

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УПРУГИХ ВОЛН С «ПОЛУПРОЗРАЧНЫМИ» ДЕФЕКТАМИ

© 2020 г. Н.П. Алешин^{1,*}, Л.Ю. Могильнер^{2,**}, Н.В. Крысько^{1,***}

¹Федеральное государственное автономное учреждение «Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана», Россия 107005 Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

²Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта (ООО «НИИ Транснефть»), Россия 117186 Москва, Севастопольский проспект, 47а
E-mail: *aleshin@bmstu.ru; **mogilnerLY@niitnn.transneft.ru; ***kryskonv@gmail.com

Поступила в редакцию 08.04.2020; после доработки 10.04.2020

Принята к публикации 06.05.2020

Рассмотрены вопросы выявления несплошностей, частично пропускающих через себя ультразвуковые волны. Такие дефекты имеют большое распространение в различных изделиях и сварных соединениях из металлов и пластмасс. Некоторые примеры «полупрозрачных» дефектов: несплавления, «матовые пятна», шлаковые и другие инородные включения в сварных соединениях, флокены и окисные пленки в поковках и прокате и т.д. Более того, даже хорошо изученные трещины также могут частично пропускать через себя ультразвуковые волны. Однако для расчетов и настройки параметров ультразвукового контроля традиционно используются полые модельные отражатели, которые не пропускают ультразвук сквозь себя: различные сверления, пазы и т.д. В статье указано, что для целей дефектотомии, то есть для измерения размеров дефектов, необходимо правильно калибровать и настраивать комплект дефектоскоп—преобразователь с учетом особенностей выявления дефектов разного типа, в том числе «полупрозрачных» для ультразвуковых волн. Для разработки моделей искусственных отражателей, имитирующих полупрозрачные для ультразвука дефекты, предложено классифицировать такие полупрозрачные дефекты по трем группам: дефекты с заполнением, прерывистые структуры и засоренность сварного шва. Рассмотрены основные особенности дефектов таких типов. Описаны возможные подходы к расчету акустических трактов ультразвуковых дефектоскопов при выявлении дефектов трех указанных типов. Отмечено, что для расчетов применительно к дефектам с заполнением могут использоваться аналитические и численные методы, для прерывистых структур предпочтительны численные методы, для дефектов типа засоренность — аналитические методы.

Ключевые слова: упругие волны, раскрытие несплошности, модель дефекта, ультразвуковой контроль, полупрозрачные дефекты, импедансные границы, прерывистые дефекты, мелкодисперсные включения.

DOI: 10.31857/S0130308220060019

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что для разработки технологии неразрушающего контроля, в том числе для целей ультразвуковой дефектоскопии, используются различные модельные дефекты: отверстия с плоским дном, боковые и вертикальные цилиндрические сверления, «зарубки», сегментные отражатели и т.д. [1, 2]. Но отметим важную особенность, общую всех этих «традиционных» моделей: они представляют собой локализованные в заданной зоне изделия полости, поверхности которых при расчетах рассеяния ультразвуковых волн можно рассматривать как абсолютно мягкую границу материала контролируемого изделия. В некоторых случаях при моделировании также используются абсолютно жесткие границы, имитирующие поверхности различных включений. Но в любом случае, как правило, граничные поверхности включений или полостей предполагаются непрерывными.

С другой стороны, также хорошо известно, что граница «материал изделия/материал дефекта» (далее — граница МИ/Д) может быть импедансной или прерывистой, то есть граница МИ/Д частично пропускает через себя ультразвуковые (УЗ) волны [2—6]. Более того, часто именно такие границы и имеют место на практике для реальных несплошностей. Однако вопрос о моделировании границ МИ/Д, способных частично пропускать УЗ волну, в настоящее время недостаточно изучен. Это усложняет настройку оборудования и, как следствие, снижает точность измерения размеров реальных дефектов.

ДЕФЕКТЫ МЕТАЛЛА И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ЧАСТИЧНО ПРОПУСКАЮЩИЕ УЛЬТРАЗВУК

Такие дефекты чаще всего образуются при контактной, диффузионной, сварке трением с перемешиванием, ротационной сварке, пайке и в клеевых соединениях. Общей их особенно-

стью является малое раскрытие — микроны и меньше [7—10]. При этом противоположные берега дефектов контактируют через тонкие окисные пленки, например, в стыках стальных труб, выполненных контактной сваркой. Частично пропускают через себя ультразвуковые волны и несплавления в сварных швах полиэтиленовых труб и в швах стальных труб при дуговой сварке, а также участки вблизи острия трещин с раскрытием 10—100 мкм в металле или сварных соединениях. В этих случаях противоположные берега дефектов могут иметь механический контакт между собой, но химические связи между веществом на противоположных берегах не образуются.

Наиболее важно, что в любом из перечисленных примеров «стянутые» несплошности с малым раскрытием полупрозрачны для ультразвуковых волн мегагерцового диапазона. Они могут рассеивать волны как по законам геометрической акустики, так и создавать волны, дифрагированные на ребрах дефектов, как это схематично показано на рис. 1.

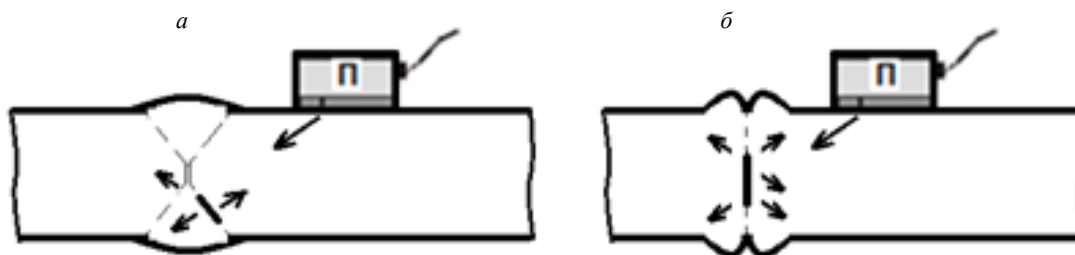


Рис. 1. Примеры расположения полупрозрачных дефектов вдоль поверхности сплавления (П — пьезопреобразователь). Утолщениями на линиях сплавления показаны: несплавление по кромке при дуговой сварке (а); матовое пятно или несплавление («зеркальность») при контактной сварке (б).

Помимо указанных выше несплавлений в стыках полиэтиленовых труб могут образоваться включения с плотностью, превышающей плотность материала свариваемых труб (песок или фрагменты грунта с размером включений до 1 мм). Такие мелкодисперсные включения обычно равномерно распределены по сечению сварного шва — по всему шву или по его части. Отдельные частички включений формируют единый дефект, который можно было бы назвать «засоренностью» сварного шва (участка сварного шва). Ситуация иллюстрируется на рентгеновских снимках, приведенных на рис. 2. На левой экспозиции 17-2 приведен пример изображения бездефектного шва. При этом четко видны наружный 1 и внутренний 2 грат. А справа — два примера изображения сварных швов, засоренных песком: на экспозиции 44-3 засорен участок между отметками 3 и 4 — примерно 30 % периметра шва, а на экспозиции 42-2 весь шов на 100 % периметра засорен песком.

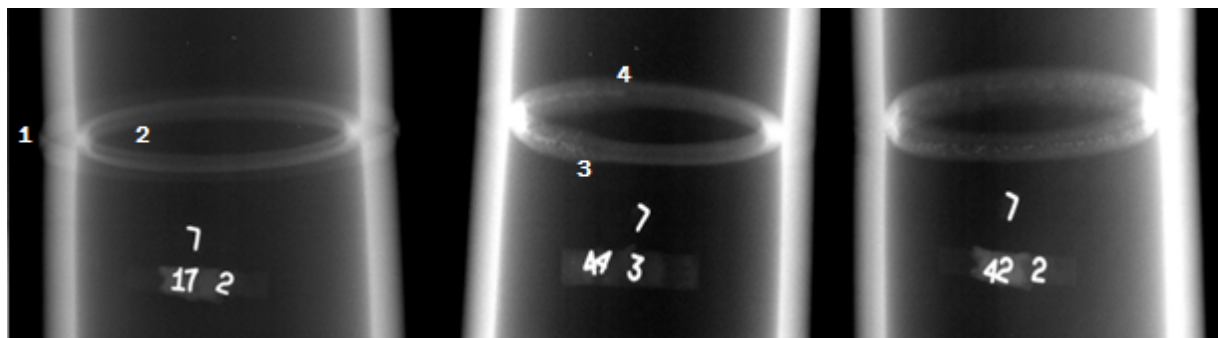


Рис. 2. Контактные стыки полиэтиленовых труб $\varnothing 110 \times 10$ мм (стык 17 без дефектов и стыки 44 и 42, засоренные песком): экспозиция 17-2 — качественное соединение, четко видны наружный 1 и внутренний 2 грат; экспозиция 44-3 — 30 % периметра шва между отметками 3 и 4 засорено мелкодисперсными включениями; экспозиция 42-2 — 100 % периметра шва засорено мелкодисперсными включениями.

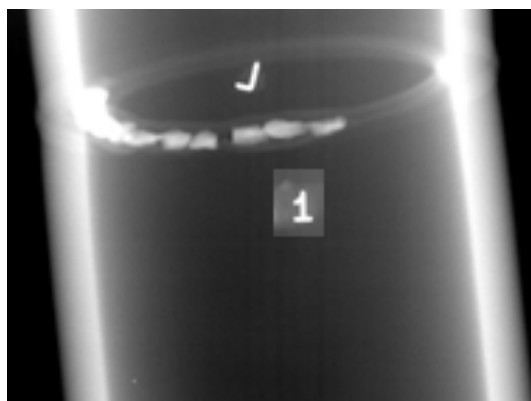


Рис. 3. Рентгеновский снимок сварного стыкового шва полиэтиленовых труб $\varnothing 110 \times 10$ мм с цепочкой крупных твердых включений.

Распределяться такие дефекты могут по всему сечению сварного соединения или по его части в пределах зоны между гратом на наружной и внутренней поверхностями трубы. Они имеют прерывистую дисперсную структуру, и условия рассеяния ультразвуковых волн существенно отличаются от условий рассеяния на дефектах с непрерывной поверхностью.

Другая группа дефектов, которые можно отнести к полупрозрачным для ультразвука, выглядит как цепочка более крупных, размером до 2—3 мм и более, инородных включений в материале сварных швов (рис. 3 и рис. 4). Вдоль оси сварного шва такие дефекты могут располагаться с определенным периодом (эквидистантно) или случайным образом (неэквидистантно). Условия отражения УЗ волн от таких цепочек зависят от периодичности расположения дефектов или ее отсутствия внутри шва. Если размер каждого отдельного включения и расстояния между ними соизмеримы с длиной волны ультразвука λ , то, как и в предыдущем случае, отдельные включения в составе таких цепочек обычно плохо разрешаются друг от друга на дефектограммах и воспринимаются как протяженный дефект с переменной условной высотой (см. рис. 4).

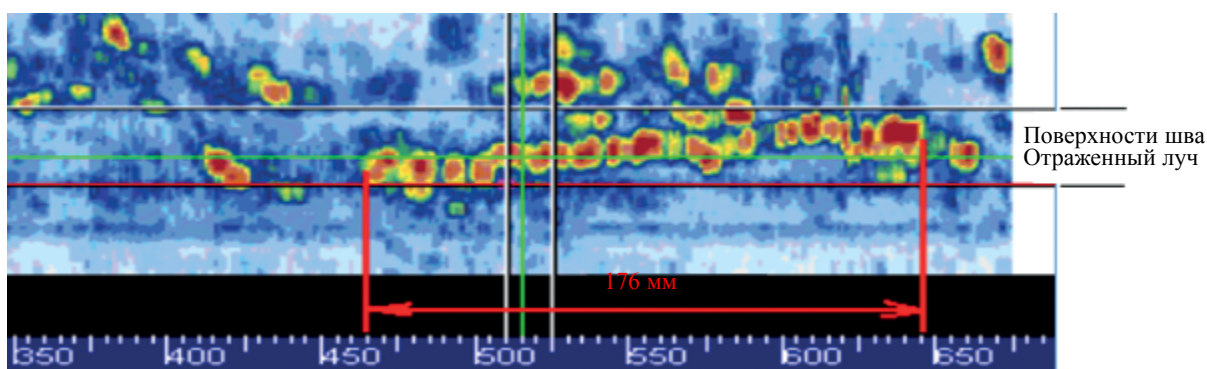


Рис. 4. Дефектограмма сварного стыка стальных листов толщиной 16 мм с X-образной разделкой кромок. В-скан с изображением цепочки шлаковых включений получен УЗ фазированной решеткой на отраженном луче.

Наконец, полупрозрачные дефекты могут формироваться на фоне некоторых периодических конструктивных элементов сварного соединения. В качестве примера можно привести сварные соединения полиэтиленовых труб, выполненные с помощью закладных нагревателей (электромуфт). На схеме в центре рис. 5 линейка черных точек иллюстрирует расположение нагревательного элемента, который представляет собой намотанный в теле муфты провод толщиной ориентировочно 1,5 мм, с расстоянием между витками ориентировочно 4—5 мм.

На рис. 5 слева от линии соприкосновения труб — качественное соединение, а справа от этой линии — соединение с несплавлением (или непроваром) из-за превышения зазора между поверх-

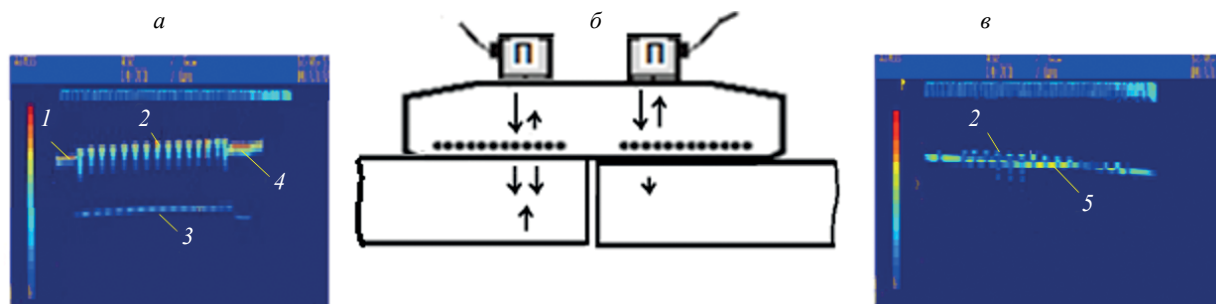


Рис. 5. Изображение В-сканов сечения сварного муфтового соединения полиэтиленовых труб согласно [12]:

a — качественного; *в* — с несплавлением; *б* — схема соединения: 1 — центральная холодная зона, 2 — нагревательные провода, 3 — донный сигнал от внутренней поверхности стенки трубы, 4 — концевая холодная зона, 5 — несплавление на границе муфта—труба.

ностями трубы и муфты. Соответствующие В-сканы¹, полученные с использованием фазированной решетки, представлены на рис. 5*a* и *б* согласно [11, 12].

Слева от линии соприкосновения труб УЗ волны рассеиваются на периодической структуре из проводов 2. Затем, практически не ослабевая на линии качественного сплавления, проходят в материал трубы и создают отражение 3 от поверхности ее противоположной стенки. На участках 1 и 4 нет разогрева и сплавления. Соответственно, через эти зоны ультразвук не проходит. При этом длина волны ультразвука соизмерима с характерным размером рассеивающей решетки.

Для сравнения: справа от линии соприкосновения труб на участке с некачественной сваркой после дифракции на периодической решетке из проводов 2 волны отражаются от материала дефекта (несплавления или непровода) 5, после чего интерферируют с рассеянными на решетке волнами. В материал трубы УЗ-волны при этом практически не проходят, и донный сигнал от внутренней поверхности стенки трубы не возникает.

Для конструкций описанного типа из-за перекоса при сборке труб под сварку или неравномерного их нагрева помимо образования несплавления также может деформироваться и решетка из проводов. В этом случае на В-скане могут возникнуть более сложные и разнообразные интерференционные картины, в том числе могут регистрироваться слабые или нечеткие сигналы от внутренней поверхности стенки трубы в случае, если УЗ-волны частично проходят через несплавление.

КЛАССИФИКАЦИЯ «ПОЛУПРОЗРАЧНЫХ» ДЕФЕКТОВ

Описанные выше дефекты, частично пропускающие сквозь себя ультразвуковые волны, можно группировать следующим образом.

Группа 1. Одиночные дефекты, имеющие сплошную неразрывную поверхность и заполненные материалом, пропускающим ультразвук. При этом акустический импеданс материала в объеме дефекта имеет ненулевое конечное значение, которое отличается от значения акустического импеданса материала, окружающего дефект.

Группа 2. Цепочки дефектов или конструктивных элементов контролируемого изделия, характерные размеры которых и расстояния между которыми соизмеримы с длиной ультразвуковых волн, используемых для их выявления. При падении ультразвуковой волны на такие дефекты может возникать один сплошной протяженный отклик, или группа близко расположенных откликов, не разрешающихся во времени и/или в пространстве. Но при этом зависимости амплитуды и других параметров отклика от габаритных размеров дефектов отличаются от аналогичных для дефектов со сплошной поверхностью, имеющих такие же габариты [7, 13].

Группа 3. Мелкодисперсные инородные включения, более или менее равномерно распределенные в объеме зоны сплавления в сварном шве или в каком-либо его участке. Характерные размеры каждого включения и расстояния между ними в несколько раз меньше используемой длины волны ультразвука, а габаритные размеры всей группы включений — много больше длины волны.

¹В-сканом в ультразвуковом контроле принято называть изображение осевого сечения сварного шва, например, стыкового, полученное с применением технологии фазированных решеток или аналогичной.

Условно перечисленные 3 группы полупрозрачных дефектов можно было бы назвать соответственно: дефекты с заполнением, прерывистые структуры и засоренность сварного шва.

Предложенная классификация, очевидно, не единственно возможная. Легко представить себе также и различные комбинации полупрозрачных дефектов указанных групп. Например, цепочку близко расположенных шлаковых включений можно рассматривать как комбинацию первой и второй групп дефектов, когда каждая отдельная несплошность из прерывистого дефекта заполнена материалом с конечным ненулевым импедансом, но вся цепочка рассеивает УЗ-волны как один прерывистый дефект. Или песок на линии сплавления при сварке полиэтиленовых трубопроводов электромуфтами можно рассматривать как комбинацию дефектов второй и третьей групп, когда мелкодисперсные инородные включения заполняют объем сварного соединения, образованного с применением периодических конструктивных элементов.

Но преимущество предложенной классификации заключается в том, что она позволяет при выявлении и измерении параметров полупрозрачных дефектов системно подойти к вопросу о выборе модельных отражателей для изучения параметров и, далее, настройки ультразвукового комплекса дефектоскоп—преобразователь.

Перейдем к рассмотрению этого вопроса.

МОДЕЛИ ДЕФЕКТОВ И ВОЗМОЖНОСТИ РАСЧЕТА АКУСТИЧЕСКИХ ТРАКТОВ

Рассмотрим последовательно три описанные группы полупрозрачных дефектов. При этом будем исходить из того, что размеры дефектов имеют порядок от длины волны и больше².

1. Дефекты с заполнением

Поскольку дефекты этой группы локализованы в пространстве в виде компактных несплошностей с непрерывной границей, их можно моделировать традиционными дисками, полосами, боковыми и вертикальными цилиндрическими сверлениями. В этом смысле их можно считать аналогичными тем, которыми обычно оперирует теория ультразвуковой дефектоскопии. Только границы таких дефектов в данном случае необходимо считать не абсолютно мягкими (полость) или абсолютно жесткими (твердые включения), а импедансными.

Например, в [6] дана оценка акустического импеданса материала в шлаковом включении $Z_{\text{в}} = 3 \cdot 10^6$ кг/м²с при скорости ультразвуковой (продольной) волны $CL_{\text{в}} = 1,2 \cdot 10^3$ м/с. При этом отмечено, что эти величины могут меняться в достаточно широких пределах в зависимости от химического состава и толщины включения. Также они могут зависеть от его структуры — спрессованный порошок или сплошной материал.

Пусть дефект имеет толщину, превышающую половину длины волны. Например, на частоте $f = 2,5$ МГц, для этого достаточно, чтобы шлаковое включение имело толщину 1,2 мм и более (то есть более половины длины продольной волны в материале дефекта). Учитывая, что акустический импеданс стали близок к $Z_{\text{ст}} = 44 \cdot 10^6$ кг/м²с при скорости продольной волны $CL_{\text{ст}} = 5,85 \cdot 10^3$ м/с, по известной формуле для коэффициента отражения от границы двух сред (см. [1, 2, 13, 14]):

$$R_{\text{н}} = (Z_{\text{ст}} - Z_{\text{в}}) / (Z_{\text{ст}} + Z_{\text{в}}) \quad (1)$$

получим оценку этого коэффициента при отражении продольной волны от такого шлакового включения: $R = 0,87$. В данном случае коэффициент отражения достаточно близок к 1. Аналогичную оценку можно сделать и для коэффициента отражения поперечной волны $R_{\text{п}}$. Поэтому шлаковые включения указанной толщины в металле обычно уверенно выявляются при ультразвуковом контроле эхометодом (см. рис. 4).

Для включений меньшей толщины может формироваться просветляющий слой, когда коэффициент отражения уменьшается в 2 и более раз. В рассмотренном примере это может произойти, если толщина включения составит 0,6 мм для продольной волны или 0,3 мм для поперечной. Такое раскатанное шлаковое включение может пропускать до 90 % падающего пучка, то есть ультразвук практически не отражается и выявлять такие дефекты эхометодом затруднительно [15].

²В двухмерном случае речь идет об одном размере дефекта в плоскости, в которой рассматривается распространение ультразвуковых волн.

Далее рассмотрим подробнее индикатрисы рассеяния, то есть зависимости поля, рассеянного от дефекта, от направления распространения. В первом приближении можно считать, что они будут аналогичны тем, которые формируются при рассеянии на полых дефектах. С другой стороны, хорошо известно, что при размерах дефекта от одной-двух длин волн и более рассеянное на нем поле можно интерпретировать как состоящее из зеркально отраженной волны и дифрагированных волн различной природы.

На поверхности полого дефекта падающая на него волна возбуждает волны Релея или другие поверхностные неоднородные волны, которые часто и создают наиболее интенсивные дифрагированные сигналы. При падении на такой дефект плоской волны можно, по крайней мере в первом приближении, считать, что рассеянное поле в дальней зоне убывает с ростом расстояния r от дефекта как $r^{-1/2}$ в двухмерных моделях, так и r^{-1} в трехмерных моделях. При этом амплитуду зеркально отраженной волны можно найти, исходя формулы (1). А вот амплитуду и фазу дифрагированных волн найти аналогичным образом не удастся, поскольку в связи с частичным проникновением исходной волны в полость дефекта на границе раздела МИ/Д можно ожидать появления волн, «вытекающих» в материал изделия с поверхности дефекта, волн Стоунли или Лява [16]. Толщина дефекта также оказывает влияние на формирование индикатрисы рассеяния. Поэтому коэффициенты, определяющие амплитуду и фазу дифрагированных сигналов, должны существенно отличаться от аналогичных коэффициентов при рассеянии на дефектах с абсолютно мягкой (полость) или абсолютно жесткой (включение) границами. Этот вопрос требует дополнительного изучения с учетом параметров реальных дефектов.

При ручном ультразвуковом контроле наклонным совмещенным преобразователем дефект оценивается по максимальному значению амплитуды рассеянного на нем сигнала. Поэтому технология измерения эквивалентной площади такого полупрозрачного дефекта не отличается от применяемой при выявлении дефектов-полостей. А вот условные размеры равных по габаритам дефекта с заполнением и полого дефекта могут существенно отличаться друг от друга. Причина этого — искажение индикатрисы рассеяния, связанное с иным, по сравнению с полым дефектом, характером дифракции ультразвука на дефектах с заполнением. Особенно существенным это отличие может оказаться при использовании механизированного или автоматизированного сканирования, поскольку в этих случаях поиск абсолютного максимума сигнала, рассеянного дефектом, часто не производится, и условные размеры дефектов оцениваются на тех участках индикатрисы рассеяния, на которых может существенным образом сказываться «полупрозрачность» дефекта.

2. Прерывистые структуры

Этот случай, как и следующий, может иметь особо важное значение при контроле сварных соединений полиэтиленовых газопроводов. Поэтому приведем некоторые данные о свойствах полиэтилена низкого давления (ПНД), который используется при сооружении газопроводов. В качестве примера в табл. 1 приведены характеристики некоторых часто применяемых марок ПНД [4,17].

Таблица 1

Свойства ПНД, применяемого для сооружения газопроводов

Марка полиэтилена	Плотность ρ , 10^3 кг/м ³	Скорость продольных волн C_1 , 10^3 м/с	Волновое сопротивление Z , 10^3 Па·с/м	Коэффициент затухания δ ($f=2,5$ МГц), дБ/мм
П-80	0,94—0,95	2,25—2,32	2,11—2,19	0,55—0,62
П-100	0,96	2,39	2,29	0,44

Видно, что скорость продольной волны, плотность и волновое сопротивление разных марок полиэтилена изменяются незначительно, но при этом существенно отличаются от аналогичных величин в металлах [1, 2, 17—19]. В полиэтилене марки П-100 ультразвуковые волны затухают несколько меньше, чем в П80. Но в обоих случаях коэффициент затухания продольных волн имеет довольно большое значение. Для сравнения, в углеродистых сталях коэффициент затухания обычно находится вблизи значения 0,1 дБ/мм. Поэтому сварные соединения полиэтиленовых труб кон-

тролируются на более низких частотах, чем аналогичные по толщине соединения стальных труб. Для полиэтилена толщиной до 30 мм обычно используются частоты 1—1,8 МГц. При этом длина продольной волны находится в диапазоне 1,2—2,4 мм.

Поперечные волны в полиэтилене затухают значительно сильнее продольных, и в первом приближении их можно вообще не учитывать. Поэтому применительно к данному материалу расчеты распространения и рассеяния ультразвука можно проводить только для продольных волн в жидкостном приближении.

Рассмотрим пример моделирования полупрозрачного прерывистого дефекта. В литературных данных можно найти указание на строгое решение задачи о рассеянии упругого импульса на дефектах такого типа (см., например, работу [20]). Однако, к сожалению, это решение не доведено до практического применения. В данном случае более актуальными представляются решения, получаемые численными методами. Например, имея в виду жидкостное приближение, в [7, 8] рассеяние продольной волны рассчитывались методом конечных разностей. Функции источников звукового давления на внешней границе рассматриваемой прямоугольной области на плоскости X, Y были заданы как

$$g(X, Y, t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, t > T; \\ A(X, Y, t) \sin(\omega t) & \text{при } 0 \leq t \leq T, \end{cases} \quad (2)$$

где T и ω — длительность и круговая частота исходного импульса; t — время.

Задача рассеяния сводилась к решению системы дифференциально-разностных уравнений, которая в векторной форме имела вид:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = R\varphi + \Phi, \quad (3)$$

где φ — вектор искомых перемещений в узлах сетки; R — разностный оператор; Φ — вектор-функция звукового давления в граничных узлах сетки.

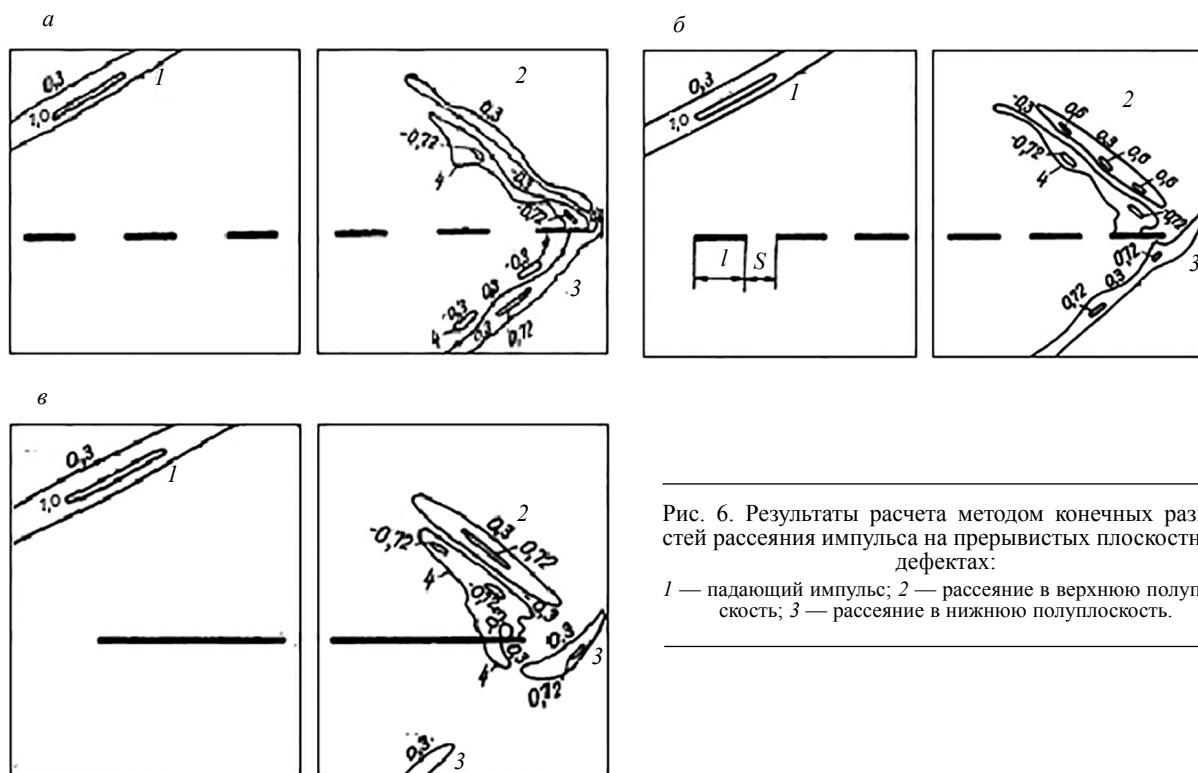


Рис. 6. Результаты расчета методом конечных разностей рассеяния импульса на прерывистых плоскостных дефектах:

1 — падающий импульс; 2 — рассеяние в верхнюю полуплоскость; 3 — рассеяние в нижнюю полуплоскость.

Численное интегрирование выполнено А-устойчивым комбинированным методом:

$$\begin{aligned}\Phi_{m+1}^H &= \Phi_m^H + H_1 R(\Phi_{m+1}^H, t_{m+1}^H); \\ \Phi_{m+1}^A &= \Phi_{m+1}^H + H_2 R(\Phi_{m+1}^H, t_{m+1}^H),\end{aligned}\quad (4)$$

где $H = H_1 + H_2$ — шаг цикла интегрирования; Φ_{m+1}^H — значение вектора искомых перемещений после m -го цикла интегрирования; Φ_{m+1}^A — исходное значение вектора для следующего шага интегрирования.

На рис. 6 приведены результаты расчета рассеяния продольной волны на двух прерывистых дефектах: слева — падающий импульс, справа — рассеянный. Каждый дефект состоит из 3-х фрагментов одинакового размера $l = \lambda$, однако расстояния S между этими фрагментами различное: $S = \lambda$ на рис. 6а и $S = \lambda/2$ на рис. 6б. Для сравнения на рис. 6в приведен результат аналогичного расчета для дефекта размером $l = 3\lambda$. Здесь λ — длина волны ультразвука. Граница МИ/Д предполагалась абсолютно жесткой — твердое включение в стыке полиэтиленовых труб.

Во всех трех случаях размер непрозрачной части дефектов равен 3λ . Но общая протяженность дефектов в плоскости чертежа падает от 1-го дефекта к 3-му. Сравнивая правые части рис. 6а, б, в, можно видеть, что при падении на такие дефекты одного и того же импульса рассеянные поля будут существенно отличаться. Так, например, распределения амплитуд вдоль фронтов рассеянных волн различные — оно иллюстрируется числами вдоль волновых фронтов. На некотором расстоянии от прерывистого дефекта фронт рассеянной волны частично повторяет форму прерывистой структуры дефекта, а амплитуды на фронтах рассеянных сигналов растут от 1-го случая к 3-му. Интересно отметить, что аналогичную структуру рассеянного поля можно видеть и на прерывистых дефектах в сварных швах металлических изделий (см. рис. 4).

Отметим также, что в приведенном примере максимальная амплитуда рассеянных сигналов составляет 0,72 при падающей амплитуде 1,0, то есть эта величина одинакова для всех трех дефектов. Однако структура рассеянных импульсов для этих дефектов различна. Такие эффекты ранее трудно было наблюдать на практике, поскольку оператор использовал только изображение электрических импульсов на А-скане — осциллографической развертке амплитуда—время. В настоящее время, имея возможность наблюдать различные сечения изделий с помощью дефектоскопов с датчиками на фазированных решетках или с помощью систем с синтезированной апертурой, можно получать из контролируемого изделия развертки типа В, вид которых аналогичен изображениям, приведенным на рис. 6, а также и изображения других сечений изделий. По таким изображениям можно получать дополнительную информацию о форме и размерах дефектов. Например, падающий пучок можно фокусировать на плоскость, или выполнять «фокусировку в точку», как описано, например, в [21]. При этом можно выявлять и детализировать структуру фронта рассеянного сигнала, которая несет информацию о структуре поверхности дефекта.

3. Засоренность сварного шва

В данном случае особенность дефектов в том, что они не имеют границ, точно определенных в пространстве. Конечно, эти дефекты локализованы вблизи зоны сплавления или в объеме наплавленного металла. Однако в направлении, перпендикулярном срединной плоскости сварного шва, такие дефекты захватывают некоторую зону толщиной в единицы миллиметров, наполненную мелкодисперсными включениями. Например, при сварке полиэтиленовых труб можно считать, что эта зона имеет толщину от 5 до 10 мм при толщине стенки соединяемых трубопроводов от 4 до 30 мм.

Для расчета рассеяния ультразвука на частотах от 1 до 1,8 МГц включения (частицы песка), акустически более жесткие по сравнению с основным материалом трубы, можно аппроксимировать сферами диаметром ориентировочно 0,1—0,5 мм, то есть считать, что их диаметр D составляет от 0,1 λ до 0,5 λ . При этом толщина слоя материала L , в котором они находятся, составляет ориентировочно 4—8 длин волн.

Также очевидно, что рассеяние ультразвуковых волн зависит от концентрации σ инородных частиц. Например, по рентгеновским снимкам 44-3 и 42-2 можно сделать оценку $\sigma = 0,5 - 0,7$.

Аналогичные прослойки могут возникать и при контактной сварке металлических труб. Однако в этом случае более вероятно, что они будут наполнены множественными шлаковыми включениями, которые образовались при термическом воздействии на частицы песка при нагреве металла.

Таким образом, дефект типа засоренность сварного шва можно моделировать в виде находящегося в области сплавления фрагмента основного материала трубы, в котором равномерно распределены мелкие (относительно длины волны) твердые сферические включения. При этом за пределами зоны сплавления материал можно считать однородным изотропным (для цельнотянутых труб) или анизотропным в соответствии со свойствами проката (для сварных труб).

Ранее в прикладных задачах ультразвуковой дефектоскопии рассматривались рассеяние ультразвука в крупнозернистых материалах, в некоторой степени аналогичные описанной прослойке (например, в лите [22, 23], бетоне [24—26]). Однако в данном случае для целей моделирования более точно было бы считать, что в прослойке материала с описанными мелкими (по сравнению с длиной волны) включениями волна рассеивается по релеевскому закону. Происходит реверберация ультразвуковых волн на таких множественных включениях. При этом интенсивность рассеянных лучей пропорциональна концентрации частиц σ и квадрату объема частицы (шестой степени размера — D^6) [27]. Также эта интенсивность зависит от направления рассеяния. При этом закон формирования индикатрисы рассеяния рассматриваемым слоем имеет вид:

$$I \sim I_0 \left(\frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \right) \frac{\sigma D^6}{\lambda^4}, \quad (5)$$

где I_0 и I — интенсивности волн, падающей на слой и выходящей из него соответственно, θ — угол между лучом, падающим на слой, и направлением наблюдения.

Отсюда, в первом приближении можно считать, что индикатриса рассеяния дефектов типа засоренность — практически круговая в диапазоне углов $135^\circ \leq |\theta| \leq 180^\circ$ (направление $\theta = 180^\circ$ соответствует отражению «назад», то есть контролю эхометодом по совмещенной схеме).

В целом же путь ультразвуковой волны при наличии дефекта рассматриваемого типа состоит из трех участков с различными свойствами, каждый из которых однороден:

среда от точки ввода в изделие до засоренной прослойки;

засоренная прослойка;

среда от засоренной прослойки до точки наблюдения (приема сигналов).

Расчет акустического тракта и амплитуды рассеянного сигнала сводится в этом случае к расчету прохождения ультразвука через трехслойную среду, каждый слой которой имеет соответствующий импеданс, и коэффициент отражения от прослойки может быть рассчитан по формуле типа (1) (см. [14]). Для более точного анализа необходимо также учитывать, что при реверберации короткого ультразвукового импульса на мелкодисперсных включениях его форма искажается, а длительность увеличивается. Что касается условного размера такого дефекта, то вдоль оси трубы его можно по максимуму считать равным ширине наружного грата, а вдоль оси сварного шва измерить по падению амплитуды рассеянного сигнала на уровне -6 дБ от максимума.

Отметим, что дефекты рассматриваемого типа аналогичны особенностям и структурам, которые часто встречаются в практике медицинского диагностирования. При разработке методов и средств выявления таких дефектов целесообразно использовать опыт применения медицинских диагностических ультразвуковых сканеров [28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полупрозрачные для ультразвуковых волн несплошности часто встречаются в сварных соединениях различного типа, однако особенности их выявления при ультразвуковом контроле сварных соединений, изделий из металла и пластмасс недостаточно изучены и слабо представлены в технической литературе.

В статье предложена классификация полупрозрачных несплошностей (дефектов) по трем группам, которые условно названы дефектами с заполнением, прерывистыми структурами и засоренностью сварного шва. Возможны также комбинации дефектов этих групп.

Рассеяние ультразвуковых волн на несплошностях трех указанных типов происходит по разным законам. В первом случае дефекты можно моделировать традиционными дисками, полосами, боковыми и вертикальными цилиндрическими сверлениями. Но при этом границы раздела «материал изделия/дефект» должны задаваться импедансными. Для расчета параметров сигналов, рассеянных на таких дефектах, можно применять аналитические и численные методы.

Во втором случае дефекты представляются в виде расположенных вблизи друг от друга однотипных включений или полостей, ориентированных, как правило, вдоль некоторого выделенного

направления в сварном шве. Для расчета рассеяния ультразвука на таких дефектах целесообразно ориентироваться на применение численных методов.

Наконец, в третьем случае дефекты можно представить в виде вложенного в область сплавления фрагмента основного материала трубы, в котором равномерно распределены мелкие (относительно длины волны) сферические включения. Для моделирования и расчета рассеяния ультразвука в этом случае необходимо учитывать его реверберацию на мелких включениях.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурвич А.К., Ермолов И.Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. Киев: Техника, 1972. 424 с.
2. Алешин Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений. М.: Машиностроение, 2013. 574 с.
3. Аббакумов К.Е., Зайков В.Г., Лапин Ю.В., Николаев С.П., Паврос С.К., Петров В.Г., Пронин В.Д., Топунов А.В. О выявляемости флокеноподобных дефектов эхо-методом / Методы и средства повышения информативности и достоверности результатов ультразвуковой дефектоскопии сварных металлоконструкций. Всесоюзная научно-техническая конференция. Тезисы докладов. Ленинград, 1989. С. 27—28.
4. Giller G., Mogilner L.Yu., Khomenko V. Technologies and Hardware of Ultrasonic Testing of Welded Joints of Steel and Polyethylene Pipelines / В сб.: 15th World Conference on Nondestructive Testing CD-Proceedings. 2000. С. Idn 743.
5. Postma P.J., Hermkens R.J.M. Suitability of Non Destructive Techniques for Testing Polyethylene Pipe Joints / В сб.: Plastic Pipes XVI 2012. С.1—10.
6. Голубев А.С., Добротин Д.Д., Паврос С.К. Модель протяженных плоскостных несплошностей толстолистовой стали // Дефектоскопия. 1990. № 8. С. 57—61.
7. Алешин Н.П., Князев В.Д., Могильнер Л.Ю. Рассеяние ультразвуковых импульсов на «полупрозрачных» дефектов. Моделирование методом конечных разностей // Дефектоскопия. 1989. № 10. С. 3—9.
8. Алешин Н.П., Князев В.Д., Могильнер Л.Ю. Анализ выявляемости дефектов в двухслойном изделии / В сб. Методы и средства повышения информативности и достоверности результатов ультразвуковой дефектоскопии сварных металлоконструкций. Всесоюзная научно-техническая конференция. Тезисы докладов. Ленинград, 1989. С. 26—27.
9. Кучук-Яценко С.И., Радько В.П., Казымов Б.И., Зяхор И.В., Никольников А.В. Особенности обнаружения дефектов при ультразвуковом контроле соединений труб, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением // Автоматическая сварка. 2007. № 1. С. 39—43.
10. СП 42-103-2003. Проектирование и строительство газопроводов из полиэтиленовых труб и реконструкция изношенных газопроводов. С.-Петербург: Изд-во ДЕАН, 2005. 208 с.
11. Shin H.J., Kwan J.-R., Song S.-J. Ultrasonic Real Time Imaging Technique for the Inspection of Electrofusion Joints for Polyethylene Piping / In 2001 Forum for Gas Safety, edited by Korea. Gas Safety Corporation, KGS 2001-069, 21.
12. Презентация компании Indesystems: режим доступа http://www.indesystems.com/index_Eng.htm. Дата обращения 10.02.2020.
13. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. С.-Петербург: Изд. Свен, 2007. 296 с.
14. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
15. Волков С.А., Мартыненко С.В., Могильнер Л.Ю. Расчет эхо-сигналов от границы с дефектом и дна двухслойного изделия // Известия ВУЗов. Сер. Машиностроение. 1986. Вып. 3. С. 119—124.
16. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 286 с.
17. Гиллер Г.А., Могильнер Л.Ю. Ультразвуковые хордовые преобразователи в дефектоскопии сварных стыков трубопроводов // В мире неразрушающего контроля. 2000. № 2 (8). С. 18—20.
18. Бадиди Буда А., Бельхельфа Х., Джерир В., Халими Р. Неразрушающий метод оценки содержания углерода в стали // Прикладная механика и техническая физика. 2014. Т. 55. № 3. С. 174—180.
19. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1996. 184 с.
20. Кухаренко Ю.А., Сбойчаков А.М., Гончарук В.А., Власов С.Н., Поляк П.Л. Некогерентное рассеяние упругих волн в трещиноватой среде // Электронный ресурс. Режим доступа http://ts.sbras.ru/ru/articles/09_3_011.pdf. Дата обращения 20.03.2020.
21. Kachanov V.K., Sokolov I.V., Kontsov R.V. et al. Using “Focusing to a Point” Algorithm for Reference-Free Measurement of the Speed of Ultrasound in Tomography of Concrete Engineering Structures// Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 6. P. 443—452. [Качанов В.К., Соколов И.В., Концов Р.В., Тимофеев Д.В. Использование алгоритма «фокусировка в точку» для безэталонного измерения скорости ультразвука при томографии строительных конструкций из бетона // Дефектоскопия. 2019. № 6. С. 3—10.]

22. Воронкова Л.В. Влияние структуры чугуна на скорость и коэффициент затухания ультразвука // Дефектоскопия. 1991. № 12. С. 18—23.
23. Могильнер Л.Ю., Скуридин Н.Н., Придеин О.А., Временко А.И. Применение электромагнитно-акустических толщиномеров при диагностировании металлоконструкций и механо-технологического оборудования // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9. № 3. С. 315—325.
24. Potapov A.I., Kondrat'ev A.V. et al. Nondestructive Testing of Structurally Inhomogeneous Composite Materials by the Method of Elastic-Wave Velocity Hodograph // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 6. P. 434—442. [Потанов А.И., Кондратьев А.В., Смородинский Я.Г. Неразрушающий контроль структурно-неоднородных композиционных материалов методов годографа скорости упругих волн // Дефектоскопия. 2019. № 6. С. 11—19.]
25. Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая дефектоскопия бетона эхометодом: состояние и перспективы // В мире неразрушающего контроля. 2002. № 2 (16). С. 6—10.
26. Карташов В.Г., Качанов В.К., Шалимова Е.В. Основные положения теории пространственно-временной обработки сигналов применительно к задачам ультразвуковой дефектоскопии изделий из сложно структурных материалов // Дефектоскопия. 2010. № 4. С. 19—29.
27. Интернет ресурс: Режим доступа <http://www.chem.msu.ru/rus/teaching/colloid-rolldugin-lectures/14.pdf>. Дата обращения 20.03.2020.
28. Резников И.И., Федорова В.Н., Фаустов Е.В., Зубарев А.Р., Демидова А.К. Физические основы использования ультразвука в медицине. М.: Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, 2015. 97 с. Режим доступа: <http://rsmu.ru/fileadmin/rsmu/img/pf/cfim/uzi.pdf>. Дата обращения 15.02.2020.