



УДК 621.129.32

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ РАССЕЯННОГО СТРУКТУРОЙ МАТЕРИАЛА СИГНАЛА (Часть 2)

В. В. КОШЕВОЙ, И. М. РОМАНИШИН, Р. И. РОМАНИШИН, Р. В. ШАРАМАГА

Приведены результаты экспериментальных исследований по ультразвуковой компьютерной томографии на основе регистрации обратно рассеянного сигнала.

The results of experimental researches of ultrasound computerized tomography on the basis of registration backscattered signal are presented.

В части 1 настоящей статьи изложены теоретические основы метода ультразвуковой компьютерной томографии (УЗКТ) на основе регистрации рассеянного структурой материала ультразвукового (УЗ) сигнала [1]. Метод предложен авторами для реконструкции пространственного распределения (ПР) структурных характеристик материала в объеме изделия и предполагает проведение следующих операций: сканирование внешней поверхности изделия прямым совмещенным или раздельно совмещенным УЗ преобразователем (УЗП), регистрация обратно рассеянного структурой материала УЗ сигнала в виде реализации вида А-scan

[2], предварительная обработка реализаций вида А-scan с учетом затухания и формы зондирующего УЗ импульса, формирование сферических проекций, томографическая реконструкция ПР рассеивающих свойств структуры материала.

Для проведения экспериментальных исследований метода УЗКТ на рассеянном сигнале и для практической реализации новой диагностической технологии на основе этого метода [3] разработан экспериментальный образец портативного УЗ компьютерного томографа UST-05M (рис. 1) [4]. Томограф переносной, предназначен для работы непосредственно в эксплуатационных условиях

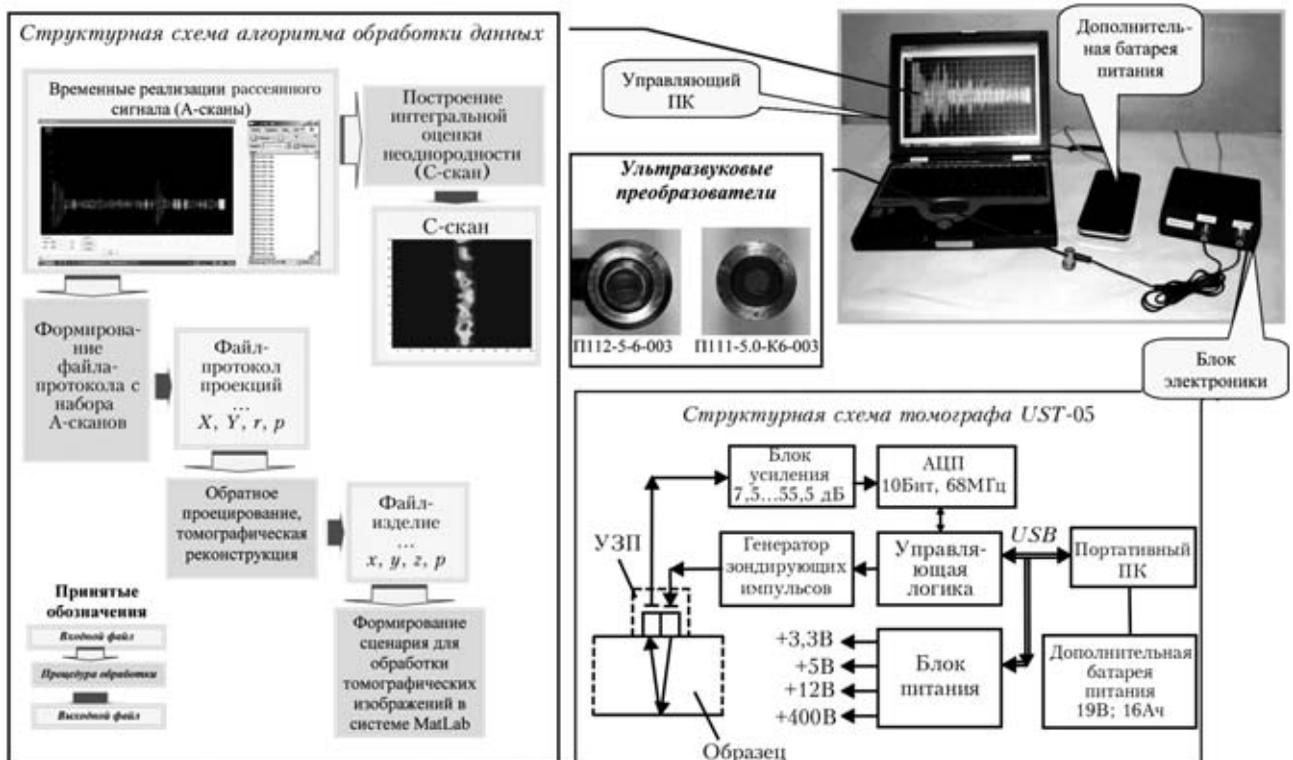


Рис. 1. Ультразвуковой компьютерный томограф UST-05M, реализующий технологию УЗ компьютерной томографии на рассеянном сигнале

© В. В. Кошевой, И. М. Романишин, Р. И. Романишин, Р. В. Шарамга, 2010.



(например, на трубопроводах АЭС), содержит четыре основных блока, включая блок электроники, портативный ПК, дополнительную батарею питания, обеспечивающую 8 ч. работы, и УЗ преобразователи из стандартного комплекта дефектоскопа УД-70. Представлена также структурная схема разработанного специализированного программного обеспечения, реализующего алгоритмы сбора данных, формирования сферических проекций, предварительной обработки данных с помощью «шаблона» и томографической реконструкции.

В данной статье изложены результаты экспериментальных исследований разработанного метода УЗКТ на рассеянном сигнале с использованием томографа применительно к толстолистовому изделию (160×160×32 мм³) из алюминиевого сплава АМГ6 со сварным швом, полученным электронно-лучевой сваркой. Геометрическая форма образца особого значения не имеет. Плосколистное изделие выбрано из-за большей простоты реализации схемы сбора данных и алгоритмов реконструкции. Поверхность образца сканировали прямым совмещенным УЗ преобразователем (УЗП) с шагом 10 мм на частоте 4,1667 МГц, а регистрацию рассеянного структурой материала УЗ сигнала проводили в поле контроля 16×16 точек с частотой дискретизации 50 МГц. Типичная запись (А-scan) рассеянного сигнала («структурного шума»), зарегистрированного на поверхности изделия в точке (x₀, y₀), представлена на рис. 2, а.

Анализ реализации А-scan. Из-за переходных процессов, обусловленных влиянием зондирующего УЗ импульса на приемный УЗП в течение 4,5 мкс, наблюдается «мертвая зона».

Это соответствует 225 отсчетам зарегистрированного сигнала или 13,5 мм по толщине изделия. На первом этапе проводили усреднение модулей отсчетов УЗ сигнала на определенном интервале. На рис. 2, б приведены результаты усреднения модулей отсчетов зарегистрированного УЗ сигнала длительностью 360 нс, что отвечает трем перио-

дам зондирующего сигнала. Каждый отсчет усредненных модулей реализации А-scan (рис. 2, б) характеризует «рассеивающую способность» структуры металла, находящейся в пределах части сферы, которая определяется углом раскрытия диаграммы направленности УЗП с центром в точке (x₀, y₀) и радиусом r = t/2c.

Проведены две серии экспериментов: построение 2D-изображений типа С-scan [1] и 3D-томографических изображений. Изображение типа С-scan (рис. 3), соответствующее поверхности изделия в пределах поля контроля, отображает усредненную по толщине изделия «рассеивающую способность» металла в области сканирования и является поисковым изображением. На основе поискового изображения определяют аномальные области в объеме изделия, которые в дальнейшем, при необходимости, детально исследуют методами 3D-реконструкции.

Интегральная оценка рассеянной составляющей. На рис. 3, а приведено реконструированное по результатам эксперимента изображение вида С-scan, соответствующее полю контроля 16×16 точек, а на рис. 3, б — то же изображение, реконструированное по результатам повторного эксперимента. Каждая точка этого изображения получена путем усреднения (по длине реализации) модулей отсчетов зарегистрированной реализации А-scan:

$$S(i, j) = \sum_{k=1}^N \frac{|S_k|}{N},$$

где N — количество отсчетов в реализации А-scan; i, j = 1, ..., 16.

Как видно из рис. 3, на изображениях вида С-scan просматривается шов (на 8-й линейке по вертикале).

Проведены также экспериментальные исследования 3D-томографических технологий реконструкции рассеянной составляющей.

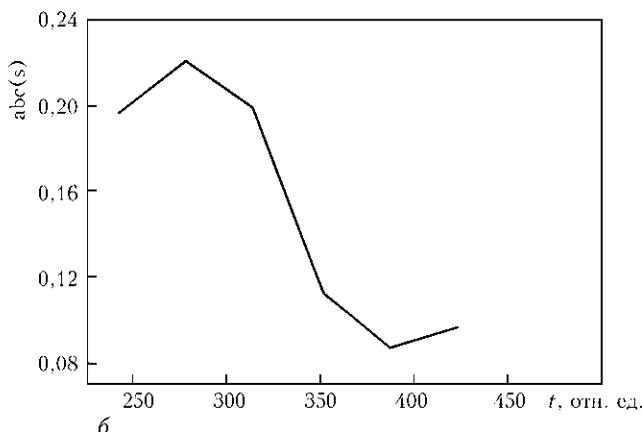
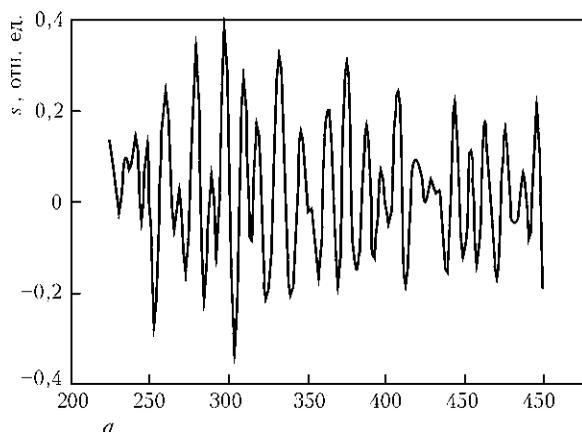


Рис. 2. Пример реализации А-scan в точке (4, 8) (а) и усредненные модули этой реализации (б)

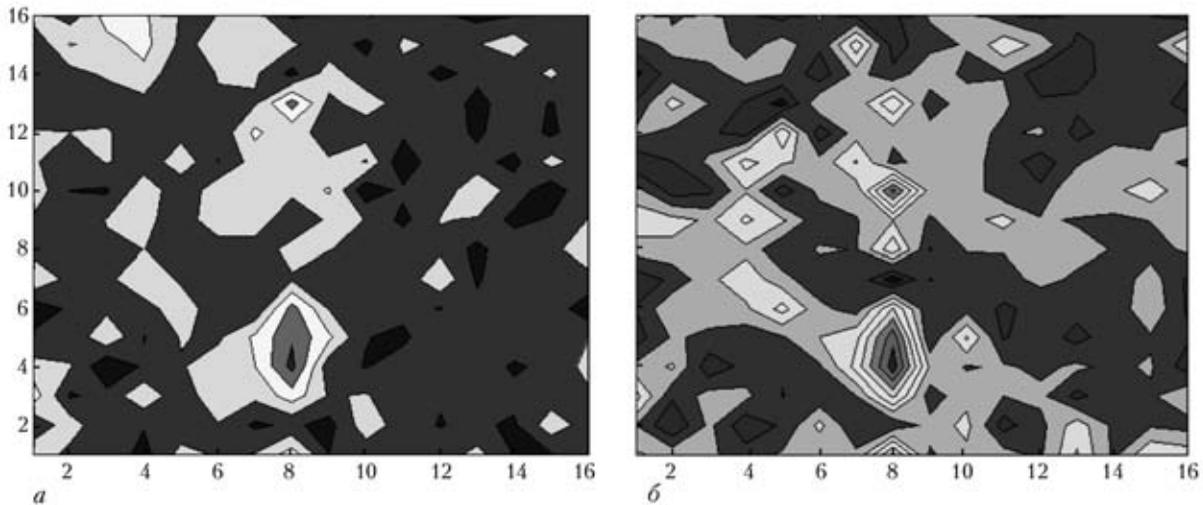


Рис. 3. Экспериментально реконструированное изображение вида С-scan: *a* — первичный; *б* — повторный измерительный эксперимент

Анализ влияния параметров схемы сбора данных. В части 1 данной статьи по результатам численного моделирования были определены тенденции влияния параметров схемы сбора данных (шага сканирования, угла раскрытия диаграммы направленности УЗП) на качество результатов томографической реконструкции [1]. Было установлено, что конечный шаг сканирования при реконструкции на основе сферических проекций в диапазоне углов, меньших 90° , приводит к отсутствию проекционных данных в пирамидообразных (конусообразных) областях между точками сканирования. Угол при вершине пирамиды определяется углом раскрытия диаграммы направленности УЗП, длина стороны основы пирамиды — шагом сканирования. Высота пирамиды определяет «мертвую зону», обусловленную конфигурацией схемы сканирования.

При угле раскрытия антенны 30° и шаге сканирования 10 мм «мертвая зона», обусловленная схемой сканирования, составляет 8,6 мм, а при шаге сканирования 5 мм — 4,3 мм. В то же время «мертвая зона», обусловленная влиянием зондирующего УЗ импульса, составляет 13,5 мм и является определяющей.

Влияние предварительной обработки реализаций А-scan. Проведены экспериментальные ис-

следования влияния на качество томографической реконструкции предварительной обработки реализаций А-scan, в частности, выбора информативного параметра (усреднение модулей или квадратов отсчетов реализаций А-scan) и количества отсчетов реализаций А-scan, по которым осуществляется усреднение.

На рис. 4 приведены экспериментально реконструированные томографические изображения одного из сечений (по толщине листового изделия перпендикулярно сварному шву), которое отвечает 4-й линейке по горизонтали на С-скане, при усреднении модулей и квадратов модулей по 18 и 36 отсчетам.

Видно, что томографическое изображение, реконструированное на основе усредненных квадратов модулей отсчетов, является более контрастным, чем томографическое изображение, реконструированное на основе усредненных модулей отсчетов, т. е. при реконструкции на основе усредненных квадратов модулей отсчетов усиливается информация о «сильно рассеивающих» неоднородностях, в то же время теряется информация о «слабо рассеивающих» неоднородностях. С этой точки зрения для оценки ПР рассеянной составляющей в как можно более широком диапазоне

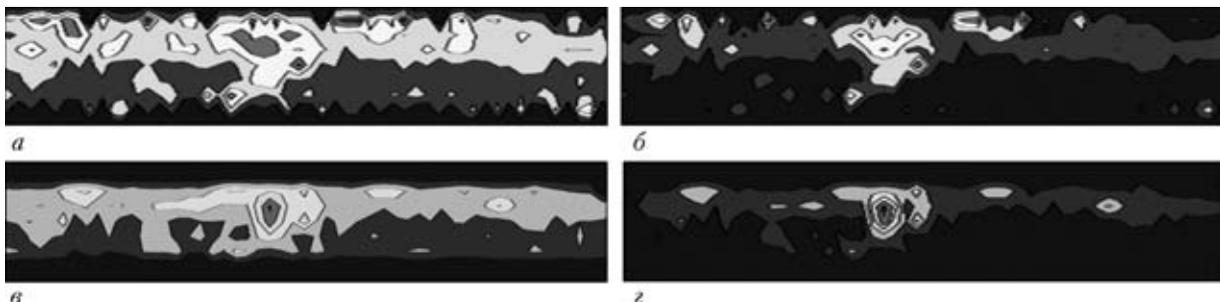


Рис. 4. Томографические изображения перпендикулярного к оси сварного шва сечения: *a, в* — соответственно усреднение модулей по 18 и 36 отсчетам; *б, г* — соответственно усреднение квадратов модулей по 18 и 36 отсчетам



интенсивностей более эффективным является усреднение модулей А-скана.

При увеличении количества отсчетов, по которым осуществляется усреднение отсчетов реализации А-scan для формирования проекционных данных в виде сферических проекций, увеличивается шаг реконструкции по радиусу, что приводит к уменьшению количества проекций в единице объема и к «гашению» высших пространственных частот. В то же время уменьшение количества отсчетов, по которым осуществляется усреднение, приводит к увеличению «зашумленности» изображения.

Проведены также экспериментальные исследования зависимости качества реконструкции от угла раскрыва диаграммы направленности УЗП и шага дискретизации по углам.

На рис. 5 приведены экспериментально реконструированные томографические изображения одного из вертикальных сечений изделия, перпендикулярного сварному шву. Сечение соответствует 4-й линейке по горизонтали на изображении С-scan (см. рис. 3) при усреднении модулей по

11 отсчетах для угла раскрыва диаграммы направленности УЗП 20 и 30° при шаге по углам 10 и 5°.

Угол раскрыва диаграммы направленности УЗП следует выбирать на основе априорных данных по результатам предварительных экспериментальных исследований зондирующего УЗП. Уменьшение угла раскрыва увеличивает «мертвую зону» по глубине (по закону котангенса), обусловленную схемой реконструкции, что можно компенсировать уменьшением шага сканирования. Уменьшение шага реконструкции по углам детализирует изображение, хотя увеличивает время реконструкции и необходимый объем памяти.

Оценка повторяемости экспериментов. Проведены повторные экспериментальные измерения обратно рассеянного УЗ сигнала в поле контроля 16×16 точек и повторные реконструкции рассеянной составляющей с целью оценки повторяемости экспериментальных результатов.

На рис. 3, б приведено изображение вида С-scan, реконструированное по результатам повторных экспериментальных измерений об-

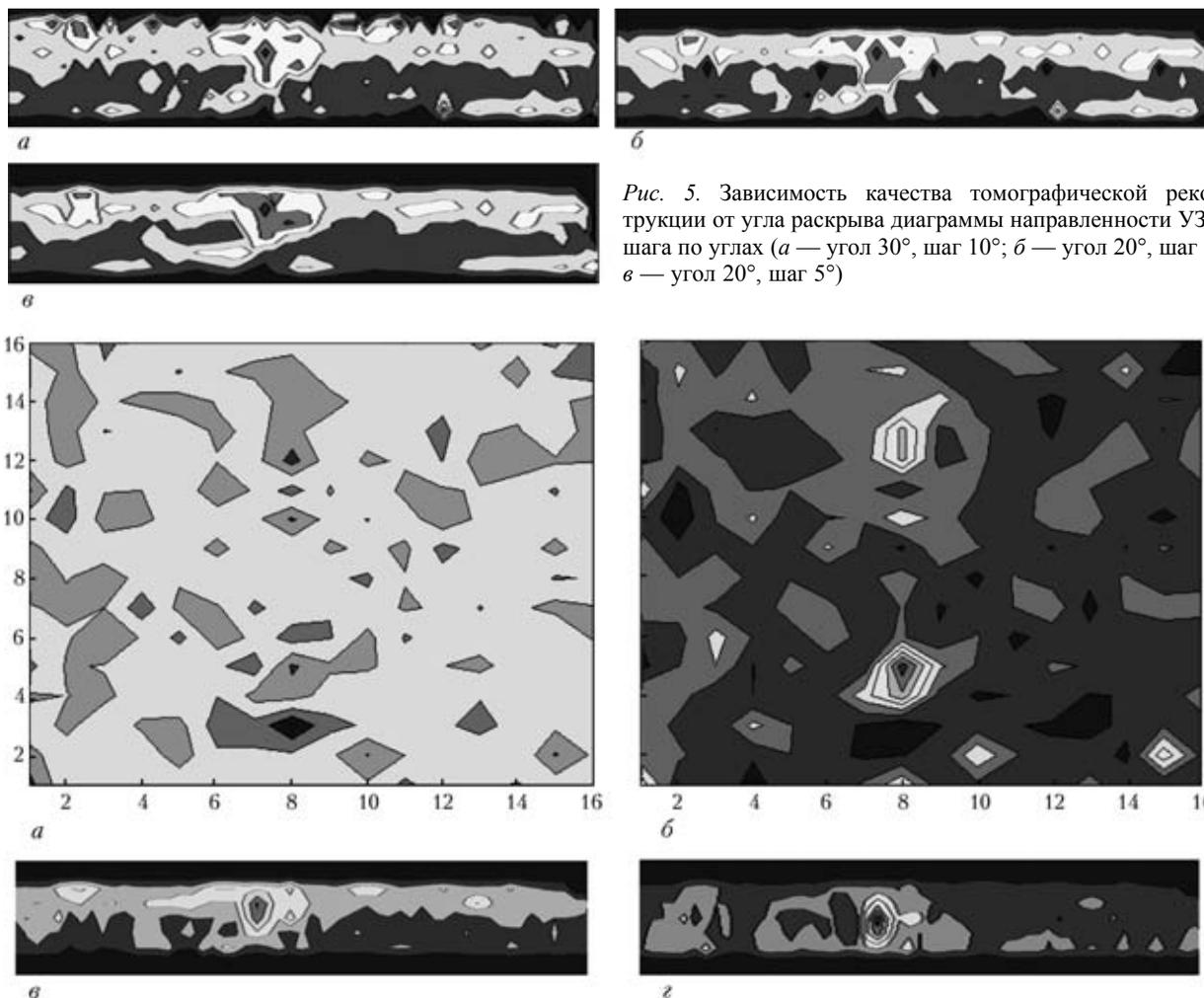


Рис. 5. Зависимость качества томографической реконструкции от угла раскрыва диаграммы направленности УЗП и шага по углам (а — угол 30°, шаг 10°; б — угол 20°, шаг 10°, в — угол 20°, шаг 5°)

Рис. 6. Изображения вида С-scan пространственных распределений коэффициента затухания (а) и «рассеивающей способности» материала с учетом затухания (б) (сравнить с рис. 2, а) и томографические изображения одного из сечений (в — без учета затухания, г — с учетом затухания)

ратнорассеянного сигнала в поле контроля 16×16 точек. Повторный эксперимент проведен через три месяца.

Следует заметить, что из-за «слабости» («зашумленности») обратно рассеянного УЗ сигнала повторяемость отдельных реализаций А-scan значительно хуже, чем повторяемость реконструированных изображений С-scan (сравнить рис. 3, а и рис. 3, б) и особенно реконструированных томографических изображений. Это обусловлено тем, что процедура томографической реконструкции помехоустойчивая и фильтрует высокочастотные шумы в результате наложения (накопления) многих измеренных проекций.

Реконструкция рассеянной составляющей с учетом затухания. При распространении в изделии УЗ сигнал затухает с глубиной. Для учета этого эффекта предложен и экспериментально апробирован алгоритм томографической реконструкции ПР рассеянной составляющей с учетом затухания. При этом определяется коэффициент затухания для каждой реализации А-scan и модифицируются значения усредненных модулей. Коэффициент затухания определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{\Delta n} \ln \frac{\bar{A}_0}{\bar{A}_{\Delta n}},$$

где

$$\bar{A}_0 = \frac{|\bar{s}_1| + |\bar{s}_2| + |\bar{s}_3|}{3},$$

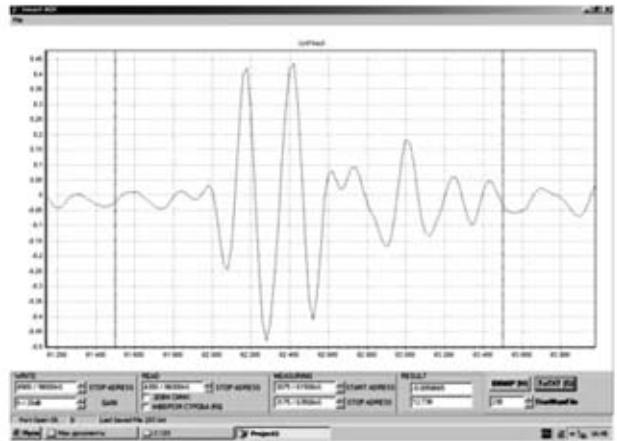
$$\bar{A}_{\Delta n} = \frac{|\bar{s}_5| + |\bar{s}_6| + |\bar{s}_7|}{3},$$

$$\bar{s}_n = \sum_{k=1}^{N_0} \frac{|s_k|}{N_0}, n = 1, \dots, N,$$

N_0 — количество отсчетов реализации А-scan, по которым осуществляется усреднение; N — количество усредненных отсчетов (в данном случае $N_0 = 36, N = 7$).

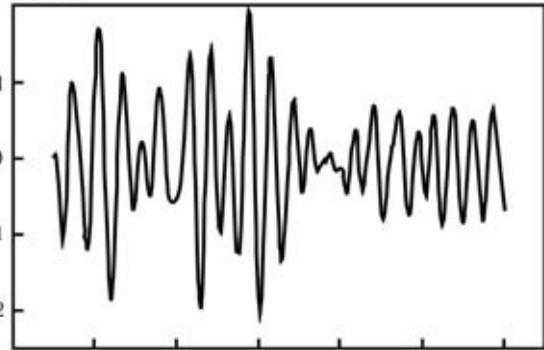
Рассчитаны коэффициенты затухания для каждой реализации А-scan $\alpha(i, j), i, j = 1, \dots, 16$ и построено изображение вида С-scan для коэффициента затухания (рис. 6, а). Видно, что изображение вида С-scan коэффициента затухания хорошо коррелирует с изображением С-scan рассеивающей способности (рис. 3).

После определения коэффициента затухания для каждой реализации А-scan каждый усредненный отсчет каждой реализации А-scan модифицировался в соответствии с выражением:



а

s, отн. ед.



б

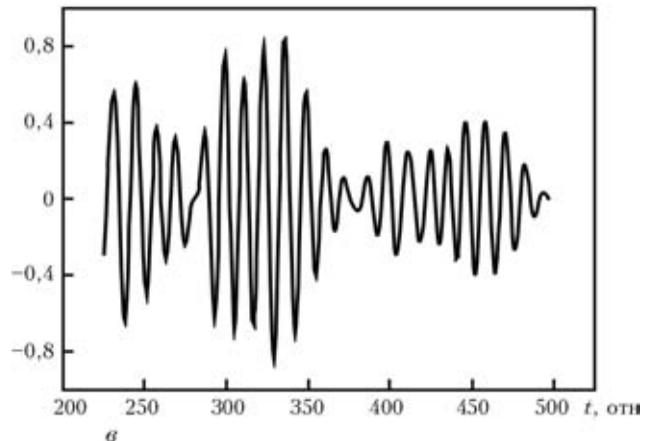


Рис. 7. Отраженный донный сигнал (а), реализация вида А-scan (б) и взаимокорреляционная функция реализации вида А-scan с отраженным донным сигналом

$$\tilde{s} = \bar{s}_n e^{\alpha n}, n = 1, \dots, N.$$

На основе модифицированных усредненных отсчетов построено изображение вида С-scan (рис. 6, б) и проведена 3D-томографическая реконструкция ПР рассеянной составляющей с учетом затухания (рис. 6, в). Видно, что учет затухания приводит к существенному улучшению качества реконструированного томографического изображения по глубине изделия.

Экспериментальная реконструкция на основе взаимокорреляционной функции. Для учета влияния формы зондирующего УЗ сигнала на

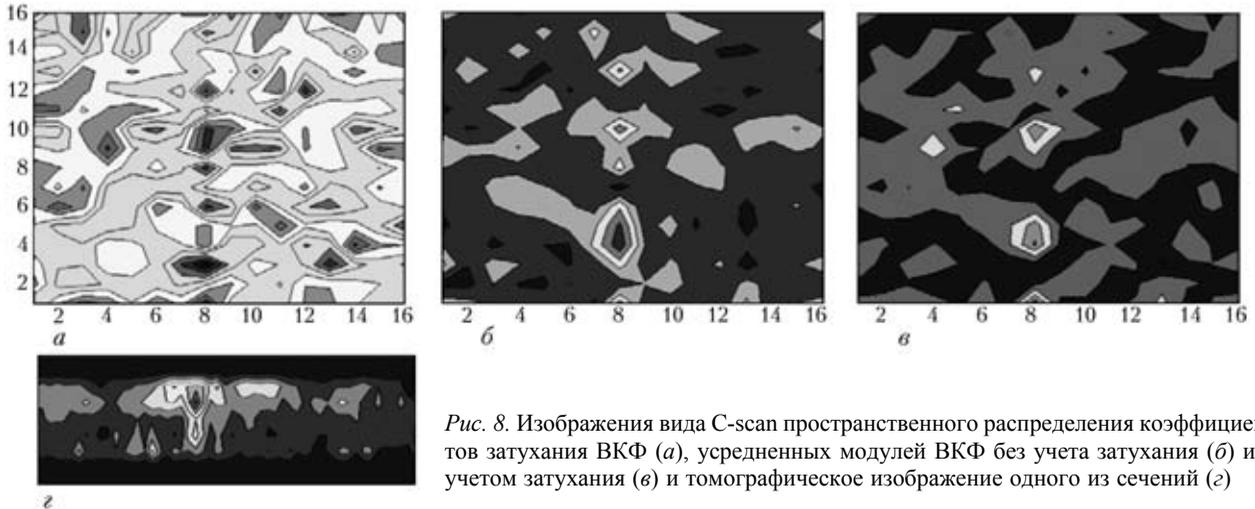


Рис. 8. Изображения вида C-scan пространственного распределения коэффициентов затухания ВКФ (а), усредненных модулей ВКФ без учета затухания (б) и с учетом затухания (в) и томографическое изображение одного из сечений (г)

качество реконструкции проведены экспериментальные исследования возможности использования взаимокорреляционной функции (ВКФ) рассеянного сигнала с отраженным донным сигналом в качестве информативного параметра о «рассеивающей способности» материала.

На рис. 7, а приведена осциллограмма отраженного донного сигнала, на рис. 7, б — пример реализации вида A-scan, зарегистрированной в точке с координатами (4, 7), а на рис. 7, в — ВКФ этой реализации s_k , $k = 1, 2, \dots$, с отраженным донным сигналом u_k , $k = 1, 2, \dots$, рассчитанная по формуле:

$$W_m(i, j) = \sum_k u_k s_{k+m}.$$

На основе усредненных по 36 отсчетам модулей ВКФ рассчитаны коэффициенты затухания ВКФ (по первым и следующим трем усредненным отсчетам) и построены изображения вида C-scan ПР коэффициентов затухания ВКФ (рис. 8, а), усредненных модулей ВКФ без учета затухания (рис. 8, б) и с учетом затухания (рис. 8, в), а также томографическое изображение одного из сечений (г).

Отметим, что применение ВКФ повышает помехоустойчивость томографической реконструкции, позволяет учитывать форму зондирующего УЗ сигнала и уточнять искомое пространственное распределение.

Выводы

Изложены результаты экспериментальных исследований разработанного метода УЗ компьютерной

томографии на основе рассеянного сигнала. Исследования проведены на толстолистовом изделии из алюминиевого сплава со сварным швом с использованием разработанного авторами портативного УЗ компьютерного томографа UST-05M, реализующего диагностические технологии томографической реконструкции пространственного распределения «рассеивающей способности» структуры материала на основе сканирования поверхности изделия прямым пьезопреобразователем и регистрации обратно рассеянного сигнала в виде реализаций A-scan. Эксперименты подтвердили информативность метода и его эффективность для решения задач оценивания изменений объемной однородности структуры металла в процессе его эксплуатации.

1. *Ультразвуковая компьютерная томография на основе регистрации рассеянного структурой материала сигнала. Часть 1* / В. В. Кошевой, И. М. Романишин, Р. И. Романишин и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2010. — № 2. — С. 37–42.
2. *Акустические методы контроля* / Под ред. В. В. Сухорукова. — М.: Высш. шк., 1991. — 283 с.
3. *Спосіб оцінки деградації матеріалу на основі томографічних зображень* / В. В. Кошовий, І. М. Романишин, Р. І. Романишин та ін. // Декларативний патент на корисну модель. Заявка ФМІ НАНУ № u 2009 02646 від 23.03.2009 р. Рішення про видачу № 8023/1 від 03.07.2009 р. — Київ: ДП «Український інститут промислової власності».
4. *Впровадження технології ультразвукової комп'ютерної томографії для моніторингу експлуатаційної деградації металу товстостінних елементів АЕС* / Звіт про НДР (заклучний). № держреєстрації 01070005232. — Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України. — 2009. — 104 с.