

УДК 620.179.1

Е.А. Давыдов, старш. научн. сотр., канд. техн. наук, А.Л. Шекеро, научн. сотр.
Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, г. Киев

М. Миховски, А. Алексиев

Институт механики Болгарской Академии наук, г.София

Д.В. Трушаков, доц., канд. техн. наук

Кировоградский национальный технический университет

Пространственно-временной анализ дифрагированных сигналов методом TOFD при автоматизированном неразрушающем контроле

В статье описаны исследования и выполнен пространственно-временной анализ дифрагированных сигналов методом TOFD при проведении автоматизированного ультразвукового неразрушающего контроля. Получена математическая модель дифрагированного сигнала от несплошности. Используя полученные выражения можно предложить конкретные решения пространственно-временной фильтрации для схем с применением большего количества преобразователей с учетом особенностей их расположения.

автоматизированная система, неразрушающий контроль, метод TOFD, дифрагированный сигнал

Введение. Все более возрастающие требования к качеству и надежности изготавливаемой продукции и оборудования, которое находится в эксплуатации, требуют использования точных методов и автоматизированных средств неразрушающего контроля (НК) для определения мест расположения дефектов, а также их конфигурации и геометрических размеров, которые позволят сделать вывод о степени их опасности.

Применение автоматизированных систем НК позволяет значительно повысить качество изготавливаемой продукции на предприятиях машиностроения, а также сократить затраты на проведение контроля. К особенностям современной дефектоскопии следует отнести то, что, несмотря на широкую номенклатуру серийно выпускаемых приборов НК, специфика для каждого отдельного случая (особенности структуры и свойств материала, формы контролируемого изделия, пожелания заказчика и т.п.) обуславливает необходимость дополнительных исследований и разработку специализированных приборов и систем НК. Кроме того, в ряде случаев такой путь является экономически более приемлемым для заказчика. Примером таких автоматизированных систем являются многоканальные установки для автоматизированного ультразвукового контроля труб НК-106, НК-180, НК 360, НК 362, разработанные Институтом электросварки им.Е.О.Патона НАН Украины и уже много лет успешно работающие в потоке производства труб большого диаметра Харцызского трубного завода и Выксунского металлургического завода [1], автоматизированная система дефектоскопии ответственных деталей гидронасоса объемного гидропривода ГСТ-90, который входит в состав аксиально-поршневых машин [2].

Постановка проблемы. Определение реальных размеров несплошностей является актуальной задачей дефектоскопии. Необходимость решения этой проблемы

является особенно важной во время эксплуатации объектов. Точные знания о характере и геометрических размерах несплошностей позволяют избегать необоснованных ремонтов, а также своевременно устранять потенциально опасные дефекты. Следует отметить, что качественный ремонт толстостенного оборудования в производственных условиях не всегда возможно выполнить технически, что делает последующую эксплуатацию оборудования менее надежной. Не имея убедительных данных о размерах несплошности, практически невозможно проводить какую-то иную техническую политику, кроме политики ремонтов для устранения обнаруженных несплошностей. Однако, сложившаяся практика не может быть изменена без разработки способов и средств неразрушающего контроля, реализующих дефектометрические подходы.

Разработка новых автоматизированных систем неразрушающего контроля на основе современной технологии ультразвукового контроля с использованием волн дифракции (метод «TOFD») позволяет производить измерения размеров трещиноподобных несплошностей с высокой точностью [3, 4]. Это связано с тем, что по своей сути этот метод является временным. Так, например, толщинометрия относится к группе временных методов контроля. Как известно, точность измерения толщины металла $\pm 0,1$ мм легко реализуется обычными толщиномераами в повседневной практике ультразвукового контроля. Однако в отличие от техники измерения толщины стенки металла измерение реальных размеров несплошностей при помощи волн дифракции связано с их весьма малыми амплитудами. И в этом как раз состоит принципиальная трудность приема дифракционных волн.

Целью исследований является проведение пространственно-временного анализа дифрагированных сигналов методом TOFD с целью увеличения точности измерения размеров дефектов при проведении автоматизированного ультразвукового неразрушающего контроля.

Описание исследований. Дифрагированный сигнал, по своей природе, имеет достаточно низкие энергетические характеристики по сравнению с первичным ультразвуковым сигналом. Отношение амплитуд в первом приближении можно оценить как $1/\sqrt{k}$, где k - волновое число. Кроме этого в процессе сканирования возникают сигналы отраженные структурными неоднородностями металла, которые, хотя и несут определенную информацию, но в данном случае являются шумом, на фоне которого становится достаточно сложно выделить полезный сигнал, дифрагированный на кромке трещины [5]. Особенно актуально это становится при работе с крупнозернистыми материалами, легированными сталями.

Возможность выделения вершины трещины с помощью дифрагированных волн основывается на взаимосвязи амплитудно-пространственных (временных) характеристик. А именно, на зависимости амплитуды сигнала волны, дифрагированной на вершине трещины от положения сканирующей системы преобразователей, а также зависимости определения положения вершины трещины от положения системы преобразователей [6]. Другими словами, одновременно анализируются кинематические и амплитудные характеристики дифракционных волн, что дает возможность выделить сигналы дифрагированных волн от сигналов, имеющих другие характеристики.

Рассмотрим ультразвуковую схему, состоящую из двух отдельных преобразователей (ПЭП). Один ПЭП излучает ультразвуковую волну, второй – принимает. Расстояние между преобразователями является постоянным и не меняется в процессе сканирования (рис. 1).

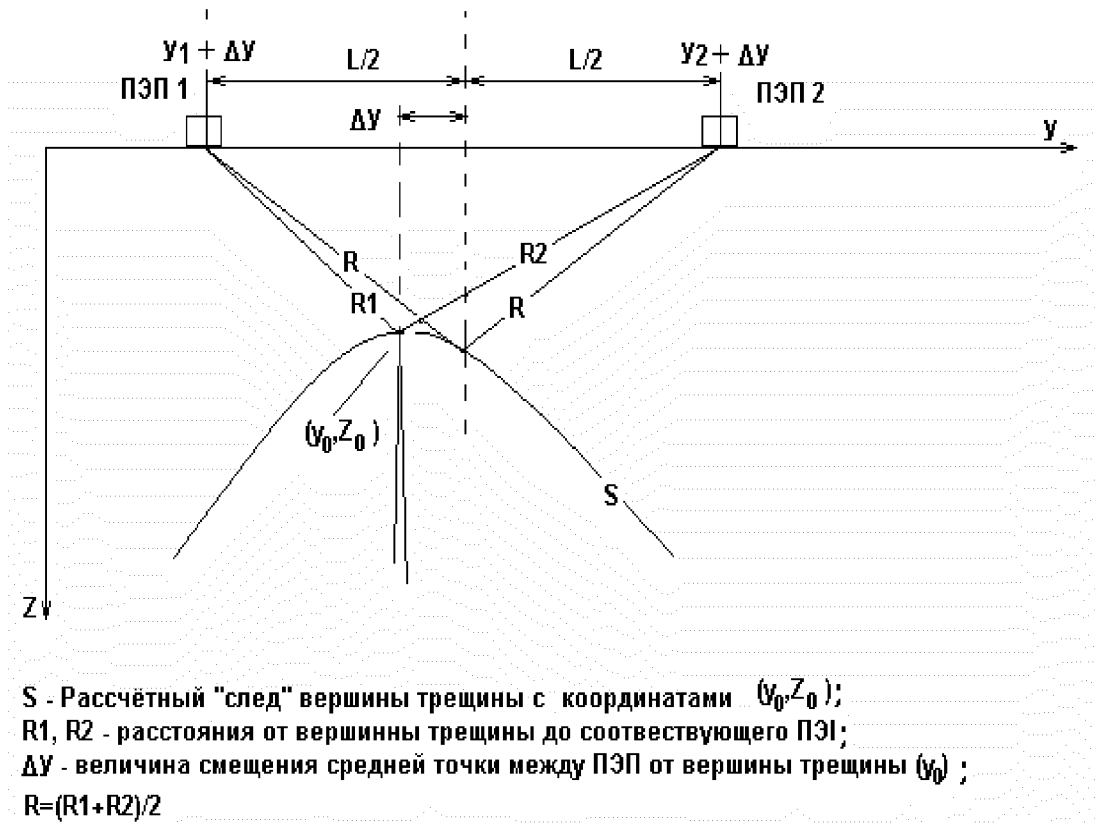


Рисунок 1 – Ультразвуковая схема для определения вершины трещины

Предположим, что вершина трещины имеет физические координаты (z_0, y_0) . При смещении системы преобразователей на Δy мы получим расчетные значения координат вершины трещины (y', z') , которые будут располагаться на определённой кривой $S_{(y_0, z_0)}$. Кривая $S_{(y_0, z_0)}$ является графиком функции

$$S_{(y_0, z_0)} = \begin{cases} z' = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{(y_1 - \Delta y)^2 + z_0^2} + \sqrt{(y_2 + \Delta y)^2 + z_0^2}}{2} \right)^2 - \left(\frac{L}{2} \right)^2}, \\ y' = y_1 + \left(\frac{y_2 - y_1}{2} \right) + \Delta y = y_0 + \Delta y \end{cases}, \quad (1)$$

где y_1 и y_2 – первоначальные положения излучающего и приемного преобразователя;

L - расстояние между преобразователями.

Геометрическое место точек, определяемое системой уравнений (1), есть парабола. В то время как отраженные или рассеянные ультразвуковые волны на элементах структуры металла будут иметь «следы» отличные от параболы. Однако этого признака для идентификации вершины трещины, очевидно, будет недостаточно.

Так, например, небольшая несплошность (пора, непровар и др.) будет иметь «след» практически неотличимый от следа вершины трещины. Поэтому для более достоверного выделения вершины трещины следует использовать амплитудную зависимость дифрагированных на ее кончике сигналов от положения системы преобразователей. Такая зависимость была теоретически определена и выражена в формуле акустического тракта. В данном случае, для простоты изложения и в виду достаточной громоздкости аналитических формул, выражающих количественную

зависимость амплитуды от положения системы ПЭП, будем обозначать эту зависимость для любой точки пространства (y, z) , в которой может находиться вершина трещины, в общем виде, как $F(\Delta y, y, z)$. Другими словами $F(\Delta y, y, z)$ определяет амплитудную зависимость на кривой $S_{(y, z)}$. Далее для точки (y, z) введём функцию, определённую на кинематической кривой $S_{(y, z)}$:

$$\Psi(\Delta y, y, z) = \frac{A(y', z')}{F(\Delta y, y, z)}, \quad (2)$$

где $A(y', z')$ - действительная амплитуда на кинематической кривой $S_{(y, z)}$, полученная в процессе сканирования.

Поскольку (y', z') однозначно определяется $(\Delta y, y, z)$, можно обозначить $A(y', z') = A(\Delta y, y, z)$. Если вершина трещины (z_0, y_0) совпадает с рассматриваемой точкой (y, z) , то при небольшом уровне шумов $\Psi(\Delta y, y_0, z_0) \approx 1$. В идеальном случае при отсутствии шума, который в реальных системах является неотъемлемой составляющей в сигнале, $\Psi(\Delta y, y_0, z_0) \equiv 1$. Обозначив шумовую составляющую в сигнале $A_{шум}$, можем записать $A(\Delta y, y, z) = A'(\Delta y, y, z) + A_{шум}(\Delta y, y, z)$ и следовательно $A'(y', z') = F(\Delta y, y, z)$.

Таким образом:

$$\Psi(\Delta y, y_0, z_0) = 1 + \frac{A_{шум}}{F(\Delta y, y_0, z_0)}. \quad (3)$$

Если вершина трещины (y_0, Z_0) не совпадает с рассматриваемой точкой (y, z) , то (за исключением может быть нескольких точек) везде на кривой S :

$$\Psi(\Delta y, y, z) = \frac{A_{шум}}{F(\Delta y, y, z)}. \quad (4)$$

Рассмотрим структуру шума. В общем случае можно записать:

$$A_{шум} = A'_{шум}(\Delta y, y, z, t) + A''_{шум}(\Delta y, y, z). \quad (5)$$

Первая составляющая $A'_{шум}(\Delta y, y, z, t)$ является случайной знакопеременной величиной во времени. По своей природе это электрические наводки, тепловой, дробовой шум и т.п. (во многих случаях $A'_{шум}(\Delta y, y, z, t) = A'_{шум}(t)$). Накопленное значение для разнополярного случайного сигнала:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t A'_{шум}(\Delta y, y, z, t) dt = 0. \quad (6)$$

Этой составляющей в рассмотрении можно пренебречь, точнее она исключается простым накоплением и усреднением сигнала.

Вторая составляющая шума $A''_{шум}(\Delta y, y, z)$ зависит от структуры материала объекта контроля. Основным источником шумовых ультразвуковых полей является наличие крупного зерна (к формированию такой кристаллографической структуры склонны некоторые высоколегированные стали) и металлургические загрязнения (как правило, это небольшие в доли миллиметров неметаллические включения, имеющие довольно равномерное распределение в металле) обычные для углеродистых сталей. Физическая природа такого шума объясняется повышенным рассеянием на зернах материала и множественных включениях. Часть энергии ультразвуковой волны, которая рассеялась на различных границах зерен в разные моменты времени, попадет

на приемный преобразователь. При этом результирующий сигнал определяется случайным соотношением фаз и амплитуд приходящих волн. Интерферируя между собой, рассеянные волны могут приводить к появлению сигналов больших, чем сквозной сигнал. Эта составляющая шума является наиболее сложно сепарируемой, поскольку её значение не зависит от времени, а определяется пространственными характеристиками, так же как и значения полезного сигнала. Будем называть такой шум структурным. Рассмотрим значения следующих функций с учетом (5) и (6):

$$\frac{1}{S} \int_S \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \int_0^{\infty} \Psi(\Delta y, y_0, z_0) dt \right) \cdot dS = 1 + \frac{1}{S} \cdot \int_S \frac{A''_{шум}(\Delta y, y_0, z_0)}{F(\Delta y, y_0, z_0)} dS, \quad (7)$$

$$\frac{1}{S} \cdot \int_S \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \int_0^{\infty} \Psi(\Delta y, y, z) \cdot dt \right) \cdot dS = \frac{1}{S} \cdot \int_S \frac{A''_{шум}(\Delta y, y, z)}{F(\Delta y, y, z)} dS, \quad (8)$$

где $S = \int_S dS$.

Выражение (7) является количественным выражением совпадения вершины трещины с рассматриваемой (анализируемой) точкой $(y, z) = (y_0, z_0)$, а (8) соответствует любой другой точке $(y, z) \neq (y_0, z_0)$ (не совпадающей с вершиной трещины).

Поскольку речь идет о шуме, то следует исключить ультразвуковые поля, образованные несплошностями материала, которые в свою очередь являются объектом выявления. В этом случае логично ожидать, что:

$$\int_S A''_{шум}(\Delta y, y, z) dS \rightarrow 0 \quad (9)$$

или, по крайней мере, к некоторому значению, не зависящему от конкретной точки (y, z) . Этот вывод основывается на случайном характере распределения источников рассеяния. Поэтому также:

$$\frac{1}{S} \cdot \int_S \frac{A''_{шум}(\Delta y, y_0, z_0)}{F(\Delta y, y_0, z_0)} dS \approx \frac{1}{S} \cdot \int_S \frac{A''_{шум}(\Delta y, y, z)}{F(\Delta y, y, z)} dS \rightarrow 0. \quad (10)$$

Отсюда следует признак совпадения координат рассматриваемой точки с координатами вершины (кромки) трещины:

$$\frac{1}{S} \int_S \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \cdot \int_0^{\infty} \Psi(\Delta y, y_0, z_0) dt \right) \cdot dS = 1 + \frac{1}{S} \cdot \int_S \frac{A''_{шум}(\Delta y, y_0, z_0)}{F(\Delta y, y_0, z_0)} dS \approx 1 \quad (11)$$

в противном случае:

$$\frac{1}{S} \cdot \int_S \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\int_0^{\infty} \Psi(\Delta y, y, z) \cdot dt \right) \cdot dS = \frac{1}{S} \cdot \int_S \frac{A''_{шум}(\Delta y, y, z)}{F(\Delta y, y, z)} dS \approx 0. \quad (12)$$

Применяя последовательно ко всем точкам пространства (В-скана) указанную процедуру и присваивая им соответствующие количественные значения можно определить наличие трещиноподобных дефектов и координаты вершин с большей вероятностью и точностью.

Выводы. Используя указанный механизм для различных параметров контроля (угол ввода, частота, геометрическое расположение преобразователей по отношению

друг к другу), которые влияют на характер структурного шума, а затем усредняя эти результаты можно добиться еще большего снижения влияния структурных шумов.

Отметим некоторые полезные соображения при практическом использовании данной математической модели. В принципе, мы можем воспользоваться количественным аппаратом, полученным в предыдущем изложении. Однако расчётные значения в какой-то степени будут отличаться от реальных значений сигналов дифрагированных волн. Причиной тому могут быть не только погрешности из-за различных приближений при выводе формулы акустического тракта, но и в большей степени из-за отсутствия точных данных конструктивных характеристик преобразователей (геометрические размеры пьезопластины, призмы, используемые материалы и другие характеристики), а также некоторого отличия реальных трещин от идеальной модели. Поэтому на практике значения функции $F(\Delta u, y, Z)$ можно определять и табулировать на модельной трещине. В качестве модельной трещины может быть использована реальная трещина, образованная естественным путем или выполненная искусственно в образце из той же марки металла, что и у объекта контроля.

Рассмотренный механизм, по своей сути, является частной конкретизацией известных идей пространственно-временной фильтрации. На основе полученных зависимостей можно сконструировать конкретные решения пространственно-временной фильтрации для схем с применением большего количества преобразователей и (или) с особенностями их расположения, а также обобщить полученные решения для В-сканов на случай объемного анализа. Применение указанного механизма возможно только в автоматизированных системах с возможностью накопления результатов механического сканирования и последующей программной обработкой. Поэтому более подробное развитие идеи пространственно-временной фильтрации целесообразно лишь во взаимосвязи с конкретной программно-аппаратной реализацией оборудования и технологической задачей.

Список литературы

1. Неразрушающий контроль в Украине: Справочник / Под ред. В.А.Троицкого и Ю.Н.Посыпайко. – Киев: ИЭС им.Е.О.Патона НАН Украины. 2012. – 144 с.
2. Гамалий В.Ф., Серебренников С.В., Трушаков Д.В. Автоматизированная система дефектоскопии ответственных деталей гидронасоса. / Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. № 1. – С.27-32.
3. Технология оценки размеров несплошностей в сварных соединениях с применением дифрагированных волн. Научни Известия на НТСМ, №3, 2007. XXII Национална конференция с международно участие "Дефектоскопия`2007", Созопол, Conference Proceedings, 2007, с.24-31
4. ДСТУ CEN/TS 14751:2008 Зварювання. Використання дифракційно-часового методу (TOFD) для контролю зварних швів.
5. Методы акустического контроля / Н.П.Алешин, В.Е.Белый, А.Х.Вопилкин и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.
6. Выбор оптимальных параметров дифракционно-временного метода ультразвукового контроля для повышения достоверности обнаружения трещиноподобных дефектов металла. Сборник научных докладов «Акустика», вып.10 / Союз по электронике, электротехнике и связи, Национальная секция по акустике, София, декабрь, 2008. - 125 с., С.90-100

С. Давидов, А. Шекеро, М. Міховські, А. Алексієв, Д. Трушаков

Просторово-часовий аналіз дифрагованих сигналів методом TOFD при автоматизованому неруйнівному контролю

В статті описано дослідження і виконаний просторово-часовий аналіз дифрагованих сигналів методом TOFD при проведенні автоматизованого ультразвукового неруйнівного контролю. Отримана математична модель дифрагованого сигналу від несуттєвості. Використовуючи отримані вирази можливо запропонувати конкретні рішення просторово-часової фільтрації для схем з використанням великої кількості перетворювачів враховуючи особливості їх розташування.

E. Davydov, A. Shekero, M. Mihovski, A. Aleksiev, D. Trushakov

Space-time analysis of diffracted signal by TOFD method with automated non-destructive testing

In article are described the researches and carrying-out space-time analysis of diffracted signal by TOFD method with automated ultrasonic non-destructive testing. The mathematical model of diffracted signal from crack-type defect was receiving. Using received expression it is possible propose concrete solution of space-time filtering for scheme with large quantity transformer-assisted and take into account a properties of transformer position.

Одержано 17.09.12