

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ВОЛНОВОЙ ТОМОГРАФИИ ЛЭМБА АЛЮМИНИЕВЫХ ПЛАСТИН, ОСНОВАННОЙ НА ВЕЕРНОМ СКАНИРОВАНИИ

© 2022 г. Кай Луо¹, Лян Чэнь^{1,*}, Вэй Лянь¹, Хаобо Вен¹

¹Университет электронных наук и технологий Китая,
Ченду, 611731, КНР
E-mail: *chenliang72@uestc.edu.cn

Поступила в редакцию 21.11.2021; после доработки 16.01.2022
Принята к публикации 21.01.2022

Методы неразрушающего контроля, основанные на распространении волн Лэмба, изучаются уже несколько лет. В данной работе для обнаружения дефектов алюминиевых пластин предлагается метод веерной сканирующей томографии и рассчитываются данные о дефектах алюминиевых пластин при обратном проецировании. Равномерно распределенное расположение датчиков используется на основе схемы сканирования и алгоритма веерно-лучевой томографии. Экспериментальным методом были обнаружены и проанализированы различные дефекты в алюминиевых пластинах. Получена величина характеристического времени, содержащая информацию о дефекте. Предлагается метод вейвлет-преобразования, основанный на методе разложения на эмпирические моды, для уменьшения шума в низкочастотных сигналах волн Лэмба и для восстановления изображений. Результаты показывают, что метод веерной волновой томографии Лэмба помогает обнаруживать дефекты алюминиевой пластины.

Ключевые слова: армированный углеродным волокном полимер, распознавание контуров, обратное проецирование с фильтрацией, морфологическая фильтрация, дефект расслоения.

DOI: 10.31857/S0130308222040042, EDN: BLGHAS

1. ВВЕДЕНИЕ

Неразрушающего контроль (НК) и диагностика являются основой обеспечения качества на производстве. Проверки качества необходимы на всех этапах проектирования, производства и обслуживания основных деталей и конструкций во многих отраслях, особенно в авиации [1—4]. Кроме того, по сравнению с традиционным методом, таким как визуальный контроль, при использовании методики НК, основанной на распространении волн Лэмба, можно обнаруживать дефекты внутри объекта, так как волны Лэмба обладают высокой чувствительностью к поверхностным и внутренним дефектам структуры. НК широко используются при разработке методов выявления дефектов в композиционных и металлических материалах, включая расслоения, отверстия и трещины [5—8]. Lin и Yuan [9, 10] проанализировали и экспериментально изучили распространение волн Лэмба в пластинах интегрированными пьезоэлектрическими (ПЭ) датчиками/актуаторами, пользуясь теорией пластин Миндлина. Они объединили ее с распространением волн Лэмба в материнских платах и исследовали влияние поперечного сдвига и момента инерции на материнских платах.

Для контроля дефектов в их эксперименте генерируется мода A_0 волны Лэмба. Грондель объединил и улучшил связанный метод нормального разложения конечных элементов, чтобы успешнее производить контроль дефектов [11]. Волны Лэмба, особенно симметричная мода S_0 и антисимметричная мода A_0 , широко используются в НК [12—14]. Однако традиционный метод использования волн Лэмба в неразрушающем контроле заключается в получении данных о форме волны для анализа информации о дефекте, и фактическое изображение внутреннего дефекта невозможно получить. В этой статье волна Лэмба в сочетании с веерным сканированием и алгоритмом обратного проецирования используется для выполнения томографической визуализации для восстановления изображения. Такой метод может получить изображение с полной информацией о дефектах, дающей лучший и более интуитивный результат.

Во многих приложениях, таких как бортовые системы предотвращения столкновений, разрешение в азимутальной плоскости более важно, чем разрешение в вертикальной плоскости. В этих случаях для быстрого сканирования целевой области веерный луч более эффективен, чем использование остронаправленного луча [15]. При реконструкции традиционные алгоритмы изображения чаще всего используют сканирование параллельными лучами и алгоритм обратного проецирования. Однако метод сканирования параллельными лучами имеет низкую скорость томографической визуализации и низкое качество восстановленных изображений. Используя метод сканирования веерным лучом под одинаковым углом, можно одновременно собирать несколько проекционных данных. Частота дискретизации метода веерного сканирования выше и точнее, чем метод скани-

рования с параллельным лучом. В данной статье разделе 2 описывается теория веерной волновой томографии Лэмба. В разделе 3 обсуждается эксперимент по веерной волновой томографии Лэмба, приводится анализ его осуществимости и предлагается использование метода вейвлетного шумоподавления. Данный метод основан на методе разложения на эмпирические моды (РЭМ), для уменьшения генерации шума и оптимизации сигнала. В разделе 4 анализируется качество восстановленного изображения и улучшение сигнала после вейвлет-преобразования, а в разделе 5 приводится заключение статьи.

2. МЕТОДЫ

2.1. Принцип веерного сканирования

Традиционные методы ультразвуковой визуализации в основном используют сканирующую томографию с параллельным или остронаправленным лучом, которая работает медленно и имеет низкое качество восстановления. По сравнению со сканированием с параллельным лучом секторное сканирование может собирать данные с нескольких проекций, которые имеют характеристики высокой скорости сканирования и высокой степени охвата. По различному расположению датчиков сканирование секторов можно разделить на два типа: равноудаленное (детекторы расположены на равном расстоянии друг от друга) и изометрическое (с одинаковым угловым интервалом). Схема равноудаленного сканирования может быть разделена на сканирование с однопролетным расстоянием между апертурами и сканирование с двухпролетным расстоянием между апертурами. Схема изометрического сканирования представлена круговым веерным сканированием. Предполагая, что общее количество датчиков равно 16, распределение лучей различных схем сканирования показано на рис. 1 *а—в*.

На рис. 1*а* и *б* показано сканирование структуры с одним перекрестным отверстием и двойным перекрестным отверстием, при этом очевидны артефакты данных, много дефектов данных, малая дальность покрытия и низкая эффективность использования датчиков.

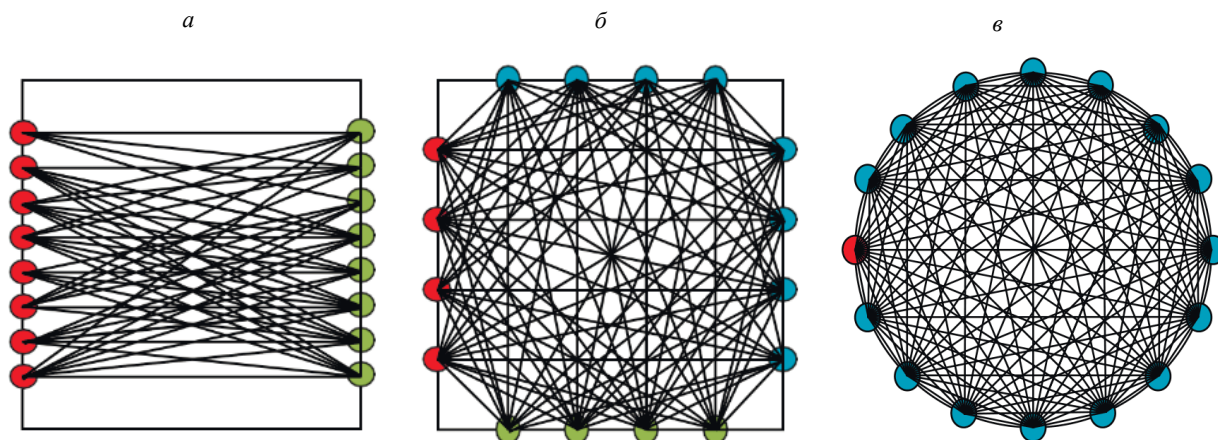


Рис. 1. Распределение лучей на диаграммах сканирования:

а — структура с одним перекрестным отверстием; *б* — двойным перекрестным отверстием; *в* — диаграмма веерного сканирования.

Изометрическая веерная схема обычно используется на круглой участке. Датчики равномерно расположены по окружности контролируемого участка. Когда один из датчиков передает ультразвуковые сигналы через контролируемый участок, другие датчики принимают сигналы в направлении по часовой стрелке. Затем соседние датчики действуют как источник передачи акустического сигнала по часовой стрелке. Процесс сканирования повторяется до тех пор, пока все датчики не будут выступать в качестве источников передачи сигнала и сканирование по схеме веера не будет завершено. Как показано на рис. 1*в*, испускаемые лучи распределяются более равномерно, эффективная покрываемая площадь более обширна, а точность сканирования намного выше, чем у двух других методов.

Согласно кривой дисперсии групповой скорости волн Лэмба, скорость волны зависит от толщины пластины. При встрече волны Лэмба с сильно отражающим дефектом распространение волны Лэмба проявляется как распространение в обход дефекта, что удлиняет путь распространения луча и увеличивает время пролета (ВП). Это эквивалентно уменьшению скорости распространения. Следовательно, проецируемое значение (данные ВП волны Лэмба) на спроецированном пути контролируемой области представляет собой линейный интеграл ее медленности (как обратная величина скорости распространения волны Лэмба $v(s)$) на спроецированном пути. Значение проекции p может быть описано как

$$p = \int_s \frac{1}{v(s)} ds. \quad (1)$$

Датчик расположен согласно описанной выше схеме сканирования веерным лучом. Расчет ВП секторного сканирования необходим для последующего восстановления изображения.

2.2. Принцип ОПФ

Преобразование Радона — функция интегрального преобразования, которая проецирует двумерную плоскость из изображения вдоль направления в одномерное контурное изображение. Математически, как показано на рис. 2, это можно записать в виде:

$$R(f) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - t) dx dy, \quad (2)$$

где t обозначает $x \cos \theta + y \sin \theta$, что представляет собой линию проекции, а θ — угол проекции.

Одним из алгоритмов, реализующих преобразование Радона, является метод обратного проецирования с фильтрацией (ОПФ) [16]. Было показано, что алгоритм ОПФ дает лучшие алгоритмы восстановления изображения даже при более коротком времени вычислений. Алгоритм восстанавливает изображения, оценивая целевые фрагменты изображения из набора проекций. Для двумерных объектов требуется теорема о центральном сечении, с помощью которой получают преобразование Фурье на прямой [17]. Простое восстановление возможно, если предполагается, что другие проекции равны нулю, а значения преобразования Фурье правильно интерполированы в двумерную область Фурье. Алгоритм ОПФ может быть выражен:

$$f(x, y) = \frac{\pi}{N} \sum_{i=1}^N Q_{\theta_i}(x \cos \theta_i + y \sin \theta_i), \quad (3)$$

где $Q_{\theta_i}(x \cos \theta_i + y \sin \theta_i)$ получается из $Q_{\theta}(\omega)$ (так называемой фильтрованной проекции), разностный угол $Q_{\theta_i}(\omega)$ добавляется для оценки $f(x, y)$, в то время как N и θ_i являются данными проекции.

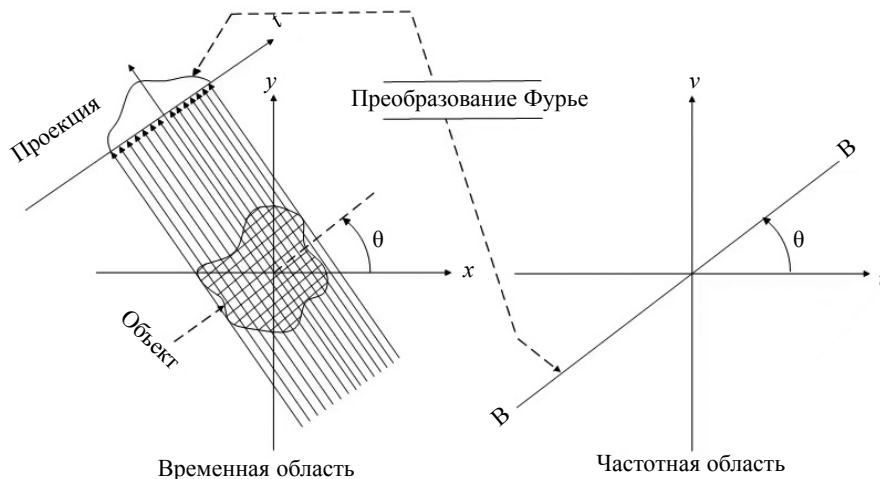


Рис. 2. Схема преобразования Радона.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ И АНАЛИЗ ВЕЕРНОЙ ВОЛНОВОЙ ТОМОГРАФИИ

Базируясь на приведенном выше теоретическом анализе, осуществимость и эффективность волновой томографии Лэмба и вейвлет-преобразования основаны на методе РЭМ с использованием веерной диаграммы направленности.

В НК технология ультразвукового сканирования может обнаруживать дефекты, которые больше длины волны ультразвука. Чтобы исключить влияние модальной гибридизации на контроль, была выбрана симметричную моду (A0), которая идеально подходит для контроля. Метод вертикального нагружения может использоваться для возбуждения волн Лэмба моды A0 в низкочастотном диапазоне.

Экспериментальная установка на рис. 3 включает алюминиевую пластину, 64 ультразвуковых пьезодатчика, генератор сигналов, предусилитель, осциллограф, компьютер. Различные дефекты расположены в центре круговой области и на $1/3$ радиуса от центра круга. Прямой датчик продольной волны возбуждает волны Лэмба в виде ультразвука в заданной точке. Прямой датчик продольной волны принимает данные о ВП волны Лэмба по часовой стрелке в других положениях. Шестьдесят четыре датчика по очереди возбуждают сигнал по часовой стрелке, а остальные 63 датчика принимают сигнал, проходящий через контролируемую круговую область.

В эксперименте контролируемым объектом является круглый алюминиевый лист радиусом 150 мм. Толщина алюминиевой пластины 2 мм. Плотность листа $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$, модуль Юнга $E = 70 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\sigma = 0,33$.

На алюминиевых пластинах толщиной 2 мм создавались дефекты радиусом 5 мм и 10 мм. Также были дефекты радиусом 10 мм, которые располагались в верхнем правом углу пластины на расстоянии $1/3$ радиуса самой пластины. Глубина дефектов составляла 1,5 мм. В эксперименте окружность с круглой областью контроля радиусом 150 мм была разделена на 64 равные части. Используется пьезоэлектрический керамический ультразвуковой датчик с центральной частотой 500 кГц и диаметром 1 см. Размах напряжения генератора сигнала установлен равным 10 В. Чтобы максимально полностью охватить круглую область для получения более четких изображений и уменьшения артефактов, для зонда выбрано 64 точки дискретизации. Расположение передающего датчика фиксировано и напрямую связано с генератором сигналов по схеме веерного луча. Приемный датчик перемещается и останавливается в направлении по часовой стрелке в соответствии со следующей позицией, отмеченной на экспериментальной платформе. Данные о антисимметричной модальной проекции волны Лэмба по 63 низкочастотным модам могут быть получены сканированием после того, как начнется передача сигналов. Средняя точка каждого объекта контроля — положение прямого датчика, как показано на рис. 3.

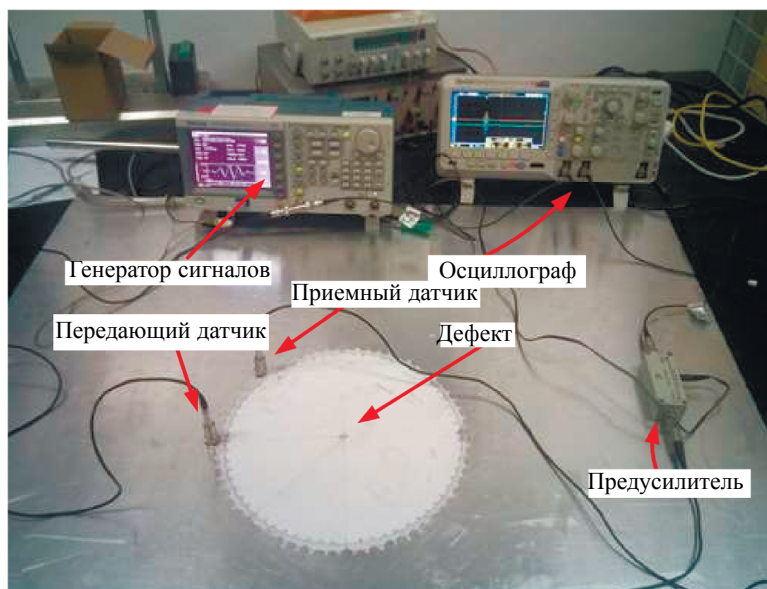


Рис. 3. Экспериментальная установка для волновой томографии Лэмба.

Точно так же передающий датчик был перемещен по часовой стрелке в соответствии со следующей позицией калибровки для сбора и хранения экспериментальных данных о ВП, в итоге было записано 63×64 группы сигналов ВП волн Лэмба.

После анализа сохраненных проекционных данных и шумоподавления сигнала извлекаются данные ВП волны Лэмба из антисимметричной моды A_0 в низкочастотной моде. На основе одно-временного итерационный метода восстановления изображение контролируемой круглой области восстанавливается с использованием экспериментальных проекционных данных и определяется соответствующая информация о дефекте.

Источником возбуждения датчика продольных волн является пятипериодный синусоидальный сигнал возбуждения с центральной частотой 300 кГц, модулированный окном Хеннинга.

Для работы с нестационарными и нелинейными многомодовыми сигналами ВП волн Лэмба предлагается схема фильтрации волн Лэмба, основанная на комбинации РЭМ и вейвлет-преобразования.

Метод РЭМ включает в себя ортогональность и отдельные внутренние компоненты, полученные после рекурсивного процесса [18]. Он раскладывает комплексный сигнал в соответствии с его временной областью и идентифицирует все внутренние колебательные моды в сложном движении. Huang и др. [18] считают, что любой сигнал состоит из различных эмпирических мод (ЭМ). Линейная или нелинейная модель экстремума и пересечения нуля в каждой точке одна и та же. Любое непрерывное пересечение имеет только один экстремум. Каждая схема должна быть независима от других.

Сложный сигнал может быть разложен на конечное число ЭМ с помощью преобразования РЭМ, и каждая компонента содержит характеристики исходного сигнала в разных временных масштабах. ЭМ должны удовлетворять двум условиям: во-первых, на всем временном интервале функции количество локальных экстремумов и точек пересечения нуля должно совпадать или, как максимум, отличаться на единицу. Во-вторых, локальные значения ЭМ симметричны и в среднем равны нулю [18—20].

Суть метода РЭМ заключается в разложении комплексного сигнала на конечное число ЭМ [20]. Компоненты ЭМ получают принудительной стабилизацией сигнала. Подробные этапы РЭМ следующие.

Находятся все экстремумы функции сигнала $x(t)$, а функция верхней огибающей получается с помощью функций сплайн-интерполяции $e_{\min}(t)$ и $e_{\max}(t)$. Функция средней огибающей рассчитывается:

$$m(t) = (e_{\max}(t) + e_{\min}(t))/2. \quad (4)$$

Функция $IMF(t)$ получается путем вычитания из исходного сигнала $x(t)$ функции $m(t)$. Если это вначале не получилось, требуется повторить шаги выше. Остаточная функция обозначается как $R(t)$, и вывод может быть выражен в уравнении:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i(t) + R(t), \quad (5)$$

где $IMF_i(t)$ — функция собственных колебаний, а $R(t)$ — остаточная компонента. РЭМ-фильтр может эффективно отфильтровывать высокочастотный шум. Вейвлет-преобразование сопоставляет исходный сигнал с пространством функций вейвлета и раскладывает сигнал на две части: крупномасштабная аппроксимация и подробное представление. Часть крупномасштабной аппроксимации далее раскладывается в соответствии с определением, чтобы получить дополнительную крупномасштабную аппроксимацию и более точное детальное разрешение. Оптимальный восстановленный сигнал может быть получен путем выбора соответствующих требований к преобразованной части. Вейвлет-преобразование [21—24] позволяет уменьшить степень автокорреляции сигнала, а затем разложенные вейвлет-коэффициенты обрабатываются пороговым анализом. Экспериментальный сигнал ВП низкочастотной многомодовой волны Лэмба ТОФ показан на рис. 4.

Метод вейвлет-преобразования используется после удаления шума из низкочастотного многомодового сигнала Лэмба с помощью РЭМ. Функция вейвлета «db8» хорошо подходит для фильтрации импульсных ультразвуковых сигналов. Из рис. 5а видно, что в пятислойном вейвлет-разложении с использованием «db8» все еще присутствует небольшое количество низкочастотного шума, в то время как сигнал на рис. 5б с использованием шестислойного вейвлет-разложения является очень гладким. Поэтому для разложения шестислойного вейвлета используется вейвлет-функция «db8», а восстановление выбирается так, как показано на рис. 5б.

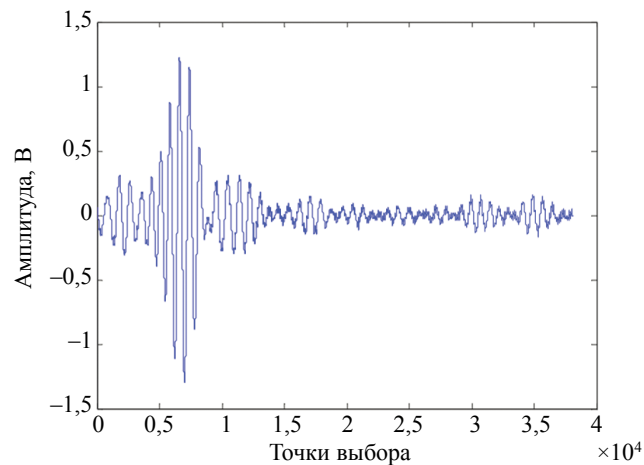


Рис. 4. Сигнал ВП низкочастотных многомодовых волн Лэмба с шумом.

На рис. 5 показано, что компонент шума ЭМ удаляется после того, как РЭМ раскладывает и фильтрует сигнал ВП, чтобы получить сигнал без шума и в дальнейшем фильтровать другое соответствующее шумовое вейвлет-преобразование. Отфильтровывается небольшой резкий шум во фронте и перестройка на участке основного импульса. РЭМ и вейвлет-преобразование делают сигнал очень гладким и хорошо сохраняют модальные характеристики исходного сигнала. Это также приводит к меньшему количеству артефактов и неровностей после восстановления изображения, что делает изображение более точным и четким.

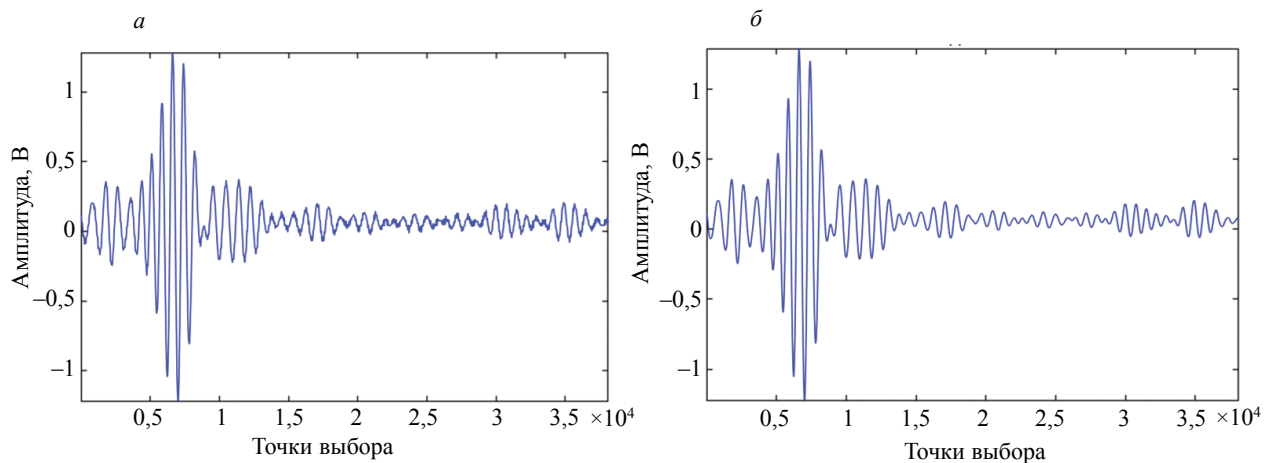


Рис. 5. Сигнал ВП шумоподавляется с помощью РЭМ и вейвлет-преобразования: восстановленная аппроксимация на уровне 5 (а); восстановленная аппроксимация на уровне 6 (б).

Модифицированный метод [17] используется для расчета значения ВП моды А0 волны Лэмба в бездефектной алюминиевой пластине и сравнения с теоретическим значением по дисперсионной кривой волны Лэмба [25]. Результаты показывают, что коэффициент ошибки определения ВП составляет всего 0,36 %.

Путем извлечения упомянутых выше данных ВП и визуализации с помощью алгоритма ОПФ можно получить карту дефектов соответствующей алюминиевой пластины, показанную на рис. 6 а—в.

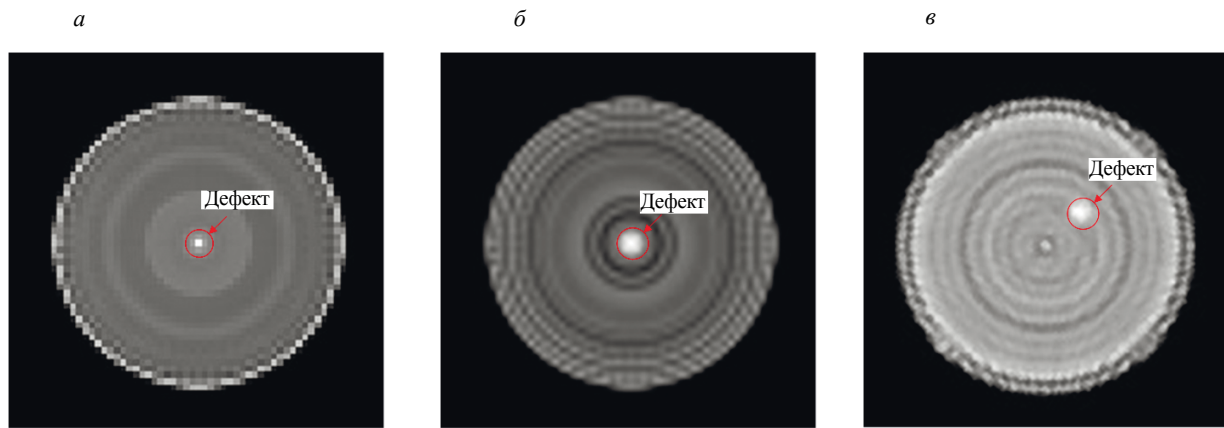


Рис. 6. Изображения дефектов в разных положениях и размеров на алюминиевых пластинах: дефект 5 мм в центре алюминиевой пластины (а); дефект 10 мм в центре алюминиевой пластины (б); дефект 10 мм, смещенный от центра алюминиевой пластины (в).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Используя метод РЭМ и вейвлет-преобразование для обработки сигнала, отправленного и полученного детектором, заметен эффект фильтрации высокочастотного шума, а низкая частота остается точной. Отфильтрованный сигнал является гладким и хорошо сохраняет модальные характеристики исходного сигнала. Описанный выше метод веерного сканирования используется для контроля дефектов алюминиевой пластины. Для опытов были выбраны дефекты радиусом 5 и 10 мм, которые располагались в центре пластины, и офсетные дефекты радиусом 10 мм, которые были смещены от центра пластины. На серых изображениях восстановленных изображений различных моделей дефектов в центре и в правом верхнем углу контролируемого круга имеется заметная белая пятнистая и небольшая круглая область, которая отличается от окружающего значения серой области и оценивается как дефект. Размеры дефектов восстановленных изображений различны, что соответствует модели центрального дефекта с радиусом 5 и 10 мм и модели смещенного от центра дефекта с радиусом 10 мм. По сравнению с экспериментальной моделью дефекты на восстановленных изображении имеют схожую форму, одинаковое расположение, они заметны, что позволяет хорошо восстанавливать модельные дефекты в эксперименте. Эксперименты доказывают, что веерно-лучевая волновая томография Лэмба может обеспечить лучший результат визуализации, и чем больше дефектов, тем четче результат визуализации.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ультразвуковой метод НК металлической алюминиевой пластины исследуется методом веерных ультразвуковых волн Лэмба. Во-первых, кратко представлены метод веерного сканирования и принципы его работы. Затем экспериментальный метод используется для контроля технологии веерно-лучевой томографии Лэмба. Обнаружено, что метод возможно применять для контроля дефектов алюминиевой пластины. Извлечение сигнала методом РЭМ и вейвлет-преобразование делает сигнал более гладким, дает превосходный эффект фильтрации высокочастотного шума.

РЭМ и вейвлет-преобразование объединяются для обработки данных ВП, и сигнал сглаживается. Восстановленное изображение имеет высокое качество и содержит мало артефактов. Координаты и форма дефектов соответствовали экспериментальному положению и размеру точек дефекта. Таким образом, веерно-лучевая сканирующая томография может быть эффективно и точно применена для контроля дефектов алюминиевых пластин.

Данные, подтверждающие результаты исследования, можно получить у авторов по обоснованному запросу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Park E., Kim N., Kim S., Kwon D.* Nondestructive wire fault diagnosis using resistance spectroscopy analysis // *J. Mech. Sci. Technol.* 2019. V. 33. P. 3649—3654.
2. *Bui H.K., Wasselynck G., Trichet D.* Application of Degenerated Hexahedral Whitney Elements in the Modeling of NDT Induction Thermography of Laminated CFRP Composite // *IEEE Trans. Magnetics.* 2016. V. 52 (3). P. 1—4.
3. *Hussein A., Albarody T., Alebrahim R.* Damage detection in glass/epoxy composite structure using 8–12 GHz X-band // *J. Mech. Sci. Technol.* 2020. V. 34. P. 1111—1117.
4. *Laroche N., Bourguignon S., Carcreff E.* An Inverse Approach for Ultrasonic Imaging From Full Matrix Capture Data: Application to Resolution Enhancement in NDT // *IEEE Trans. Ferroelectrics.* 2020. V. 67 (9). P. 1877—1887.
5. *Suh M.W., Shim M.B., Kim M.Y.* Crack identification using hybrid neuro-genetic technique // *J. Sound and Vibration.* 2000. V. 238 (4). P. 617—635.
6. *Su Z., Ye L.* Lamb wave-based quantitative identification of delamination in CF/EP composite structures using artificial neural algorithm // *J. Composite Structures.* 2004. V. 66 (1). P. 627—637.
7. *Kessler S.S., Spearing S.M., Soutis C.* Damage detection in composite materials using Lamb wave methods // *J. Smart Materials and Structures.* 2002. V. 11. P. 269—278.
8. *Biemans C., Staszewski W.J., Boller C.* Crack detection in metallic structures using piezoceramic sensors // *J. Key Engineering Materials.* 1999. V. 12. P. 112—121.
9. *Lin X., Yuan F.G.* Diagnostic Lamb waves in an integrated piezoelectric sensor/actuator plate: analytical and experimental studies // *J. Smart Materials and Structures.* 2001. V. 10. P. 907—913.
10. *Lin X., Yuan F.G.* Detection of multiple damages by prestack reverse-time migration // *J. AIAA.* 2001. V. 39 (11). P. 2206—2224.
11. *Grondel S., Paget C., Delebarre C.* Design of optimal configuration for generating A Lamb mode in a composite plate using piezoceramic transducers // *J. Acoustical Society of America.* 2002. V. 112 (1). P. 84—90.
12. *Song J., Kim S., Kim S.* Lamb wave propagation on a unidirectional CFRP plate: comparison of FEM simulations, experiments, and analytical calculations // *J. Mech. Sci. Technol.* 2021. V. 35 (9). P. 3863—3869.
13. *Moallemi N., Shahbazpanahi S.* A Distributed Reflector Localization Approach to Ultra-sonic Array Imaging in Nondestructive Testing Applications // *IEEE Trans. Signal Processing.* 2014. V. 62 (15). P. 3863—3873.
14. *Rawashdeh Y., Kay S.* A New Physically Motivated Clutter Model With Applications to Nondestructive Ultrasonic Testing // *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control.* 2020. V. 67 (8). P. 1679—1690.
15. *Katare K.K., Chandravanshi S., Sharma A.* Anisotropic Metasurface-Based Beam-Scanning Dual-Polarized Fan-Beam Integrated Antenna System // *IEEE Trans. Antennas, Propagation.* 2019. V. 67 (12). P. 7204—7215.
16. *Effendi M.R., Sekar Ningrum F.A., Amri N.A.* Interpolation Effect on FBP-Based Image Reconstruction of Measured L-Band Microwave Tomography // *IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite.* 2021. P. 290—293.
17. *Chen L., Xiao Q., Wei L.* A time of flight revising approach to improve the image quality of Lamb wave tomography for the detection of defects in composite panels // *Eng. Compos. Mater.* 2018. V. 25 (3). P. 587—592.
18. *Li S., Qin N., Huang D.* Damage Localization of Stacker's Track Based on EEMD-EMD and DBSCAN Cluster Algorithms // *IEEE Trans, Instrum Meas.* 2020. V. 69 (5). P. 1981—1992.
19. *Singh S., Kumar N.* Combined rotor fault diagnosis in rotating machinery using empirical mode decomposition // *J. Mech. Sci. Technol.* 2014. V. 28 (12). P. 4869—4876.
20. *Huang N.E., Shen Z., Long S.R.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* 1971. V. 454.1998. P. 903—995.
21. *Rinkevich A.B., Perov D.V.* A wavelet analysis of acoustic fields and signals in ultrasonic nondestructive testing // *Russian Journal OF Nondestructive Testing.* 2005. V. 41 (2). P. 93—101.
22. *Perov D.V., Rinkevich A.B., Smorodinskii Ya.G.* Wavelet Filtering of Signals from Ultrasonic Flaw Detector // *Russian Journal OF Nondestructive Testing.* 2002. V. 38 (12). P. 869—882.
23. *Chen L., Li X., Li X.B.* Signal extraction using ensemble empirical mode decomposition and sparsity in pipeline magnetic flux leakage nondestructive evaluation // *Review of Scientific Instruments.* 2009. V. 80 (2). P. 025105.
24. *Chen L., Li J.L., Zeng Y.K.* Magnetic Flux Leakage Image Enhancement using Bidimensional Empirical Mode Decomposition with Wavelet Transform Method in Oil Pipeline Nondestructive Evaluation // *Journal of Magnetics.* 2019. V. 24 (3). P. 423—428.
25. *He Y., Zhu Y.P., Tu X.T.* Dispersion curve analysis method for Lamb wave mode separation // *Structural Health Monitoring-An International Journal.* 2020. V. 19 (5). P. 1590—1601.