



УДК 621.129.32

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ РАССЕЯННОГО СТРУКТУРОЙ МАТЕРИАЛА СИГНАЛА (Часть 1)

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

Изложен метод ультразвуковой компьютерной томографии на основе регистрации обратно рассеянного структурой материала сигнала, обычно определяемого в ультразвуковой дефектоскопии термином «структурный шум». Приведена теория метода и результаты численного моделирования.

It has been stated the method of ultrasonic computerized tomography on the basis of registration of the backscattered by a material structure signal, generally determined in ultrasonic defectoscopy by a term «structural noise». The theory of method and results of numerical simulation is resulted.

Зарождение и развитие дефектов в металле является пространственно-временным процессом и сопровождается усилением неоднородности пространственного распределения (ПР) его физико-механических и структурных характеристик, а также параметров напряженно-деформированного состояния. Одним из самых достоверных подходов, позволяющих оценивать преддефектное состояние металла и прогнозировать локализацию областей возможного возникновения дефектов, является экспериментальное определение ПР этих характеристик. Для конструкционных металлов преддефектным можно считать такое состояние, когда дефекты металла, т. е. нарушение его сплошности, еще не сформированы, но уже состоялись локальные изменения его микроструктуры, повышающие вероятность появления дефектов [1–3].

В качестве примера можно привести актуальную в настоящее время в ультразвуковой (УЗ) дефектоскопии задачу оценки изменения степени эксплуатационной деградации металла вдоль стенки трубопровода с агрессивным носителем. На рис. 1 приведены фрагменты микроструктуры металла, зафиксированные в различных слоях вдоль толщины стенки трубопровода после азотирования. Учитывая, что агрессивный носитель в большей степени влияет на деградацию механических свойств металла внутренних слоев трубопровода, с большой степенью вероятности мож-

но предположить, что структурные характеристики металла непосредственно коррелируют со степенью его деградации.

Одним из наиболее информативных и помехоустойчивых неразрушающих методов экспериментального исследования неоднородной структуры металлов на мезоуровне (~ 1 мм для сталей) в преддефектном состоянии является метод ультразвуковой компьютерной томографии (УЗКТ), который основывается на регистрации обратно рассеянного структурой металла УЗ сигнала, параметры которого являются наиболее чувствительными к структурным изменениям. Томографическую реконструкцию ПР рассеивающих свойств структуры металла можно проводить на основе регистрации трансмиссионного или рассеянного сигналов [4–6]. В случае регистрации трансмиссионного сигнала увеличение коэффициента рассеивания приводит к уменьшению интенсивности этого сигнала, при регистрации рассеянного сигнала — к его увеличению.

Настоящая работа посвящена разработке метода УЗКТ на основе регистрации обратно рассеянного структурой металла УЗ сигнала. Рассеянный УЗ сигнал формируется за счет взаимодействия зондирующей УЗ волны со структурной неоднородностью металла — кристаллитами или их совокупностью — и может быть представлен как сумма большого количества элементарных эхо-



Рис. 1. Микроструктура металла вдоль толщины стенки трубопровода после азотирования: а, в — соответственно внешняя и внутренняя поверхность; б — срединный слой

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



сигналов той же формы и длительности, что и зондирующий сигнал. В результате случайного характера акустических свойств элементарных рассеивателей амплитуды элементарных эхо-сигналов и время их прихода на приемник являются также случайными величинами. Таким образом, рассеянный структурой металла УЗ сигнал можно представить как ограниченную временную реализацию случайного процесса, который формируется при распространении совокупности эхо-сигналов от элементарных структурных элементов металла в направлении приемника (рис. 2).

В такой постановке проблема УЗКТ в неразрушающем контроле практически не исследовалась, поскольку в этом случае информационным и исходным для последующей реконструкции является слабый шумовой сигнал, так называемый структурный шум, формируемый в результате взаимодействия зондирующего УЗ сигнала при его распространении со структурой металла и регистрируемый в режиме А-scan. Типичный пример такого сигнала приведен на рис. 2.

Томографическая реконструкция на основе сферических проекций (теория). Рассмотрим особенности процедуры томографической реконструкции на основе использования сферических проекций. В задачах УЗ дефектоскопии ближай-

шей диагностической технологией является метод SAFT [7].

Рассмотрим толстолистовое изделие и выберем систему координат, совместив плоскость XOY с поверхностью изделия (рис. 3, а). Ось OZ направим перпендикулярно плоскости изделия. Пусть $f(x, y, z)$ — функция, описывающая ПР неоднородности структуры металла.

Сбор данных осуществляется путем сканирования по поверхности изделия прямым совмещенным УЗ преобразователем (УЗП), УЗ зондирования соответствующего объема изделия и регистрации обратно рассеянного структурой металла УЗ сигнала (рис. 3, б).

Возьмем на поверхности изделия точку (x_0, y_0) и вычислим усредненные значения функции $f(x, y, z)$ по частям полусфер с центром в точке (x_0, y_0) и с разным радиусом R :

$$p(x_0, y_0, R) = \frac{1}{\Delta V} \int \int \int_{(V)} F(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) \delta \times \times \left(\sqrt{(\tilde{x} - x_0)^2 + (\tilde{y} - y_0)^2 + \tilde{z}^2} - R \right) d\tilde{x} d\tilde{y} d\tilde{z}. \quad (1)$$

Множитель $1/\Delta V$ введен для согласования размерности. При практической реализации усреднения путем дискретизации множитель $1/\Delta V$ учитывает количество значений, по которым прово-

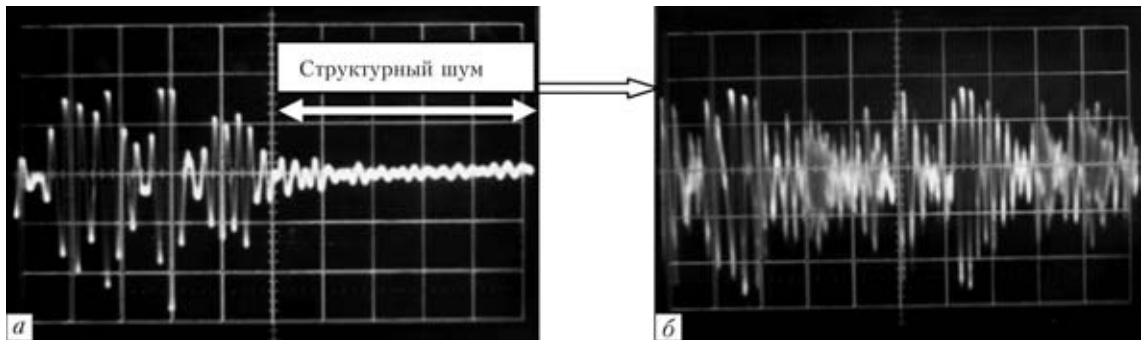


Рис. 2. Временная реализация принятого УЗ сигнала в режиме А-scan (а); «структурный шум» — исходная реализация для формирования проекционных данных (б)

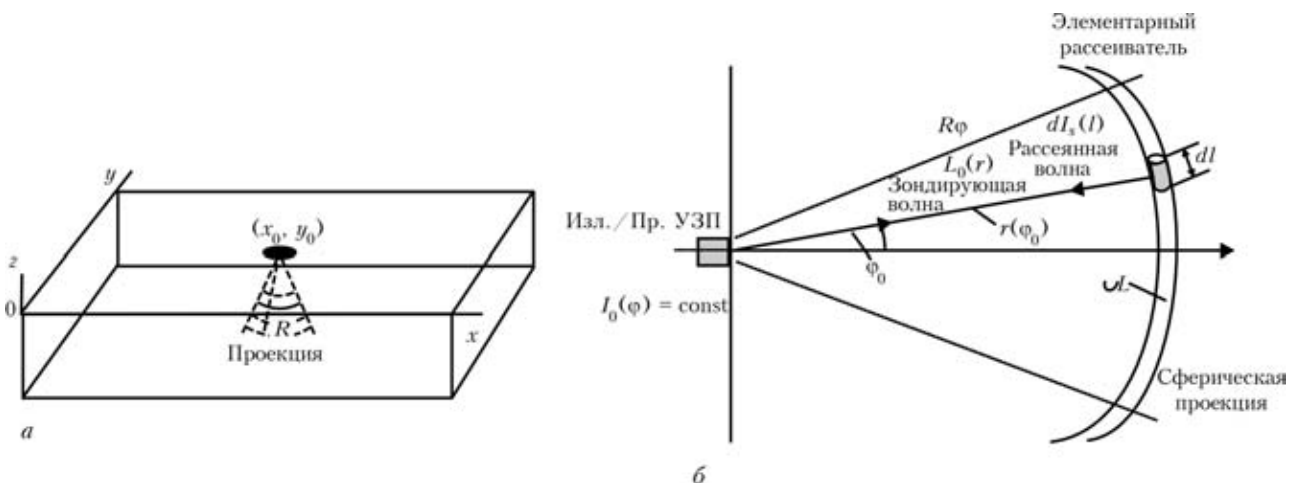


Рис. 3. Схема сбора данных по сферическим проекциям



дится усреднение. Диапазон изменения радиуса R составляет от 0 до h (толщина изделия), т. е. функция $p(x_0, y_0, R)$ определена на плоскости (x_0, y_0) , соответствующей поверхности изделия, а также при $0 \leq R \leq h$. В результате сбора данных получаем набор проекций в виде зависимости (1).

Томографическая реконструкция осуществляется путем обратного проецирования по частям полусфер:

$$g(x, y, z) = \frac{1}{\Delta S} \int \int_{(S)} p(x_0, y_0) \times \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2} dx_0 dy_0 \quad (2)$$

Здесь интегрирование проводится по поверхности изделия, в результате чего определяются значения функции в объеме изделия на основе множества проекций, которые определены с помощью выражения (1). Вклад в точку (x, y, z) вносят только отдельные проекции $p(x_0, y_0, R)$, для которых выполняется условие:

$$\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2} \leq h. \quad (3)$$

Другими словами, для каждой точки (x, y, z) интегрирование проводится по площади, для точек которой удовлетворяется условие (3). Множитель $1/\Delta S$ введен также для согласования размерности. При практической реализации операции «обратного проецирования» (2) путем дискретизации множитель $1/\Delta S$ учитывает количество значений, которые «вносят вклад» в рассматриваемую точку (x, y, z) .

Подставив выражение для сферической проекции (1) в (2), получим интегральное соотношение между искомым и реконструированным распределением:

$$g(x, y, z) = \frac{1}{\Delta S \Delta V} \int \int \int \int_{(S) (V)} f(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) \delta \times \times (\sqrt{(\tilde{x} - x_0)^2 + (\tilde{y} - y_0)^2 + \tilde{z}^2} - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2}) dx_0 dy_0 d\tilde{x} d\tilde{y} d\tilde{z}. \quad (4)$$

Следует отметить, что соотношение между искомым и реконструированным пространственным распределением (4) представляет собой два последовательных усреднения: по частям полусфер (1) и по площади (2) с учетом условия (3).

Аналитический анализ возможностей рассматриваемого метода томографической реконструкции на основе сферических проекций с помощью интегрального соотношения между построенным и искомым распределением является достаточно сложным и сводится к сферическому преобразованию Радона [8]. Для оценки возможностей ап-

паратурной реализации алгоритмов реконструкции проведено численное моделирование процессов сбора данных и томографической реконструкции для некоего модельного пространственного распределения.

Бессеточный подход к построению алгоритмов томографической реконструкции. При реализации методов томографической реконструкции на основе измеренных проекционных данных путем построения суммарного изображения (СИ) в процессе обратного проецирования сталкиваются с необходимостью разбиения объекта исследования на элементарные пиксели (воксели) с последующим расчетом весовых коэффициентов каждого пикселя в каждом луче (традиционный подход) [9]. Для объектов с криволинейными границами или при восстановлении по криволинейным проекциям практическая реализация такой процедуры затруднена. Поэтому предложен новый бессеточный подход к томографической реконструкции, который, в отличие от существующих, не нуждается в предварительном разбиении объекта контроля на элементарные пиксели и сводится к следующим операциям [10]:

- измерение проекционных данных;
- обратное проецирование по всем измеренным проекциям и формирование файла данных со значениями восстанавливаемого параметра в точках, которые принадлежат измеренным проекциям (в отличие от традиционного построения СИ в процессе обратного проецирования);
- построение изображения путем усреднения полученных в результате обратного проецирования данных по элементарным объемам (пикселям или вокселям), форму и размер которых (шаблон) задает исследователь в зависимости от геометрии образца и требуемой точности восстановления.

В отличие от традиционного, бессеточный подход к томографической реконструкции имеет ряд существенных для практической реализации преимуществ (таблица).

Численное моделирование процесса реконструкции по сферическим проекциям. Для исследования возможностей применения рассматриваемого подхода для реконструкции неоднородностей по сферическим проекциям в изделии со сварным соединением в объеме $160 \times 160 \times 32$ задавалась модельная неоднородность в виде суперпозиции гауссоид (рис. 4, а):

$$f(x, y, z) = 10e^{-\left(\frac{x-80}{10}\right)^2} - 3e^{-\left(\frac{x-60}{10}\right)^2} - 3e^{-\left(\frac{x-100}{10}\right)^2} + 2e^{-\left(\frac{x-40}{10}\right)^2} + 2e^{-\left(\frac{x-120}{10}\right)^2}. \quad (5)$$

Следует отметить, что неоднородность (3) является функцией только переменной x и не изме-

Сравнение традиционного и бессеточного подходов

Традиционный подход	Бессеточный подход
Построение СИ в процессе обратного проецирования путем суммирования вклада каждой проекции (луча) в каждый пиксель на основе величины проекции и геометрии пересечения пикселя	1. Обратное проецирование для всех проекций и формирование файла результатов обратного проецирования по полю контроля. 2. Построение СИ путем усреднения результатов обратного проецирования в пределах выбранного шаблона.
Предварительное разбиение исследуемого объекта контроля на элементарные ячейки	Не нужно
Расчет координат входа–выхода каждой проекции для каждой ячейки	—"
Расчет весовых коэффициентов каждой проекции в каждой ячейке	—"
—	Возможно многократное построение изображения с разными шаблонами на основе файла данных с результатами обратного проецирования (без повторных измерений), что позволяет проводить пространственную фильтрацию и другую дополнительную обработку изображения.

няется при изменении y и z . Если сбор данных проводить по плоскостям, параллельным поверхности изделия, для разных расстояний от поверхности, что отвечает $3D$ -преобразованию Радона, то из-за отсутствия изменений функции $f(x, y, z)$ (3) по толщине изделия все проекции Радона будут одинаковыми и такую функцию нельзя восстановить на основе $3D$ -преобразования Радона при описанной схеме сбора данных в одном направлении, перпендикулярном плоскости изделия. В то же время при описанной схеме сбора данных реконструкция на основе сферических проекций возможна, что подтверждается результатами численного моделирования.

Перечислим факторы, от которых зависит качество восстановления на основе сферических проекций:

- параметры схемы сбора данных;
- шаг сканирования по поверхности изделия;
- шаг дискретизации по R ;
- шаг дискретизации по углам интегрирования (при усреднении по частям сфер);
- угол раскрыва диаграммы направленности УЗП;
- параметры реконструкции (как правило, включают параметры сбора данных), а также:
- ограничение применяемого метода (например, обратного проецирования);

– параметры (методы) предварительной обработки зарегистрированного сигнала;

– форма и размер «шаблона» и возможные процедуры при усреднении с помощью «шаблона», которые в сверточной модели описываются опеределенным ядром;

– параметры реконструируемых распределений (если априори известны).

Приведем основные закономерности процесса томографической реконструкции на основе сферических проекций, полученные путем численного моделирования.

На рис. 4, б – г приведены результаты численного моделирования процессов сбора данных и томографической реконструкции для разных углов раскрыва диаграммы направленности УЗП и разных шагов сканирования по поверхности изделия.

Следует отметить, что с уменьшением угла раскрыва диаграммы направленности УЗП, с одной стороны, уменьшается количество проекций в единице объема, что, как правило, ухудшает качество реконструкции, в то же время каждая проекция отвечает меньшей площади, что улучшает качество реконструкции.

Результаты численного моделирования подтвердили, что существует оптимальный угол раскрыва диаграммы направленности УЗП, при ко-

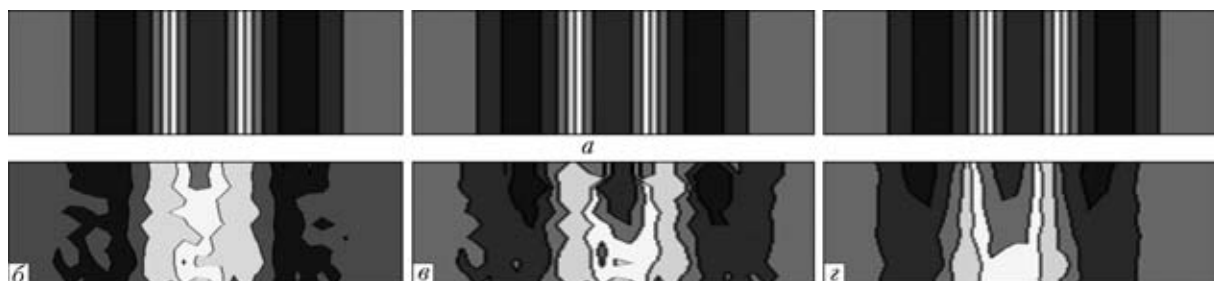


Рис. 4. Результаты численного моделирования процессов сбора данных и томографической реконструкции: а — модельная неоднородность в виде 1D-гауссоиды; б — реконструированные изображения модельной неоднородности при различных углах раскрыва диаграммы направленности УЗП и значениях шага сканирования (б — 90°, шаг 10 мм; в — 30°, шаг 10 мм; г — 30°, шаг 5 мм)



тором качество реконструкции наилучшее. Установлено, что для больших углов раскрыва (полусфера) качество реконструкции ухудшается из-за увеличения площади поверхности, которая соответствует рассматриваемой проекции (по которой (площади) осуществляется интегрирование), а для малых углов раскрыва качество реконструкции ухудшается из-за уменьшения количества проекций в единице объема.

Кроме того, такая особенность конфигурации схемы сбора данных как конечный шаг сканирования при угле раскрыва диаграммы направленности УЗП, меньшем 90° , приводит к формированию «мертвой зоны» по толщине изделия, в которой отсутствуют проекции, в пирамидально- (конусо-) подобных областях с углом при вершине пирамиды, равном углу раскрыва и длиной стороны пирамиды, равной шагу сканирования, что обуславливает методическую погрешность предложенного метода.

При визуализации важную роль играет размер шаблона, с помощью которого проводится построение томографического изображения путем усреднения (по пространству в пределах шаблона) результатов обратного проецирования, и который зависит от многих факторов (параметров сбора данных, обратного проецирования, исследуемых распределений). С увеличением размеров шаблона разрешающая способность томографической реконструкции уменьшается. Выбор шаблона следует согласовывать, в первую очередь, с пространственной частотой исследуемого распределения. Важно отметить, что построение изображений на основе данных файла обратного проецирования может проводиться многократно с использованием разных шаблонов.

Метод томографической реконструкции на основе рассеянного сигнала (предварительные замечания). Установление аналитической связи между рассеивающими свойствами материала и параметрами обратно рассеянного УЗ сигнала на основе дедуктивного подхода затруднено из-за сложности и многофакторности задачи.

При распространении зондирующей УЗ волны в структурно неоднородном материале происходит модуляция ее параметров структурой материала. Информация о свойствах материала отображается в параметрах регистрируемого сигнала аналогично тому, как в модулированном сигнале отображается информация о модулирующем действии. Таким образом, отбор информации о пространственной структуре материала можно представить как получение модулирующего действия из модулированного сигнала.

Характерные размеры рассеивающей неоднородности, которую можно выделить на основе регистрации обратно рассеянного сигнала, определяются длиной зондирующей волны. Так, для алю-

миниевых сплавов ($c \sim 6 \cdot 10^3$ м/с) при частоте зондирующей УЗ волны 5 МГц ее длина $\lambda \sim 1,2$ мм. Следовательно, на основе регистрации обратно рассеянного УЗ сигнала можно получить информацию о рассеивающих свойствах материала, линейные размеры неоднородности которых превышают миллиметры. Оценка линейных размеров восстанавливаемых неоднородностей позволяет выбирать модельные распределения, параметры сбора данных и томографической реконструкции при моделировании и отладке алгоритмов реконструкции, а также при экспериментальных исследованиях.

При рассеянии ультразвука структурой материала с увеличением сечения рассеяния амплитуда обратно рассеянной составляющей возрастает [11]. Поэтому в качестве информативного параметра о рассеивающих свойствах материала выбрана амплитуда обратно рассеянного сигнала.

Проанализируем основные эффекты, которые сопровождают распространение ультразвука в материале и которые следует учитывать при использовании амплитуды обратно рассеянного сигнала в качестве информативного параметра о рассеивающих свойствах материала.

Во-первых, при распространении ультразвука в материале происходит его затухание из-за рассеяния и поглощения. Этот факт необходимо учитывать при использовании амплитуды обратно рассеянного сигнала в качестве информативного параметра о рассеивающих свойствах материала. Следует заметить, что детальный анализ относительной оценки поглощения/затухания сложен и проведен только для частных упрощенных случаев при определенных гипотезах (например, при допущении пропорциональности коэффициента поглощения и коэффициента затухания как функций трех пространственных координат, одной функции — плотности материала; при возможности отделить во времени «баллистическую» составляющую от рассеянной для трансмиссионного случая [12]). Поэтому на практике при использовании амплитуды обратно рассеянного сигнала в качестве информативного параметра о рассеивающих свойствах материала можно учитывать этот факт на основе феноменологических моделей.

Кроме того, при распространении ультразвука в материале в виде сферической волны наблюдается уменьшение амплитуды зондирующего сигнала, обусловленное геометрическим расхождением. Для сферической волны такое расхождение пропорционально $1/r$.

В работе [13] приведена теоретическая оценка влияния затухания и геометрического расхождения на результаты томографической реконструкции, которая свидетельствует о возможности пренебречь геометрическим расхождением при томографической реконструкции и погрешность при этом будет составлять порядка 10 %.



Следует отметить, что амплитуда обратно рассеянного сигнала существенно зависит от диаграммы направленности зондирующих преобразователей.

Метод УЗКТ на основе регистрации обратно рассеянного УЗ сигнала включает следующие процедуры:

регистрации временных реализаций обратно рассеянного УЗ сигнала вида A-scan [14];

предварительной обработки реализаций A-scan для получения проекционных данных в виде сферических проекций с учетом эффектов распространения зондирующего сигнала и затухания;

томографической реконструкции рассеянной составляющей на основе изложенного выше бессеточного подхода с учетом угла раскрытия диаграммы направленности УЗП.

С математической точки зрения описанный метод опирается на сферическое затухающее преобразование Радона, формулы инверсии для которого приведены в работе [8], а упрощенный анализ в [12]. Совместный аналитический анализ сферического затухающего преобразования Радона затруднен. Поэтому дальнейшее исследование будет проведено путем экспериментальной реализации процесса сбора данных, т.е. путем регистрации обратно рассеянного УЗ сигнала в физическом эксперименте и реконструкции томографических изображений рассеянной составляющей.

Вывод

Для получения информации об объемной однородности структуры материала изделия разработан метод УЗ компьютерной томографии на основе регистрации рассеянного структурой металла УЗ сигнала. Метод основывается на регистрации временных реализаций ультразвукового сигнала типа A-scan, на основе которых формируется набор проекционных данных в виде сферических поверхностей, учитывает модели и эффекты распространения УЗ волны в материале и позволяет реконструировать объемное распределение структурных характеристик материала, которые являются важными для оценивания деградационных процессов в материале. Результаты математического и численного моделирования подтвердили возможность получения 2D- и 3D-изображений пространственного распределения рассеивающих свойств материала, а предложенный бессеточный подход к построению алгоритмов томографической реконструкции позволяет значительно сократить объем вычислительных процедур и практи-

чески реализовать эти алгоритмы в УЗ контроле структурных свойств материала, в том числе в объектах с криволинейными границами (трубопроводы). Численное моделирование процессов сбора данных и томографической реконструкции позволило установить степень влияния параметров сбора данных (угол раскрытия диаграммы направленности ультразвукового преобразователя, шаг сканирования) и основных эффектов, сопровождающих распространение ультразвука в материале (затухание и геометрическое расхождение), на качество реконструкции при использовании амплитуды обратно рассеянного сигнала в качестве информативного параметра о рассеивающих свойствах среды.

1. Панин В. Е. Современные проблемы пластичности и прочности твердых тел // Изв. высш. уч. заведений. Физика. — 1998. — № 1. — С. 7–34.
2. Koshovyy V. V., Nazarchuk Z. T. Estimating the Predefective State of a Material Using Methods of Ultrasonic Computerized Tomography // Materials Sci. — 2001. — 37, № 2. — P. 279–293.
3. Ultrasonic tomography technologies for NDT and monitoring of material degradation / Z. T. Nazarchuk, V. V. Koshovyy, E. V. Krivin, I. M. Romanyshyn // Proc. of the Joint EC-IAEA Specialists Meeting, 10–12 March 1999, Petten, Netherlands / Ed. U. von Estorff, L. M. Davies, P. Trampus, Luxembourg, 1999. — P. 79–89.
4. Горшков В. А., Кренинг М. Сравнительный анализ томографии на трансмиссионном и рассеянном рентгеновском излучении // Дефектоскопия. — 2006. — № 4. — С. 83–95.
5. Томография на рассеянном излучении (обобщающая статья) / В. А. Горшков, М. Кренинг, В. М. Юмашев и др. // Завод. лаб. — 2006. — 72, № 1. — С. 24–32.
6. Розробка ультразвукових методів визначення структурної неоднорідності матеріалів на основі реєстрації розсіяного сигналу / Звіт про НДР. № держреєстрації 0105u004307. — Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України. — 2007. — 153 с.
7. Осипов А. В. Акустическая томография // Зарубеж. радиоэлектроника. — 1991. — № 5. — С. 3–29.
8. Ambartsoumian G., Patch S.K. Thermoacoustic Tomography — Implementation of Exact Backprojection Formulas (arXiv:math.NA/0510638v1).
9. Kak A. C., Slaney M. Principles of computerized tomographic imaging. — IEEE Press, 1988. — 322 p.
10. Романишин Р. И. Бессеточный подход к томографическому восстановлению неоднородностей в объектах с криволинейными границами / Мат. 4-й Междунар. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». — Ялта, 10–20 окт. 2006. — С. 69–71.
11. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. — М.: Мир, 1972. — 308 с.
12. Селіщев С. В., Терещенко С. А. Нестационарная двухпоточковая модель переноса излучения для томографии рассеивающих сред // ЖТФ. — 1997. — 67, № 5. — С. 61–65.
13. Терещенко С. А. Методы вычислительной томографии. — М.: Физматлит, 2004. — 320 с.
14. Акустические методы контроля / Под ред. Сухорукова В. В. — М.: Высш. шк., 1991. — 283 с.