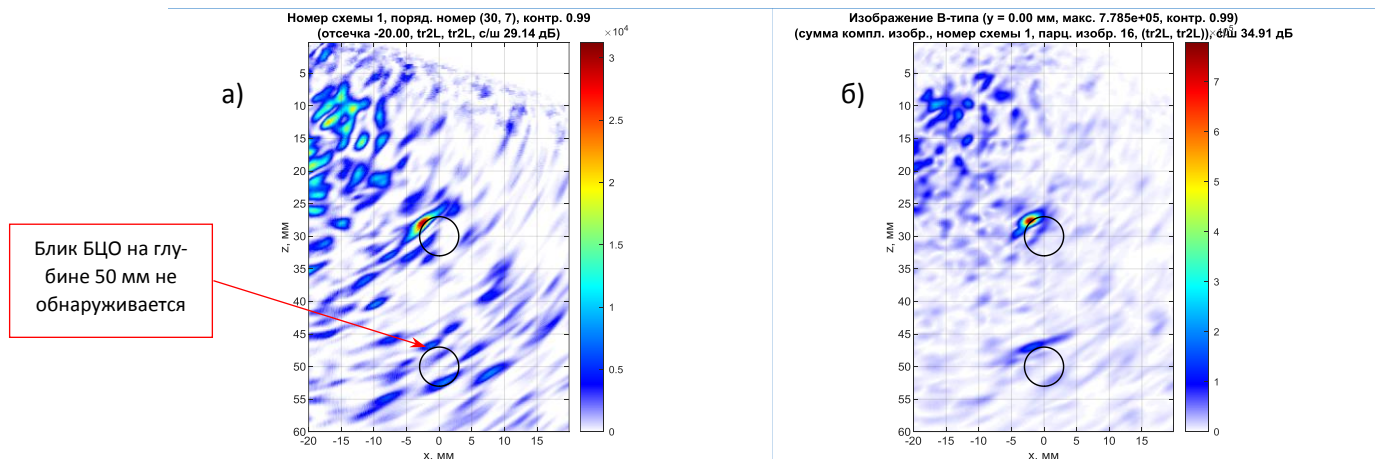


Рис. 6. Одно парциальное изображение (а) и когерентная сумма всех парциальных изображений (б) при объединении повыстрельных изображений с учётом когерентного фактора

На Рис. 7а показано изображение БЦО на глубине 50 мм, восстановленное по измеренным экосигналам с объединением парциальных изображений по формулам как когерентная сумма, а на Рис. 7б с использованием когерентного фактора. Фактически это фрагменты изображений на Рис. 5б и Рис. 6б. На Рис. 7в показано МЭ-изображение, то есть восстановленное по экосигналам после метода МЭ, объединённое с использованием когерентного фактора. Лучевая разрешающая способность изображения возросла примерно в два раза по сравнению с Рис. 7б, уровень шума уменьшился примерно на 1,5 дБ. На Рис. 7г показано изображение, восстановленное по CS-экосигналам и объединённое с использованием когерентного фактора. Лучевая разрешающая способность CS-изображения возросла примерно в два раза по сравнению с МЭ-изображением, а уровень шума уменьшился на 1,5 дБ. Сравнивая CS-изображение (Рис. 7г) и обычное ЦФА-изображение (Рис. 7а), можно утверждать, что удалось повысить лучевую разрешающую способность примерно в три раза, а уровень структурного шума уменьшить примерно на 13 дБ.

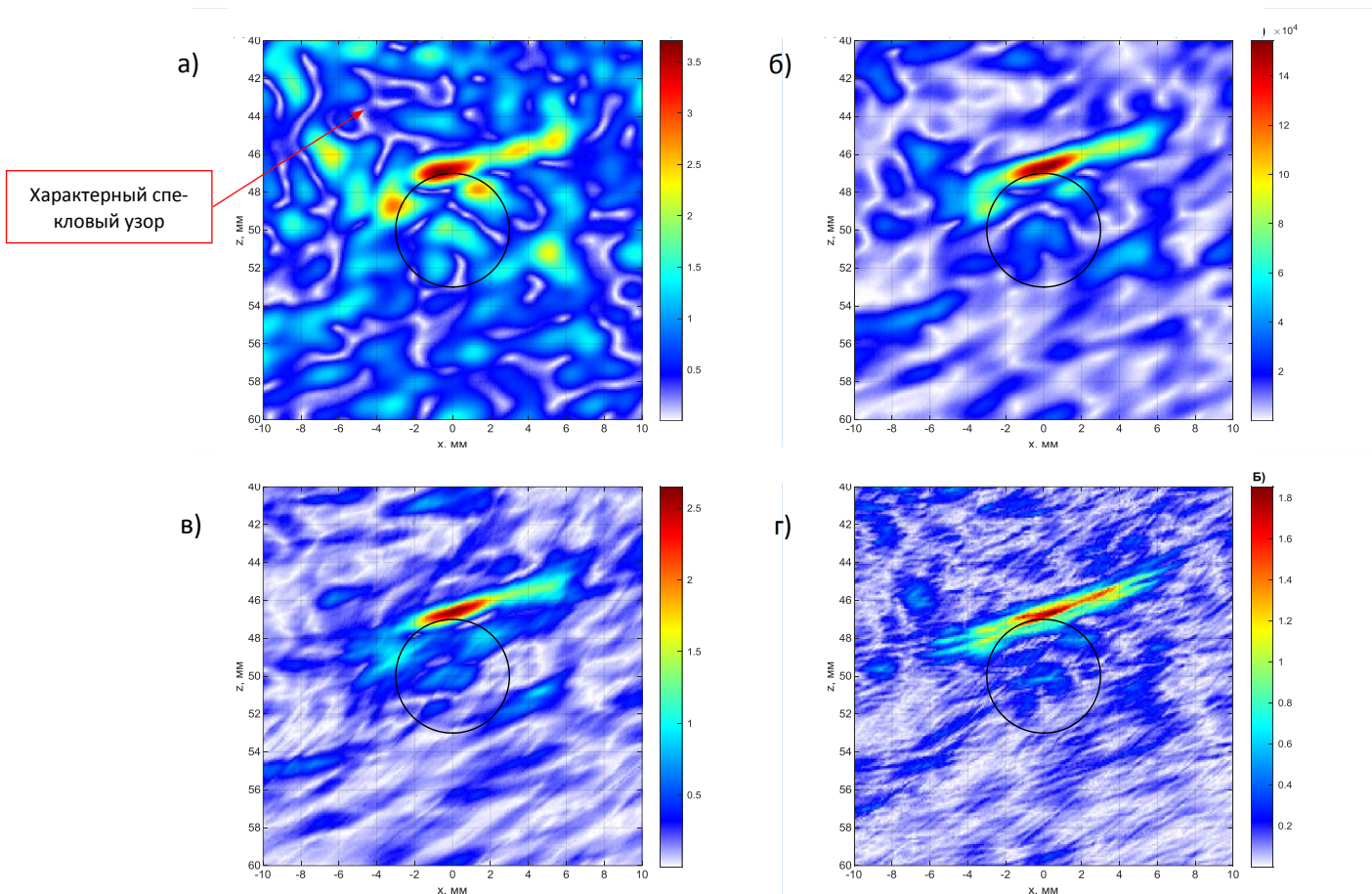


Рис. 7. Изображение БЦО на глубине 50 мм, восстановленное по исходным эхосигналам при объединении как когерентная сумма (а) и с использованием когерентного фактора (б), по МЭ-эхосигналам (в), по СЭ-эхосигналам (г)

Антенная решётка на 5 МГц

Были проведены измерения эхосигналов с использованием АР (5 МГц, 64 элемента, размер пьезоэлемента 0,5×10 мм, зазор между пьезоэлементами 0,1 мм) установленной на рексолитовую призму с углом 17 градусов. АР перемещалась вдоль оси x 70 раз с шагом 0.9884 мм. Эхосигналы измерялись в режимах FMC и PWI в надежде обнаружить дно образца на глубине 100 мм.

БЦО диаметром 6 мм на глубине 30 мм

На Рис. 8 показано изображение БЦО на глубине 30 мм при объединении повыстрельных изображений как когерентная сумма (а) и с использованием когерентного фактора (б). Изображения для разных положений АР когерентно складывались. Объединение повыстрельных изображений с использованием когерентного фактора повысило отношение сигнал/шум более чем на 12 дБ.

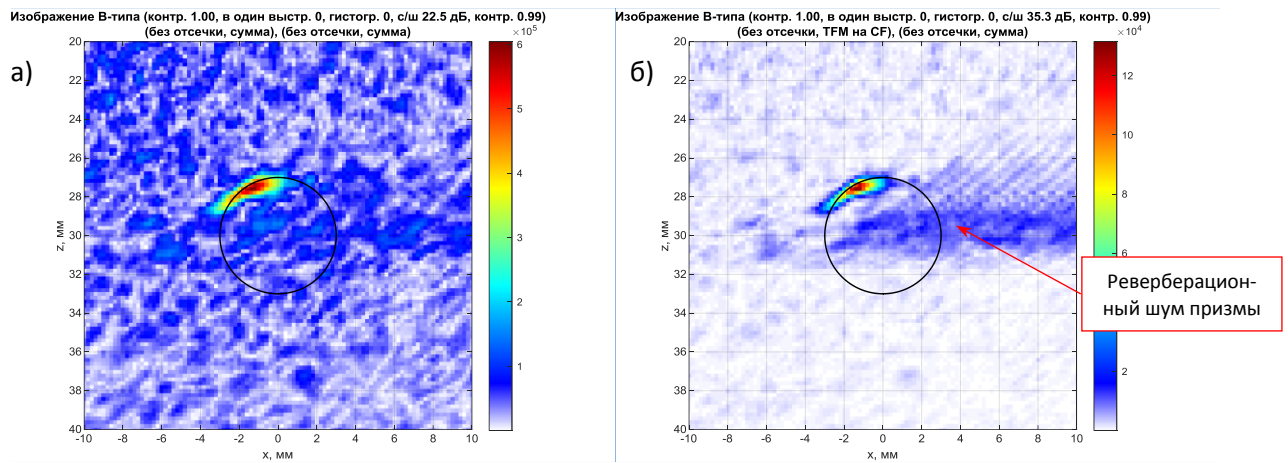


Рис. 8. Изображение БЦО на глубине 30 мм при объединении повыстрельных изображений как когерентная сумма (а) и с использование когерентного фактора (б)

Обнаружить блик границы БЦО на глубине 50 мм не удалось!

Дно

На Рис. 9 показано изображение дна образца на глубине 100 мм при объединении повыстрельных изображений, восстановленных по эхосигналам измеренным в режиме PWI, как когерентная сумма (а) и с использованием когерентного фактора (б). Изображения для разных положений АР когерентно складывались. Плоские волны учитывались в диапазоне от -10 до 10 градусов с шагом 1 градус. Полученный результат неоднозначный. Можно ли считать, что обнаружен блик дна? Или мы наблюдаем структурный шум, который сделался подозрительно похожим на блик дна образца! Или структурный шум очень неоднороден по объёму образца и обнаружение фрагмента блика дна – это следствие того, что над ним уровень структурного шума уменьшился. Это вопрос дальнейшего изучения.

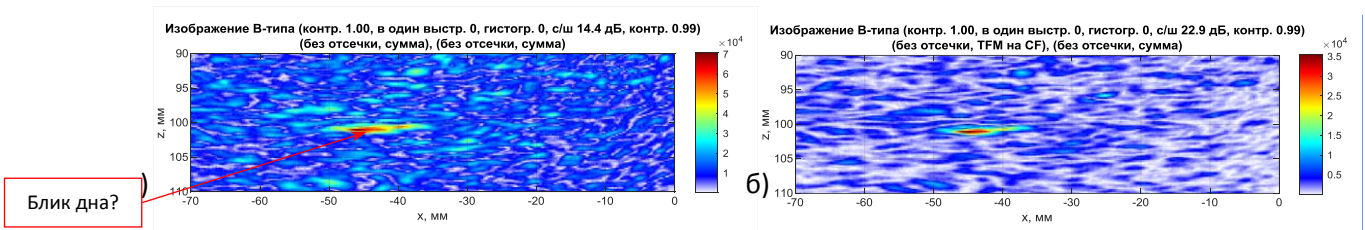


Рис. 9. Изображение дна образца на глубине 100 мм при объединении повыстрельных изображений как когерентная сумма (а) и с использование когерентного фактора (б) (режим PWI)

В режиме FMC не удаётся даже получить и намёк на блик дна!

Выводы

1. Применение когерентного фактора при объединении парциальных повыстрельных изображений повышает отношение сигнал/шум более чем на 9 дБ.
2. Измерения скорости продольной волны в кубике позволило уточнить тип симметрии и значения упругих коэффициентов.
3. Учёт трансверсально-изотропных свойств бронзы позволяет повысить отношение сигнал/шум и восстановить блики границ БЦО отражателей в нужных местах.
4. PWI технология не показала себя как эффективное средство для уменьшения уровня структурного шума, что и не удивительно, так как, закачав в образец больше энергии, уменьшить уровень структурного шума не удастся.

Базулин Е.Г.

09-13 февраля 2022 года

Литература

1. Отчет о применении приборов А1212М, А1214Э, УК1401, А1220М при обследовании Царь-Колокола Троице-Сергиевой Лавры, <https://acsys.ru/otchet-o-primenenii-priborov-a1212m-a1214e-uk1401-a1220m-pri-obsledovanii-czar-kolokola-troicze-serg/>
2. Качанов В.К., Соколов И.В., Карташев В.Г., Шалимова Е.В. Применение специальных алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов при ультразвуковом контроле больших колоколов старинного литья // Дефектоскопия. 2018. №5. С. 3-16.
3. Базулин Е.Г., Евсеев И.В. Применение технологии Plane Wave Imaging в ультразвуковом неразрушающем контроле // Дефектоскопия. 2021. №6. С. 16-25.
4. Базулин Е.Г. Ультразвуковой контроль УЗК двух образцов труб из полиэтилена с использованием технологии PWI, <https://defektoskopist.ru/attachment.php?attachmentid=24000&d=1644090888>
5. Ермолов И.Н. К вопросу о выборе оптимальных параметров эхо-метода ультразвуковой дефектоскопии // Дефектоскопия. 1965. №6. С. 51-61.
6. Bazulin E. The maximum entropy method in ultrasonic non-destructive testing – increasing the resolution, image noise reduction and echo acquisition rate // Entropy 2018, 20(8), 621; DOI: <https://doi.org/10.3390/e20080621>
7. Foucart S., Rauhut H. A mathematical introduction to compressive sensing, Basel, Birkhauser, 2013, 585 p.
8. Фёдоров Ф.И. Теория упругих волн в кристаллах. М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1965. 388 с.
9. Базулин Е.Г. Восстановление изображения отражателей методом C-SAFT с учётом анизотропии материала объекта контроля // Дефектоскопия. 2015. №4. С. 42-52.