

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ УПРУГИХ ВОЛН НА МОДЕЛИ ТРЕЩИНЫ

© 2021 г. Н.П. Алешин^{1,*}, Н.В. Крысько^{1,**}, Д.М. Козлов^{1,***}, А.Г. Кусый^{1,****}

¹Федеральное государственное автономное учреждение «Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана»,
Россия 105005 Москва, Бауманская 2-я ул., 5, стр. 1

E-mail: *aleshin@bmstu.ru; **kryskonv@bmstu.ru; ***denvwb5@mail.ru, ****andrei.k.166@mail.ru

Поступила в редакцию 31.10.2020; после доработки 13.11.2020;

Принята к публикации 20.11.2020

Для имитации трещин в стыковых сварных швах использованы пазы с малым раскрытием. Проведено исследование влияния ориентации ребер пазов на их выявляемость при использовании эхо- и дифракционных методов ультразвукового контроля. Показано, что процессы, происходящие при рассеянии упругих волн на трещинах, необходимо моделировать трехмерной задачей. Однако теоретические аналитические и численные исследования в данной области чаще всего касаются двумерных задач дифракции упругих волн, когда исследуемое ребро мишени расположено на акустической оси источника и/или приемника ультразвука и ориентировано перпендикулярно падающему лучу. В статье приведены экспериментальные результаты, иллюстрирующие влияние ориентации острия (ребра) мишени в трехмерных задачах на принимаемые сигналы как при использовании дифракционных схем типа TOFD, так и в классическом ультразвуковом контроле эхометодом по схеме «тандем» и с разворотом преобразователей по схеме «дуэт».

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, дифракция, контроль качества, дифракционно-временной метод, TOFD.

DOI: 10.31857/S0130308221010024

ВВЕДЕНИЕ

При выборе схем и параметров контроля, как правило, рассматривается соосное расположение мишени (дефекта) и источника/приемника ультразвука. В эхометоде при этом ориентируются на регистрацию максимума амплитуды зеркально-отраженного сигнала, а в дифракционных методах — на максимум амплитуды дифрагированных сигналов или времени их приема и соотношение между ними. Однако очевидно, что дефект в сварном шве может быть ориентирован не строго вдоль или поперек оси шва. Поэтому следует иметь в виду, что ориентация дефекта заранее не известна, и он может отклоняться от «идеального» направления, заданного при расчете параметров контроля. При анализе акустических трактов важно учитывать влияние возможных отклонений мишени от заданной «идеальной» ориентации. Также следует иметь в виду, что ограниченная длительность импульсов современных дефектоскопов позволяет повысить разрешающую способность ультразвукового контроля. Однако при использовании коротких импульсов различные области одного и того же дефекта, например, его центральная часть и ребра, могут создавать несколько сигналов, разрешающихся во времени. В результате один дефект может быть зафиксирован как скопление или цепочка дефектов, либо может быть допущена ошибка при измерении размеров дефектов. В связи с изложенным, вопрос о влиянии ориентации плоскостного дефекта на параметры принимаемых сигналов не менее важен, чем вопрос о влиянии на принимаемые сигналы формы и размера дефекта.

В известных теоретических и экспериментальных работах по изучению рассеяния продольных и поперечных волн различной поляризации на моделях дефектов, имитирующих трещины, чаще всего рассматриваются случаи соосного расположения преобразователей и мишени. С учетом возможных отклонений последней от расчетного положения представляет интерес более подробно исследовать случаи наклонного падения ультразвука на ребра плоскостных дефектов, когда угол между направлением падающего луча и ребром не равен 90°. При этом возникают трехмерные задачи дифракции упругих волн, теоретическое исследование которых выполнить часто значительно сложнее, чем для двумерных задач. В настоящей статье рассмотрены некоторые экспериментальные результаты, полученные при исследовании трехмерных задач рассеяния продольных и поперечных волн на ребрах плоскостных моделей дефектов при наклонном падении волн.

ВЫЯВЛЕНИЕ ОСТРИЯ ПЛОСКОСТНОГО ДЕФЕКТА

В качестве примера рассмотрим выявление острия узкого паза при изменении его ориентации относительно источника И, а также приемника П ультразвуковых волн. Схема выполнения эксперимента представлена на рис. 1.

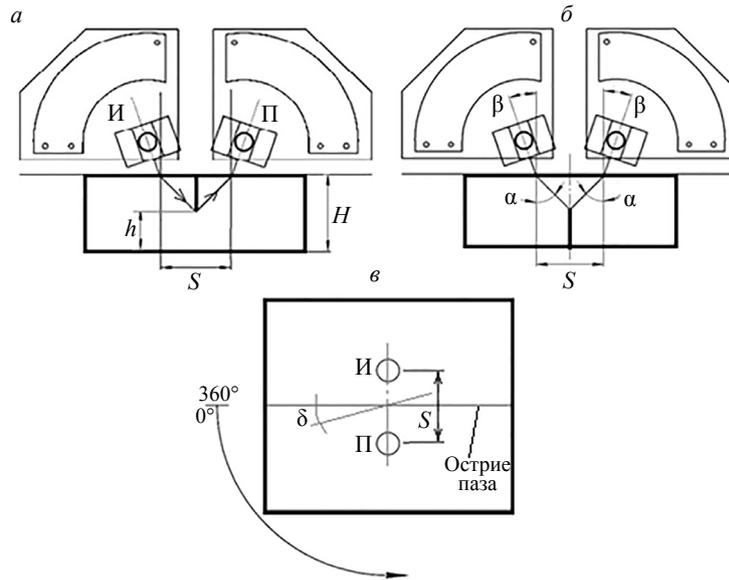


Рис. 1. Схема измерения амплитуд сигналов, рассеянных острием паза: рассеяние на нижнем (а) и верхнем (б) острие; схема вращения образца с пазом (в).

В данном случае в качестве модели плоскостного отражателя использован паз раскрытием $2a = 0,12—0,14$ мм. Образец — сталь со скоростью поперечной и продольной волн, соответственно $c_L = 3,26 \cdot 10^3$ м/с и $c_T = 5,85 \cdot 10^3$ м/с. Торце паза имел форму полуцилиндра диаметром D , равным $0,12—0,14$ мм (рис. 2).

При измерениях на частоте 5 МГц это соответствует волновому размеру острия для поперечной волны $k_T a \cong 0,7$ и для продольной волны $k_L a \cong 0,4$. Здесь k_T и k_L — волновые числа этих волн соответственно. Приведем также параметры образца: толщина $H = 31,8$ мм, глубина острия паза $h = 15$ мм. Таким образом при выявлении нижнего острия паза оно находилось на расстоянии 15 мм от контактной поверхности образца (см. рис. 1а), а при выявлении верхнего острия — на расстоянии 16,8 мм от контактной поверхности (рис. 1б). При указанных условиях верхнее и нижнее острие паза можно рассматривать как имитаторы острия вертикально ориентированных плоскостных дефектов, расположенных на различных глубинах. Также отметим, что в качестве источника и приемника ультразвука использовались пьезопластины диаметром 3 мм, так что на частоте 5 МГц острие паза находилось в дальней зоне как для поперечной, так и для продольной волн, причем можно считать, что на озвучиваемый участок острия падала плоская волна. Акустический контакт осуществлялся в иммерсионном варианте через слой воды, так что вращение источника И с приемником П позволяло устанавливать такие углы падения β звука на поверхность образца, чтобы в него вводилась продольная или поперечная волна под необходимым углом α . При измерениях амплитуды сигналов, рассеянных острием, пара преобразователей И — П фиксировалась, а образец вращался вокруг вертикальной оси. Угол δ изменялся в диапазоне от 0 до 360° (см. рис. 1в). При этом значение $\delta = 0$ и 180° соответствует случаю, когда источник и приемник ориентированы как на рис. 1, так что плоскость, образованная падающим и рассеянным лучами, перпендикулярна острию паза. Соответственно, при $\delta = 90$ и 270° паз озвучивается вдоль его поверхности. При такой схеме проведения измерений поворот образца на 360° можно рассматривать как состоящий из 4 участков: $0—90^\circ$, $180—90^\circ$, $90—270^\circ$, $360—270^\circ$, в каждом из которых условия рассеяния ультразвука на ребре аналогичны. При этом можно выполнять усреднение результатов по таким 4-м участкам и рассматривать рассеяние ультразвука в диапазоне углов поворота образца от 0° (падение луча перпендикулярно ребру) до -90° (падение луча на ребро вдоль поверхности паза).

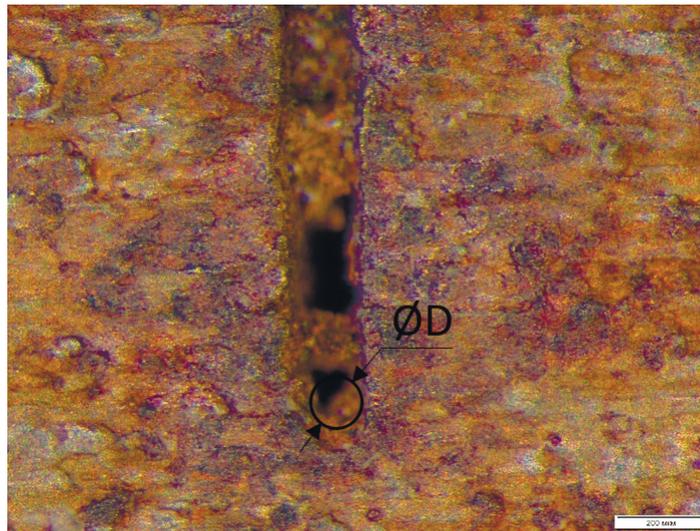


Рис. 2. Макрошлиф торца паза.

Известны результаты некоторых расчетов и экспериментов, выполнявшихся ранее по аналогичной схеме. Например, в работе [1] рассмотрено рассеяния на нижнем ребре паза и указано, что при углах ввода продольной волны 10 , 30 и 60° амплитуда сигнала, дифрагированного на этом ребре, изменяется в пределах 1 дБ при изменении угла разворота δ в пределах от 0 до 30° , а затем падает до нуля при $\delta = 90^\circ$. Относительно верхнего ребра лишь указано, что при $\delta = 90^\circ$ рассеянный на нем сигнал остается конечным (слабым) по амплитуде. Однако соответствующие экспериментальные данные и значения амплитуд не приведены.

Приведенные результаты качественно соответствуют расчетам для продольной волны, выполненных с использованием геометрической теории дифракции ультразвука в упругой среде согласно [2]. Однако в некоторых точках результаты экспериментов и расчетов отличаются друг от друга до $1,5$ раз. Также следует отметить, что в данной работе эксперимент проводился на пазе раскрытием $0,4$ мм глубиной $48,5$ мм, но частота и волновой размер раскрытия не указаны, т.е. не выполнена оценка того, насколько торец использованного паза можно рассматривать как острие трещины. Поэтому, основываясь только на приведенных данных, трудно оценить возможность их использования при выявлении трещин в изделиях меньших толщин, характерных, например, для контроля сварных швов трубопроводов.

Отметим, что результаты рассмотренной работы приведены только для продольной волны, и настоящее время они применяются в технологии TOFD [3]. Однако, учитывая указанные особенности описанных экспериментальных результатов, представляется целесообразным проверить их на образцах с пазами меньшего раскрытия. Поэтому, описанный выше экспериментальный образец выбран с раскрытием $0,12$ — $0,14$ мм — минимальным, которое удалось выполнить с обеспечением цилиндрической поверхности его торца.

Описанный образец ранее использовался в работе [4] для анализа рассеяния продольной волны на нижнем острей паза для случая $\delta = 0^\circ$, т.е. когда плоскость падения продольной волны перпендикулярна торцу паза. Измерения проведены на частоте 5 МГц. Показано, что если радиус паза меньше длины волны, то с уменьшением этого радиуса амплитуда дифрагированного сигнала, огибающего полуцилиндрический торец, убывает по логарифмическому закону, а при значениях радиуса паза, превышающих длину волны, амплитуда дифрагированного сигнала убывает с ростом радиуса линейно. Такое изменение амплитуды можно рассматривать как косвенное подтверждение того, что торец паза с размерами $k_L a \approx 0,4$, $k_T a \approx 0,7$ действительно можно рассматривать как имитатор острей трещины.

Отметим теперь, что приведенные примеры публикаций относятся к рассеянию на острие плоскостного дефекта продольной волны. Однако в эхометод ультразвукового контроля гораздо чаще применяются поперечные волны. В работе [5] представлены расчетные и экспериментальные зависимости амплитуды дифрагированного сигнала от угла наклона трещины для поперечных и продольных волн, но влияние угла поворота δ на амплитуду дифрагированного сигнала для поперечной волны изучено не было. Рассмотрим этот случай подробнее.

Как известно, в отличие от рассеяния продольной волны, для поперечной необходимо учитывать ее поляризацию. На рис. 1 плоскость поляризации поперечной волны, вводимой в образец (и принимаемой из образца), совпадает с плоскостью схем в верхней части рисунка. При $\delta = 0^\circ$ такая поперечная волна вертикально (SV) поляризована относительно боковой поверхности паза. Поэтому целесообразно рассмотреть такие углы ввода поперечной волны в металл, когда угол падения на боковую поверхность паза меньше, равен и больше третьего критического $\alpha_{кр3}$. В первом случае вдоль поверхности паза возбуждается продольная волна по типу боковой, а в третьем — только поперечная и, возможно, релеевская [6—8]. В нашем образце $\alpha_{кр3} \cong 33^\circ$. Поэтому, далее рассмотрим ввод поперечной волны в образец под углами 65° , 57° и 45° , так что падение такой поперечной волны на вертикальную грань паза при $\delta = 0^\circ$ происходит под углами 25° , 33° и 45° . Выбор именно этих углов будет дополнительно обоснован ниже. Для удобства сравнения результатов эти же углы были выбраны и для ввода продольной волны.

Перейдем теперь к описанию полученных результатов. Вначале в качестве примера рассмотрим рассеяние продольной волны: в этом случае — сигналы, дифрагированные на нижнем ребре (см. рис. 1а) и на верхнем ребре (см. рис. 1б).

Отметим, что в условиях данного эксперимента при выполнении сканирования практически невозможно точно установить взаимную ориентацию источника и приемника так, чтобы их диаграммы направленности пересекались строго над ребром паза. Также диаграммы направленности Источника и Приемника могут несколько отличаться. Поэтому при вращении образца возможны небольшие, в пределах одного-полутора миллиметров, смещения оси вращения образца относительно оси системы И—П. При этом необходимо отметить, что такие смещения на 1—1,5 мм — естественные смещения оси сварного шва или плоскостных дефектов в объеме сварного шва при контроле реальных сварных соединений, т.е. с аналогичными случайными изменениями амплитуд принимаемых сигналов оператор постоянно встречается при практическом контроле. Поэтому вопрос об усреднении результатов измерений отмечен выше. Однако, даже с учетом усреднения по четырем аналогичным участкам при вращении образца на 360° , погрешность каждого конкретного измерения амплитуды следует ожидать в пределах до 2 дБ относительно некоторого идеально соосного расположения элементов экспериментальной установки. Это проявляется в том, что полученные в эксперименте точки не ложатся строго на гладкую кривую.

Результаты измерений при углах ввода продольной волны $\alpha = 45^\circ$, 57° и 65° , с учетом усреднения по 20 точкам для каждого угла ввода, показан на рис. 3.

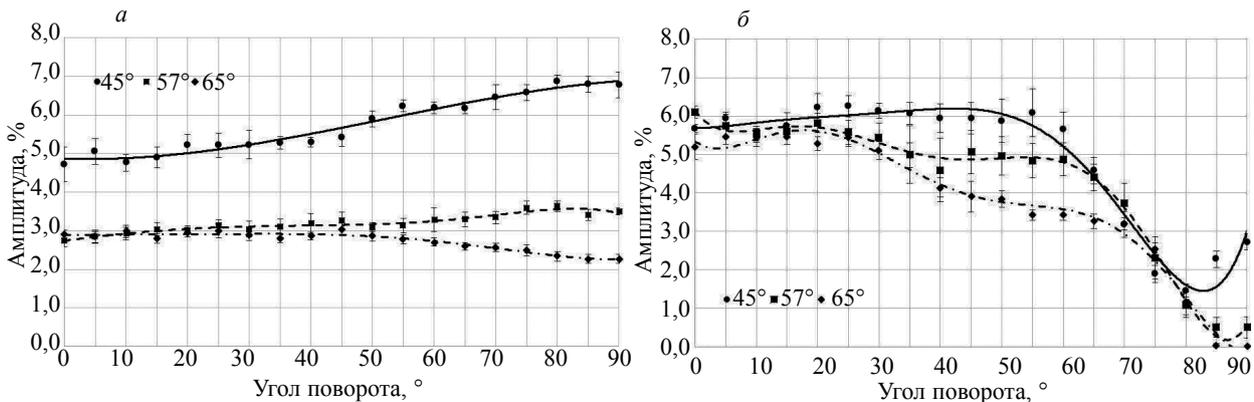


Рис. 3. Рассеяние продольной волны на верхнем (а) и нижнем (б) ребрах паза.

Эти результаты в целом аналогичны приведенным в [1], но дополняют их. С одной стороны, рис. 3 детализирует ранее опубликованные результаты для углов, которые в той работе не рассмотрены. С другой стороны, диапазон углов δ , при которых не наблюдается сколь угодно заметное (за пределами погрешности) изменение амплитуд принимаемых сигналов, составляет не менее 45° против 30° в [1]. Также результаты [1] дополнены данными по рассеянию на нижнем ребре, причем некоторый рост амплитуды сигнала, рассеянного на нижнем ребре паза в районе углов поворота $\delta = 90^\circ$ можно отнести, по-видимому, к влиянию протяженной боковой поверхности паза, вдоль которой в этих случаях волна распространяется перед попаданием на ребро.



Рис. 4. Характерные А-сканы для рассеяния продольной волны на верхнем (а) и нижнем (б) ребрах паза: а — головная волна 16,22 мкс (1), $L-L$ 18,84 мкс (2); б — $L-L$ 18,36 мкс (2).

Рассмотренные сигналы приходят на приемник первыми (от паза), и их идентификация не составляет труда. Соответствующие характерные А-сканы (осциллограммы) сигналов приведены на рис. 4. При озвучивании верхнего острия (рис. 4а) первой приходит головная волна, затем регистрируется дифрагированный сигнал продольной волны $L-L$ от острия. При озвучивании нижнего острия (рис. 4б) регистрируется только дифрагированный сигнал продольной волны $L-L$ от острия.

Рассмотрим теперь результаты аналогичных измерений амплитуд сигналов, возбуждаемых поперечной волной при рассеянии на нижнем и верхнем ребре паза. В этом случае следует более тщательно подходить к селектированию сигналов, особенно — к сигналам от верхнего ребра паза, поскольку они могут экранироваться другими импульсами, например, сигналами, создаваемыми релеевской волной, скользящей по поверхности образца. Характерные А-сканы для данного случая приведены на рис. 5. При озвучивании верхнего острия (рис. 5а) первой приходит головная волна, после нее регистрируется релеевская волна, затем приходит дифрагированный сигнал поперечной волны $T-T$ от острия. При озвучивании нижнего острия (рис. 5б) регистрируется только дифрагированный сигнал поперечной волны $T-T$ от острия.

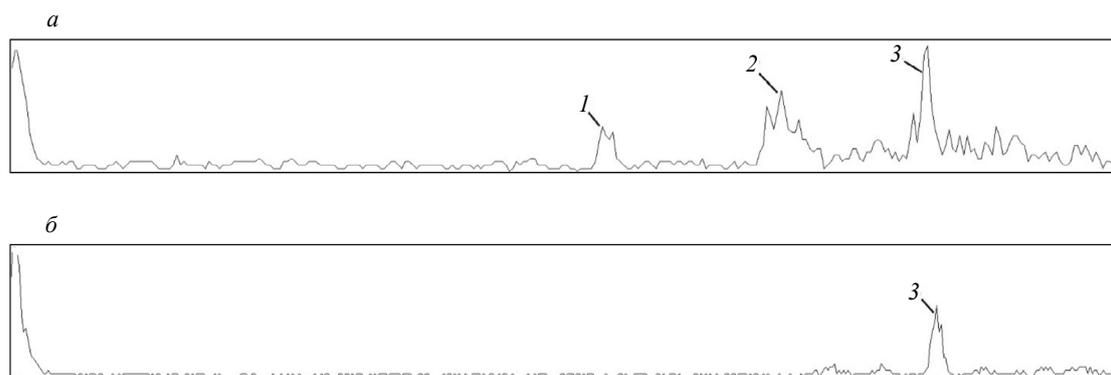


Рис. 5. Характерные А-сканы для рассеяния поперечной волны на верхнем (а) и нижнем (б) ребрах паза: а — головная волна 16,8 мкс (1), релеевская волна 21,5 мкс (2), $T-T$ 24,9 мкс (3); б — $T-T$ 25,04 мкс (3).

Амплитуды принятых сигналов в зависимости от ориентации острия паза приведены на рис. 6. Как и для продольной волны, при рассеянии на нижнем ребре наблюдается общее снижение амплитуды при увеличении угла δ (рис. 6а) и некоторое увеличение амплитуды при рассеянии на верхнем ребре (рис. 6б).

Однако теперь имеются особенности, связанные с тем, что при увеличении угла δ от 0 до 90° плоскость поляризации вводимой в металл волны наклоняется относительно боковой поверхности паза, т.е. в ней появляется компонента, горизонтально поляризованная (SH) относительно этой поверхности. При некоторых ориентациях источника и приемника относительно ребра паза наблюдается немонотонное изменение амплитуды сигнала, дифрагированного на нижнем ребре. Рассмотрим этот вопрос подробнее в следующем разделе.

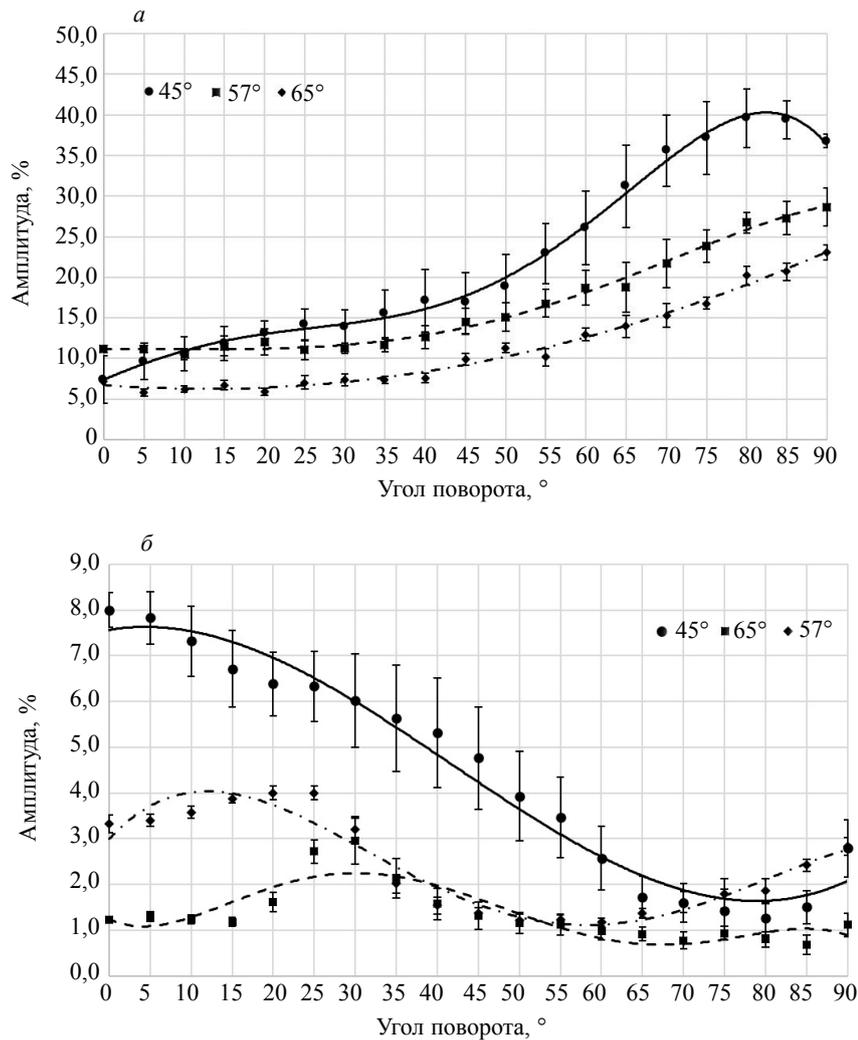


Рис. 6. Рассеяние поперечной волны на верхнем (а) и нижнем (б) ребрах паза.

ТРЕХМЕРНЫЕ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ УПРУГИХ ВОЛН НА ПЛОСКОСТНЫХ ДЕФЕКТАХ

Рассмотрим представленную на рис. 7 общую схему ультразвукового контроля сварного стыкового шва с использованием различных методов прозвучивания.

Если источник И и приемник П совмещены в положении ИП1, то реализуется контроль совмещенным наклонным преобразователем эхометодом. В отдельной схеме И-П2 контроль ведется двумя наклонными преобразователями эхометодом по схеме «дуэт» (при $\Delta \neq 0$) или «тандем» (при $\Delta = 0$), а в варианте И-П3 — двумя наклонными преобразователями эхометодом или дифракционно-временным методом TOFD. Пусть используются пьезопреобразователи, излучающие в металл (и принимающие из металла) поперечные волны с углом ввода α . Плоскости поляризации преобразователей И (ИП1) и П3 обозначены АОЕ, а плоскость поляризации приемника П2 — ОВС. Если, например, плоскостной дефект (трещина) ориентирован вдоль оси сварного шва, то в схеме «дуэт» плоскость падения на этот дефект, обозначенная АОВ, очевидно, не совпадает с плоскостями поляризации источника И, а также приемника П2. Если при этом ребро трещины ориентировано вдоль отрезка О-О3, то падающая от источника И волна попадает на это ребро под углом, отличным от 90° , т.е. возникает трехмерная задача рассеяния такой волны. Именно к такому общему случаю относится наблюдение дифрагированных сигналов, рассмотренных выше. Если ребро паза (продольной трещины) ориентировано вдоль оси шва, то рассеяние в плоскости АОЕ соответствует схеме проведения эксперимента на рис. 1. Если же ребро паза ориентировано перпендикулярно оси шва (поперечная трещина), то схеме эксперимента на рис. 1 соответствует рассеяние в плоскости АОВ.

было рассматривать как имитатор верхнего и нижнего ребра трещины в сварном шве. Исследование проведено при вращении паза относительно источника и приемника на 360° , так что такой паз в зависимости от его ориентации можно рассматривать как модель продольной или поперечной протяженной трещины в сварном шве.

Для случая рассеяния продольной волны приведенные результаты расширяют ранее опубликованные данные для более широкого диапазона углов ввода. При этом показано, что для паза, имитирующего продольную трещину сварного шва, при использовании схемы TOFD изменение ориентации его ребер относительно излучателя и приемника ультразвука в диапазоне до $\pm 45^\circ$, практически не сказывается на соотношении амплитуд сигналов, дифрагированных на верхнем и нижнем ребрах паза.

Для случая рассеяния поперечной волны показано, что при углах ввода ультразвука, превышающих 57° , при отклонениях ориентации ребра паза от перпендикуляра к плоскости падения поперечной волны на вертикальную поверхность паза, следует ожидать рост (до 1,5 раз) амплитуды сигнала, дифрагированного на нижнем ребре паза. Это связано с перераспределением SV и SH (относительно вертикальной поверхности паза) компонент в поперечной волне, падающей на ребро паза.

Авторский коллектив выражает благодарность к.т.н. Л.Ю. Могильнеру за содействие при постановке экспериментов.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-0148-20-00 от 20.12.2019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Charlesworth J.P., Temple J.A.G. Engineering Application of Ultrasonic Time-Of-Flight Diffraction. Research Studies Press, Baldock, Hertfordshire, England. 2001. 255 p.
2. Achenbach J.D., Gantesen A.K., McMacken H., Norris A.N. Ray Methods for Waves in Elastic Solids. Pitman, London, 1982.
3. Ginzal Ed. Ultrasonic Time of Flight Diffraction. Waterloo, Ontario, Canada: Eclipse Scientific, 2013. 249 p.
4. Алешин Н.П., Григорьев М.В., Крысько Н.В. Влияние конфигурации вершины источника дифракции на амплитуду дифрагированного сигнала // Сварка и диагностика. 2019. № 6. С. 17—19.
5. Григорьев М.В., Гурвич А.К., Гребенников В.В., Семерханов С.В. Ультразвуковой способ определения размеров трещин // Дефектоскопия. 1979. № 6. С. 50—56.
6. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 412 с.
7. Алешин Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений. М.: Машиностроение, 2013. 574 с.
8. Bazulin E.G., Kononov D.A., Sadykov M.S. Finite-Difference Time Domain Method. Calculating Echo Signals in Homogeneous Isotropic Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 7. P. 469—478. [Базулин Е.Г., Коновалов Д.А., Садыков М.С. Метод конечных разностей во временной области. Расчет эхосигналов в однородных изотропных материалах // Дефектоскопия. 2018. № 7. С. 9—18.]
9. Алешин Н.П., Баранов В.Ю., Могильнер Л.Ю., Яровой А.А. Повышение выявляемости объемных дефектов // Дефектоскопия. 1985. № 7. С. 24—30.
10. Алешин Н.П., Лежава А.Г., Могильнер Л.Ю. Изучение дифракции упругой волны на канальных дефектах и рекомендации по повышению их выявляемости // Дефектоскопия. 1986. № 11. С. 3—10.