

ГОЛОВНЫЕ ВОЛНЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ МЕТАЛЛОВ

Н.П. Разыграев

АО «НПО «ЦНИИТМАШ». 109088, РФ, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская 4. E-mail: NPRazygraev@cniitmash.com

Целью данной работы является исследование истории, физики и терминологии ультразвуковой дефектоскопии металлов головными волнами. Библиогр. 23, рис. 9.

Ключевые слова: акустическая волна, продольная волна, поперечная волна, головная волна, продольно-поверхностная волна, подповерхностная волна, боковая волна, ползучая волна, *creeping wave*, критический угол, ультразвуковой контроль металлов

В журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» опубликована статья [1], в которой авторы рассматривают имеющееся широкое многообразие терминов при отображении и применении головных волн (ГВ) в УЗ дефектоскопии металлов и в акустике двухслойных и многослойных сред. Эта публикация особенно интересна и важна в связи с тем, что в 2022 г. исполняется 50 лет со времени начала использования в ультразвуковой дефектоскопии металлов головных волн.

В 1972 г. в процессе экспериментальных исследований акустических характеристик сталей для оборудования и трубопроводов АЭС с ВВЭР-1000 впервые в ультразвуковой дефектоскопии металлов были зафиксированы на экране ультразвукового дефектоскопа USIP-10 фирмы «Крауткремер», имеющего динамический диапазон экрана 36 дБ, неизвестные ранее сигналы очень быстрой волны – они раньше всех других импульсов приходили на приёмник и были примерно на два порядка слабее объёмных продольной и поперечной волн [2]. Научные исследования головных (и боковых) волн, разработки новых способов и технологий УЗК были представлены в [3]. Для того, чтобы предметно обсуждать терминологию, используемую при УЗК металлов ГВ, ниже представлены результаты исследований АО «НПО «ЦНИИТМАШ» и предложенные первичные термины.

Выполненные в АО «НПО «ЦНИИТМАШ» в 1973–1975 гг. [4] оригинальные исследования возбуждения, распространения и приема ГВ показали возможность использования их для обнаружения дефектов в при- и подповерхностном слое глубиной 1...15 мм. На основе использования ГВ были разработаны новые способы ультразвукового контроля качества материалов, защищенные авторскими свидетельствами [5–7].

В процессе экспериментально-теоретических исследований 1972–1979 гг. акустических волн головного типа было установлено, что:

– оптимальным углом возбуждения и приема ГВ является первый критический угол α_1 (для границы оргстекло-сталь $\alpha_1 \approx 27^\circ 30'$) [8];

– при использовании излучателей и приемников ГВ с пьезоэлементами диаметром 12 и 18 мм и частотой 1...5 МГц и промышленных дефектоскопов ГВ можно зарегистрировать на расстоянии 200...300 мм; ослабление амплитуды ГВ с расстоянием пропорционально квадрату расстояния при контроле в иммерсионном режиме ($A \sim r^2$) и при контроле контактными искателями ($A \sim r^{-1,75}$) [9];

– акустическое поле ГВ в контролируемой среде характеризуется наличием минимума (нуля) напряжений на контактной поверхности. Максимум амплитуды поля находится на определенном луче. При использовании излучателей и приемников головных волн с пьезоэлементами диаметром 12 и 18 мм и частотой 1...5 МГц этот луч образует с контактной поверхностью угол, примерно равный 12° [10];

– установлено, что для возбуждения и регистрации ГВ наиболее удобны призматические искатели с обязательным разделением функций излучателя и приемника [11]. Разработаны конструкции двух типов искателей ИЦ-61 и ИЦ-70 для контроля приповерхностного слоя. Искатели типа ИЦ-61 осуществляют схему «тандем» (излучатель и приемник расположены один за другим по отношению к отражателю), позволяют проводить ультразвуковой контроль на расстоянии 5...70 мм от искателя и обеспечивают обнаружение дефектов с отношением сигнал–шум не менее 10 дБ. Искатели типа ИЦ-70 работают по схеме «дуэт» (излучатель и приемник расположены рядом на одном расстоянии от отражателя), обеспечивают обнаружение дефектов на расстоянии 5...20 мм с соотношением сигнал–шум не менее 14 дБ;

– исследование выявляемости подповерхностных дефектов головными волнами показало, что амплитуда эхо-сигнала от дефекта пропорциональна площади отражающей поверхности; зави-

симость амплитуды эхо-сигнала от расстояния изменяется по сложному закону [12].

На основании проведенных исследований возбуждения, распространения и приема ГВ в АО «НПО «ЦНИИТМАШ» было разработано следующее физическое представление о них.

При падении продольной волны на границу раздела сред под первым критическим углом α_1 в нижней среде образуется неоднородная продольная волна (продольно-поверхностная), которая скользит вдоль поверхности (рис. 1). При распространении этой волны вдоль границы обеспечивается выполнение граничных условий. При контроле иммерсионным способом эти условия – равенство нулю касательных напряжений и равенство нормальных напряжений. При контроле контактным способом граничные условия более сложны и различны для участка, где расположена призма преобразователя, и для свободной поверхности, где нормальные и касательные напряжения равны нулю.

Это однако не означает отсутствия волны, поскольку деформации на поверхности существуют. Выполнение граничных условий при распространении неоднородной продольной (продольно-поверхностной) волны обеспечивается за счет боковых волн (продольных и поперечных), образующихся как в нижней, так и в верхней средах.

Для сравнения можно вспомнить, что при распространении поверхностной волны вдоль свободной границы условие равенства нулю нормальных и касательных напряжений выполняется благодаря одновременному присутствию неоднородных продольных и поперечных волн. В случае с неоднородной продольной (продольно-поверхностной) волной распространение волны вдоль границы, как в верхней, так и в нижней средах, происходит со скоростью продольной волны в нижней среде. Это означает, что в верхней среде фронты боковой продольной волны в случае с жидкостью, или боковых продольной и поперечной волн в случае с оргстеклом, и боковой поперечной волны в нижней среде (в стали), также распространяются со скоростью продольной волны в нижней среде.

Наличие продольной боковой волны в верхней среде позволяет фиксировать неоднородную

продольно-поверхностную волну с помощью наклонного преобразователя – контактного или иммерсионного. В случае иммерсионного режима контроля боковая волна в жидкости возбуждается в каждой точке границы. При контроле контактным способом напряжения на границы воздух-сталь практически равны нулю. Когда же с этой границей соприкасается наклонный преобразователь через слой контактной жидкости, нормальные напряжения на границе уже не равны нулю, что приводит к образованию продольной боковой волны в призме приемника.

Оптимальным углом возбуждения и приема продольно-поверхностной волны является первый критический угол (рис. 2). Его значение определяется из закона Снеллиуса:

$$\sin \alpha_1 = C_{\text{лорз}} / C_{\text{лсн}}$$

где $C_{\text{лорз}}$ – скорость продольной волны в оргстекле; $C_{\text{лсн}}$ – скорость продольной волны в стали.

Для границы оргстекло-сталь первый критический угол примерно равен $27^\circ 30'$. Такой угол падения имеют призмы излучателя и приемника ГВ.

Кроме боковой продольной волны в верхней среде (если она твердая) образуется боковая поперечная волна. Угол между направлением боковой поперечной волны и нормалью к границе раздела определяется также законом Снеллиуса:

$$\sin \alpha_1 = C_{\text{лорз}} / C_{\text{лсн}}$$

где $C_{\text{лорз}}$ – скорость поперечной волны в оргстекле.

В нижней среде (в стали) в каждой точке на границе раздела сред генерируется боковая поперечная волна. Фронт этой волны распространяется также со скоростью продольной волны в нижней среде. Угол между направлением фронта волны и нормалью к границе раздела также определяется законом Снеллиуса и называется третьим критическим углом:

$$\sin \alpha_3 = C_{\text{лсн}} / C_{\text{лсн}}$$

где $C_{\text{лсн}}$ – скорость поперечной волны в стали.

При падении поперечной волны на границу сталь-воздух под третьим критическим углом ($\alpha_3 \approx 33^\circ$) (на противоположную (донную) поверхность) на ней в строгом соответствии с законом Снеллиуса образуется неоднородная продольно-поверхностная волна (рис. 3) и сопутствующие

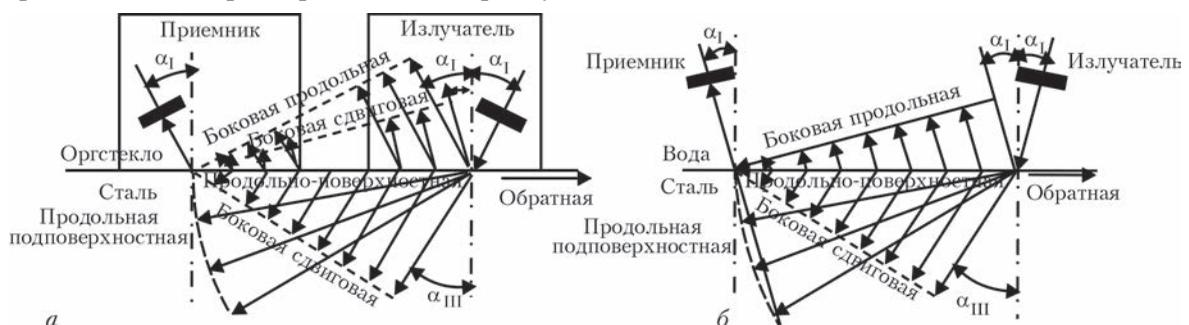


Рис. 1. Распространение головной волны вдоль границы раздела: а – оргстекло-сталь; б – вода-сталь

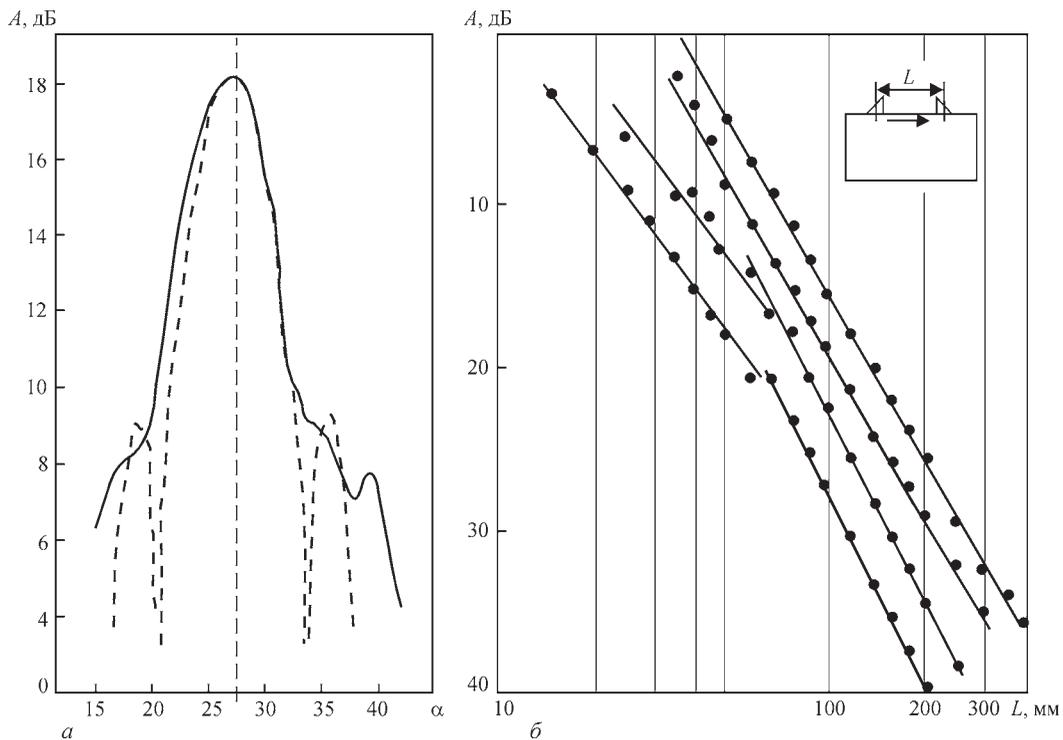


Рис. 2. Возбуждение (а) и распространение и ослабление (б) головной волны при различных углах падения A , дБ – амплитуда волны; α – угол падения волны

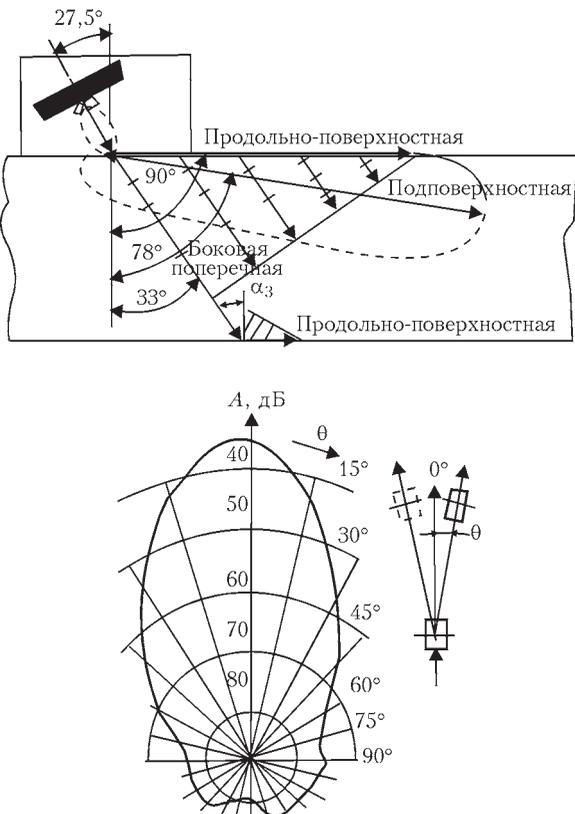


Рис. 3. Падение боковой поперечной волны на донную поверхность и образование волн на ней θ – угол расхождения ей боковые (продольные и поперечные) волны по обеим сторонам от границы раздела сред.

Если контролю подвергается изделие с плоскопараллельными поверхностями, то на донную поверхность, благодаря образованию боковой по-

перечной волны в каждой точке контактной поверхности, начиная от точки выхода излучателя, под третьим критическим углом и ее распространению, падают поперечные волны (рис. 3). Т. е. на донную поверхность падает фронт боковых поперечных волн. В каждой из точек фронта на границе сталь-воздух возбуждается продольно-поверхностная волна и сопровождающая ее боковая волна. Этот процесс происходит как на нижней донной поверхности, так и на верхней контактной поверхности, но с запаздыванием во времени и с ослаблением волны. В сейсмоакустике каждому из импульсов, пришедших на приемник в результате образования этих или аналогичных вторичных продольно-поверхностных и боковых волн, присваивают наименование головной волны с очередным номером: головная волна 1, головная волна 2 и т. д. [13]. Параметры импульсов ГВ в сейсмоакустике используются для оценки состояния сред.

Одновременно с возбуждением продольно-поверхностной волны образуется и обратная продольно-поверхностная волна – распространение упругого возмущения в сторону, противоположную основному излучению. Оказалось, что обратную волну можно использовать в практике УЗК [3].

Образование боковых волн является причиной быстрого ослабления продольно-поверхностной волны. При распространении волны вдоль границы вода-сталь боковые волны образуются в обеих средах и ослабление амплитуды, как показали результаты исследований, пропорционально r^{-2} . В случае контактного способа контроля на свобод-

ной поверхности образуется лишь боковая поперечная волна в стали (боковая продольная волна в воздухе ничтожно мала), поэтому ослабление продольно-поверхностной волны пропорционально $r^{-1,75}$, то есть происходит медленнее, чем в иммерсионном режиме (рис. 2).

Рассмотренная на рис. 1 картина распространения ГВ дает лучевое представление обо всех видах волн, образующихся в этом процессе. Необходимо особо отметить, что фронты боковых волн являются плоскими, а данный способ возбуждения волн является единственным способом получения плоских волн.

В реальных условиях ультразвукового контроля наклонным преобразователем акустическое поле излучающего пьезоэлемента имеет не плоскую форму, а представляется в виде определенной диаграммы направленности. Это означает, что от излучателя, акустическая ось которого ориентирована под первым критическим углом к контактной поверхности, на границу также падают продольные волны с углами падения меньше и больше первого критического. Продольные волны с углами падения большими первого критического образуют в нижней среде неоднородные продольно-поверхностные волны. Энергия этих волн уменьшается с увеличением отклонения угла падения от первого критического угла.

Продольные волны, падающие под углами меньшими первого критического, преломляются на границе раздела и образуют в нижней среде

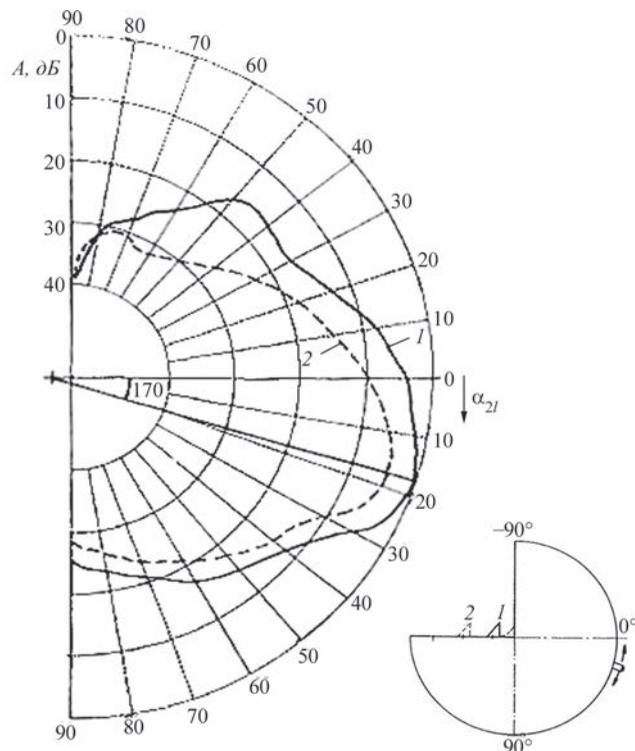


Рис. 4. Акустическое поле головной волны после прохождения зоны сопряжения R – радиус сопряжения; 1 – R = 7,5 мм; 2 – R = 0,02 мм; частота 1,8 МГц

поле продольной волны со сферическим фронтом, начало которого совпадает с фронтом продольно-поверхностной волны (рис. 3). Значения амплитуд по сферическому фронту продольной волны связаны с амплитудой волны в направлении преломленного луча, которая определяется произведением соответствующего значения из диаграммы направленности на коэффициент прохождения по амплитуде.

Исследования подтвердили, что нулевое значение напряжений продольной волны достигается на свободной поверхности, а максимальное значение находится под поверхностью и достигается вдоль луча, образующего с поверхностью угол примерно равный 12° (угол ввода 78°) (рис. 3). Эта волна не чувствительна к неровностям поверхности и реагирует лишь на дефекты, отходящие от поверхности внутрь изделия и подповерхностные дефекты. По этой причине эту волну называют подповерхностной волной.

Ослабление амплитуды продольной подповерхностной волны вдоль луча любого направления происходит как в обычной продольной волне, т.е. пропорционально r^{-1} .

При контроле изделий с сопряжениями (рис. 4) условия распространения ГВ несколько изменяются. Когда фронт продольно-поверхностной и продольной подповерхностной волн достигает сопряжения детали, продольно-поверхностная волна частично перерождается в объемную продольную волну. Продольная подповерхностная волна огибает сопряжение и распространяется вдоль воображаемой линии контактной поверхности.

Акустическое поле, образуемое за началом сопряжения, представляет собой объемную продольную волну, с помощью которой можно обнаруживать дефекты за сопряжением и под ним (рис. 4). Важно, что ослабление продольной волны за сопряжением в связи с отсутствием боковых волн происходит по закону r^{-1} . Это позволяет обнаруживать с помощью ГВ дефекты на больших расстояниях, чем при расположении их под гладкой поверхностью. В данном случае можно говорить об эффекте усиления ГВ.

Такой же эффект усиления ГВ имеет место при распространении продольной подповерхностной

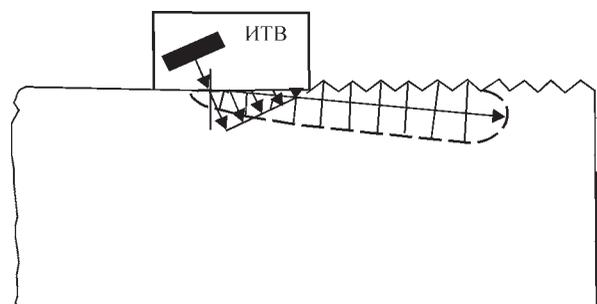


Рис. 5. Распространение головной волны под резьбой

волны под резьбой и или под поверхностью типа резьбы (рис. 5). Здесь на участке расположения периодических выступов и впадин (резьбы) нет продольно-поверхностной волны, не образуются боковые волны и не затрачивается энергия на их образование. В результате амплитуда эхо-сигналов от дефектов одних и тех же размеров, расположенных под резьбой, больше, чем от аналогичных отражателей (дефектов) под гладкой поверхностью.

Учитывая следующие особенности акустического поля излучателя с углом падения равным первому критическому углу:

- наличие неоднородной продольно-поверхностной и подповерхностной волн;
- образование боковых волн в контролируемой и прилегающей средах;
- быстрое ослабление неоднородной продольно-поверхностной волны с расстоянием;
- распространение продольных волн с максимальной скоростью звука и то, что они первыми приходят на приемник, всей совокупности этих волн присвоили специфический для ультразвуковой дефектоскопии материалов термин – головные волны, по аналогии с головными волнами в сейсмоакустике. Этот термин подчеркивает, что импульсы рассматриваемой ГВ распространяются с максимальной скоростью и первыми достигают приемника, что во многих случаях весьма благоприятно для интерпретации сигналов и расшифровки результатов контроля.

Применение физического представления о ГВ позволило найти объяснение, а затем и решение двум необъяснимым на начало 1970-х годов задачам акустического тракта.

Первая задача состояла в неоднозначной зависимости амплитуд эхо-сигналов от размеров (высоты и ширины) зарубок, сегментов и двугранных углов при контроле преобразователями с углом падения (призмы) $28...30^\circ$ или углом ввода $\alpha \approx 57^\circ$ ($90...33^\circ$) (как правило, например, при угле падения 45° , амплитуда эхо-сигнала от углового отражателя увеличивается строго пропорционально размеру отражателя). Эту задачу мы называем задачей Райхмана А.З., который первым обнаружил и описал ее (рис. 6, а). Объяснение было найдено и предложено нами, когда во внимание было принято то, что амплитуда эхо-сигнала от зарубки складывается в результате интерференции (сложения в соответствующих фазах) импульсов от:

- лучей объемной поперечной волны с углами ввода от 33° и более;
- неоднородной продольно-поверхностной волны, образующейся при падении на донную поверхность части ультразвукового пучка под третьим критическим углом, равным 33° ;

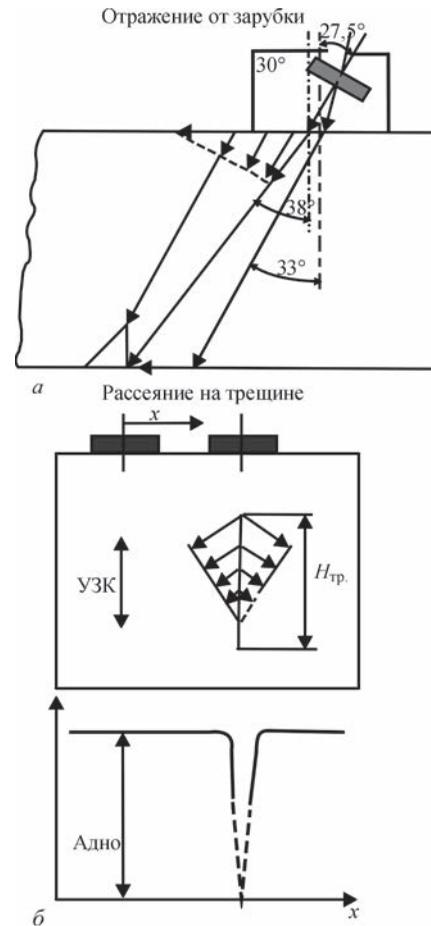


Рис. 6. Рассмотрение задач Райхмана и Гурвича с учетом физики головной волны: а – задача Райхмана; б – задача Гурвича; $H_{тр}$ – высота трещины; $A_{дно}$ – амплитуда донного сигнала

- боковой поперечной волны на донной поверхности и ее отражения от зарубки.

Математическое решение задачи выполнено Райхманом А.З. и его учеником Переваловым С.П.

Вторая задача акустического тракта, требовавшая решения, заключалась в уменьшении донного эхо-сигнала продольной волны при наличии на пути распространения ультразвука плоского, ориентированного вдоль направления распространения ультразвука, разрыва, несплавления, пропила, трещины (рис. 6, б). Эту задачу я назвал задачей Гурвича, так как впервые услышал ее от А.К. Гурвича в 1973 г. Объяснение и решение этой задачи было найдено, когда мы поняли, что при распространении продольной волны вдоль плоского разрыва сплошности на его берегах (двух плоских поверхностях) образуются неоднородные продольно-поверхностные волны и сопровождающие их боковые поперечные волны для одной поверхности, а здесь в зеркально-теневом способе сразу две поверхности-берега трещины), которые отводят в стороны значительное количество энергии волны и резко уменьшают амплитуду донного эхо-сигнала.

До наших исследований 1972-1976 гг. в ультразвуковой дефектоскопии металлов считалось, что при падении продольной волны под первым критическим углом волна полностью отражается от границы раздела. В нижней среде не образуется ни продольной, ни поперечной волн. Это называлось эффектом полного внутреннего отражения. Этот эффект четко просматривается на расчетной зависимости коэффициентов прохождения и отражения от угла падения на рис. 7 для границы оргстекло-сталь [14]. В точках первого критического угла коэффициенты отражения и прохождения продольной и поперечной волн равны нулю. Наши экспериментальные исследования показали, что при первом критическом угле в нижней среде образуются продольно-поверхностные волны и подповерхностные продольные волны, которые можно использовать в ультразвуковой дефектоскопии металлов.

Наши исследования в УЗД позволили понять процессы распространения продольных и поперечных волн вблизи первого и третьего критических углов. В связи с обнаружением новых закономерностей в образовании волн пришлось найти приемлемые для УЗД металлов названия и термины. В ультразвуковой дефектоскопии появились новые термины: головные, боковые, неоднородные продольно-поверхностные волны, подповерхностные волны. Все эти названия хорошо и в полной мере интерпретируют специфическую физическую картину возбуждения, распространения и приема ультразвуковых продольных, поперечных и неоднородных волн, имеющих место при падении продольной волны под первым критическим углом (и близких нему углах) и при третьем критическом угле падения. В этом на наш взгляд заключается «смысловое содержание терминов», о котором авторы анализируемой статьи высказываются в [1]. Именно такое изображение и представление о ГВ, как комплексе волн, и составля-

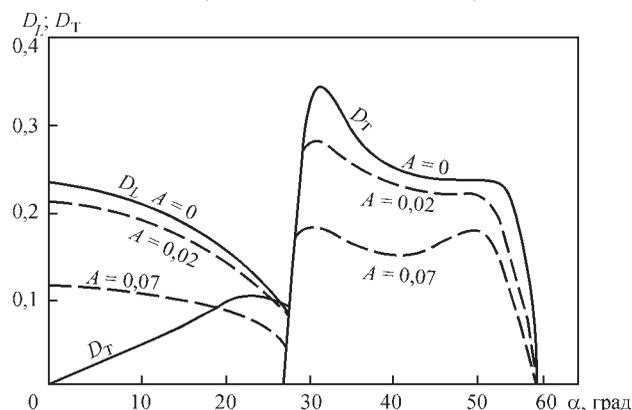


Рис. 7. Зависимость коэффициентов прохождения при падении продольной волны под углом на границу оргстекло-сталь α -угол падения; D_L – коэффициент прохождения продольной волны; D_T – коэффициент прохождения поперечной волны; A – толщина контактного слоя, отнесенного к длине волны

ющих её волнах, позволило четко и однозначно рассмотреть и решить задачи Райхмана и Гурвича, объяснить численную и качественную разницу в ослаблении ГВ с расстоянием при распространении волны вдоль свободной границы (с воздухом) и в иммерсионном режиме, а также понять и уяснить усиление ГВ при распространении под поверхностью типа резьбы, на которой в УЗД не может распространяться продольно-поверхностная волна и не возбуждаются боковые (продольные и поперечные) волны.

Не все коллеги поддержали нашу терминологию, при этом и мы, авторы предложенных терминов, и наши оппоненты из прикладной и теоретической акустики ссылались на книгу академика Бреховских Л.М. [13]. В ней он описывает распространение упругих (акустических) волн в слоистых средах в горных породах и воде. Как правило, это звуковые волны с частотой 20...20000 Гц, которые слышит человеческое ухо, и гиперзвуковые волны с частотой менее 20 Гц, которые человек уже ощущает всем телом.

В нормативной и технологической документации на УЗК основного и наплавленного металла сварных соединений в энергетическом и тяжелом машиностроении, в которой, как правило, выступал АО «НПО «ЦНИИТМАШ», а также в трудах и документах по УЗД в других областях промышленности использовались термины, предложенные нами. Предложенная терминология не вполне удовлетворила специалистов в области акустических исследований и сейсмоакустики. Так, для обозначения предложенной нами одной из составляющих ГВ – продольно-поверхностной волны в [15] используется термин «поверхностно-продольная волна». Специалисты, пришедшие в УЗД из технической акустики, участвовавшие в обсуждении новых терминов, в целом приняли нашу терминологию, тем более, что она в основном касалась и использовалась в ультразвуковой дефектоскопии металлов.

Вместе с тем, авторы новых книг, учебников, справочников, статей и стандартов по УЗД, как правило, в полной мере не владели описываемыми явлениями, закономерностями и терминами, иногда были не согласны с нашими терминами, но обойтись без описания способов и технологии УЗК ГВ уже не могли. Отсюда появились, в частности, в 2003 г. собственные описания физики и технологии УЗК ГВ у Ланге и Воронкова [16] и собственные термины, например, «скользящая волна» в 1991 г., взятая из «сейсмоакустики» [17].

Иностранные ученые и специалисты (немецкие, сотрудничающие с фирмой «Крауткремер») по следам наших работ опубликовали свои статьи и патенты [18, 19], в которых для обозначения

ния продольно-поверхностной волны использовали термин «ползучая волна», который в данном случае исходит от эффекта ползучести металла: «kriechwellen» (немец.) и «creeping wave» (англ.). Головной же волной они называют боковую поперечную волну в металле. При этом они не ссылаются на наши исследования головных волн и на наши научные труды и технологии.

Но уже в 1986 г. в книге [20] авторы (в их числе соавторы указанного выше немецкого патента) приводят многочисленные ссылки на наши исследования и разработки в области УЗК металлов ГВ. На русском языке книга была издана под редакцией Волченко В.Н., «Металлургия», Москва, 1991 г. В этой книге наряду с термином «головная волна» в нашем понимании, как комплекса волн, используется термин «ползучая волна» для обозначения продольно-поверхностной волны. Дополнительно отметим, что термин «ползущая волна», на наш взгляд, неверно переведен и неправомерно используется во многих документах и трудах на русском языке, т. к. в данном случае волна не скользит (не ползет по поверхности) снаружи, а распространяется в нижней среде по поверхности контролируемого металла.

Некоторые соображения по «конкретным материалам из нормативно-технической и специальной литературы» из статьи по п. 1-11 (№ пунктов и литературные ссылки в статье [1]).

П.1. Я бы предложил разделить сейсмоакустику и ультразвуковую дефектоскопию металлов. Необходимо напомнить, что в УЗД применяются активные способы возбуждения и приема ультразвуковых волн с помощью направленных ультразвуковых пучков, а также то, что ультразвуковые волны с частотами 1...10 МГц не распространяются в воздухе. В сейсмоакустике, как правило, используются ненаправленные излучатели и приемники звуковых волн, которые превращаются в различные типы и виды волн при распространении в слоистых средах, и множество принятых сигналов идентифицируют и интерпретируют специальными сейсмоакустическими приборами, методами и приемниками. Также применительно к УЗД отметим, что в дифракционно-временном методе ультразвуковой дефектоскопии металлов (TOFD), который украинские авторы широко используют для отображения и интерпретации своих терминологических предложений, на рисунке из [1] на участке между излучающим и приемным излучателями в воздушном пространстве не существует никакой боковой волны (Lateral wave). Боковая волна появляется только в призме приемного излучателя на участке его соприкосновения с границей контролируемого объекта вследствие распространения продольно-поверхностной волны (creeping wave – ползучая волна).

П.2. Авторы статьи [16] не смогли правильно описать рассматриваемый процесс и волны. В п.1 они приравнивали головную и ползучую волны. Указанные волны распространяются не только «вдоль свободной поверхности», но также вдоль границы с водой. В п. 2 они пишут, что «распространение ГВ не зависит от состояния поверхности», а в действительности зависят. В п. 3 у них «боковая волна» – это только поперечная волна в контролируемой среде, но это еще и боковая продольная волна в сопредельной среде (призма искателя, или жидкость (вода)). Она позволяет принять ГВ в УЗД и используется в дифракционно-временном методе УЗД (TOFD), как часть ГВ.

П.3. ГОСТ Р ИСО 5577-2009. Термин (название) правильный, но не верно прописан. В настоящее время документ перерабатывается. Принимается новая редакция термина головная волна – комплекс волн.

П.4. Я не согласен с описанием ГВ в книге.

П.6. ГОСТ Р ИСО 5577-2017 (проект). Используется не правильный термин, не верно переведен и не верно прописан. В настоящее время проект документа перерабатывается.

П.7. ISO 22825:2012. В 2012 г. прошло сорок лет со времени обнаружения ГВ. У них в стандарте все по-своему и в данном случае с большими фактическими физическими и терминологическими ошибками. Авторы не учитывают следующих результатов исследований:

- представленное описание не соответствует полученным нами закономерностям. Термин «ползущие» неверен; волны «распространяются на глубину, равную приблизительно одной длине волны от поверхности» – источники вывода не известны и голословны, противоречат нашим исследованиям ГВ – до 15 мм. Как известно, на глубину равную одной длине волны, распространяются поверхностные волны (волны Рэлея);

- у них в описании и «головная волна», и боковая сдвиговая (поперечная) волна – одно и то же. В нашей терминологии термин «боковая сдвиговая волна» и волны характеризует одну из составляющих ГВ. Отметим, что использование авторами собственной терминологии создает большие несоответствия в стандарте и тем более в описании свойств ГВ;

- наши исследования показали, что некоторая часть энергии ГВ распространяется по и за криволинейной поверхностью, в виде продольно-поверхностной волны, а за галтелью основной поток энергии волны превращается в объемные продольные волны;

- «ползущие волны непрерывно генерируют сдвиговые волны (также называемые ГВ), что является следствием взаимодействия с поверхно-

стью». Это высказывание не корректно, т. к. образование продольно-поверхностной (ползучей) волны и генерация боковых волн в нижней и верхней средах тесно связано с условиями существования неоднородной продольно-поверхностной волны, которая в зависимости от наличия или отсутствия звукопроводящей верхней среды по-разному ослабляется с расстоянием. Боковая волна в верхней среде позволяет в условиях одностороннего доступа к контролируемому объекту зафиксировать продольно-поверхностную волну.

Авторы в [1] попытались систематизировать термины в УЗД головными волнами в РФ, Украине, в западных и международных документах и книгах. При этом они взяли за «основу определения волн» из стандарта ISO 22825:2012. Существует документ 2012 г. О его научном и техническом качестве я написал выше в «Некоторых соображениях по «конкретным материалам из нормативно-технической и специальной литературы» из статьи по п.1–11 [1], где были даны пояснения и замечания по рассмотренным источникам. Слабые призваны источники для предполагаемой революции в терминологии по УЗД головными волнами. Но других авторы не нашли и поэтому в меру сил будем работать и анализировать их.

Рассмотрим предложенную таблицу 1 [1]. Здесь впервые для себя я обнаружил, что классические продольные волны могут быть двух типов – названия расположены в двух крайних разных столбцах. Поперечные волны – тоже самое, но в среднем столбце. Не понятно, как может продольная или поперечная волны физически характеризоваться в зависимости от угла падения (пятый раздел).

Известные мне зарубежные коллеги и специалисты понимают под термином «ползучая волна» (creeping wave) неоднородную продольно-поверхностную волну, распространяющуюся (скользящую) по границе раздела в нижней среде – они так ее и рисуют на границе раздела сред. А падающая продольная волна под критическим углом – это классическая однородная продольная волна. По предложениям украинских авторов мы обсуждаем терминологию с упором на физическое соответствие, а в то же время используем термины «скользящая волна», «ползущая волна», «боковая волна», которые трудно притянуть к физике (акустике) упругих волн.

ГВ по п.8 оказались задвинуты в неопознанное пространство. Они, рожденные в УЗД в 1972 г., оказались «синонимами ползущих иностранных волн», а из других источников, которые проанализированы выше, следует, что это не ползущие волны [1]. Конечно описание этой чехарды в терминах можно, но трудно назвать анализом терминологии.

Авторы отмечают, что «нестыковки не носят принципиального характера. Физические свойства акустических волн хорошо изучены и рассматриваются в учебниках по акустике». Может быть, авторам и стоило опираться на эти учебники. Но в каком учебнике описаны в полной мере исследования акустических характеристик металлов при падении продольных (в лучевом приближении и объемном) волн под и вблизи первого и третьего критического углов? Таких авторы не нашли и решили создать и представить свою новую теорию и терминологию по УЗК металлов ГВ, ограничившись и заменив их на одну-две боковые волны, входящих в комплекс «головная волна».

Относительно п.8 [1], чтобы исключить «смысловую путаницу» и «недостаточное понимание различий в природе волн», позволю коллегам напомнить, что термин «головная волна» в УЗД – это комплекс волн, распространяющихся от излучателя через контролируемый металл до приемника. В этот комплекс последовательно входят этапы излучения и возбуждения волн от падающей волны (рис. 8):

Этап излучения:

1. падающая классическая продольная (растяжения-сжатия) волна, исходящая от направленного под первым критическим углом к границе сред излучателя.

Этап возбуждения волн от падающей волны:

2. отраженная классическая продольная (растяжения-сжатия) волна, исходящая от границы раздела под первым критическим углом (в верхней среде);

3. отраженная трансформированная под четвертым критическим углом (новый термин) классическая поперечная волна (в верхней среде);

4. неоднородная продольно-поверхностная волна с углом ввода 90° , распространяющаяся в нижней среде по границе раздела со скоростью продольной волны;

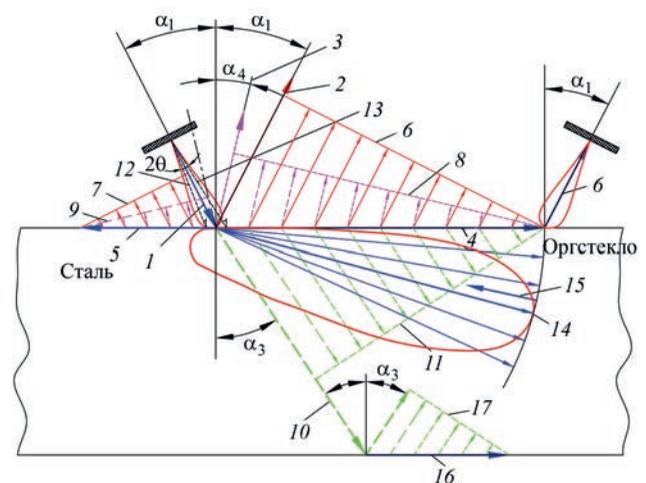


Рис. 8. Образование волн на границах раздела и вблизи них при критических и околочитических углах

5. обратная неоднородная продольно-поверхностная волна с углом ввода -90° , распространяющаяся в нижней среде по границе раздела со скоростью продольной волны;

6. боковая продольная волна, отходящая в верхней среде от границы под первым критическим углом, связанная с распространением волны 4 (фронт волны связан с фронтом волн 2 и 4);

7. обратная боковая продольная волна, отходящая в верхней среде от точки падения на границе под первым критическим углом, связанная с распространением волны 5;

8. боковая поперечная волна, отходящая в верхней среде от границы под четвертым критическим углом, связанная с распространением волны 4 (фронт волны связан с фронтом волн 3 и 4);

9. обратная трансформированная боковая поперечная волна, отходящая в верхней среде от точки падения на границе под четвертым критическим углом, связанная с распространением волны 5;

10. трансформированная поперечная волна в нижней среде с углом ввода, равным третьему критическому углу;

11. боковая поперечная волна, отходящая в нижней среде от границы под третьим критическим углом, связанная с распространением волны 4.

Выше описаны волны, изучаемые и возбуждаемые в лучевом приближении. В реальной УЗД используются искатели с пьезоэлементами, излучающими пучок продольных волн, акустическая ось которого ориентирована под первым критическим углом к границе раздела сред и имеет диаграмму направленности с углом раскрытия 2θ .

В связи с этим на этапе излучения на границу также падают:

12. продольные волны с углами падения меньше первого критического угла;

13. продольные волны с углами падения больше первого критического угла.

На этапе возбуждения:

– продольные волны 12 с углами падения меньше первого критического угла ($\alpha_1 - \theta$) образуют в нижней среде поле продольной подповерхностной волны 14 (в обратном направлении при эхо-методе волна 15);

– продольные волны 13 с углами падения больше первого критического угла до $(\alpha_1 + \theta)$ образуют неоднородные продольно-поверхностные волны, с которыми связан эффект незеркального отражения.

Этап приема.

Изученный и прошедший через контролируемую зону импульс продольной волны 1, неоднородной продольно-поверхностной волны 4, приходит в виде боковой продольной волны 6 на пьезоэлемент приемника (в призме, в воде), рас-

положенный под первым критическим углом к границе раздела (рис. 8), и фиксируется. Этот комплекс волн в лучевом приближении было предложено называть «головной волной». Если мы используем пучок ультразвуковых волн реального искателя, то головная волна складывается из волн $(1+12) + (4+14) + (6+15)$ (рис. 8) соответственно на этапах излучения, возбуждения, прохождения и приема импульсов.

Эти ГВ используются в УЗД металлов эхо-, теневым, зеркально-теневым и дифракционно-временным (ДВМ) методами. Из [13] известно множество головных волн. Большинство их них на конечном этапе принимаются и фиксируются по боковой волне. Для УЗД металлов мы в 1970-е годы предложили использовать только ГВ, фиксируемые по боковой продольной волне в верхней среде. Понятно, что и в дефектоскопии возможна фиксация множества других ГВ, связанных с распространением других сопутствующих и распространяющихся в верхней и нижней среде волн. Методы их распознавания и идентификации разработаны в сейсмоакустике и используются в сейсморазведке. Описание некоторых из этих ГВ представлено в [13] и [3].

В УЗД металлов мы предложили и исследовали применение ГВ именно того типа, что описан выше. В том числе, он реализуется в ДВМ (TOFD). Его важнейшим физическим и технологическим фактором является минимальное время, затрачиваемое волной на прохождение от излучателя до приемника. Импульс приходит и фиксируется первым, является главным в технологии УЗД и его предложено, как и в другой близкой к нам науке – сейсмоакустике, называть головным, а волны – головными волнами.

В связи с изложенным, будет полезно рассмотреть несколько существенных физических моментов.

Выше показана исходящая от границы раздела боковая поперечная волна в верхней среде, также связанная с условием существования неоднородной продольно-поверхностной волны на границе раздела и распространяющаяся (и несущая упругое сдвиговое возмущение в верхней среде) под соответствующим (определяемым по уравнению Снеллиуса) углом. В связи с нашими нынешними научными изысканиями этот угол, по-видимому, следует назвать четвертым критическим углом. Все критические углы связаны с возбуждением и распространением неоднородных волн: 1-й, 3-й и 4-й – с продольно-поверхностной волной, 2-й – с неоднородной поперечной волной – поверхностной волной (волной Рэлея.)

Ещё раз обратим особое внимание на процессы возбуждения и распространения волн при кри-

тических углах (рис. 7). На графиках в первом критическом угле мы имели «полное внутренне отражение» и нулевой коэффициенты прохождения и отражения. Но падающая энергия не может исчезнуть. Эта энергия идет на образование продольно-поверхностной волны и боковых волн, которые излучаются в приграничные среды. Эксперименты показали малую интенсивность этих волн. Они распространяются вдоль границы двух сред на незначительные расстояния, но они существуют.

Через несколько углов имеет место мощнейший скачок в коэффициенте прохождения трансформированной поперечной волны на углах падения $29...30^\circ$. Особенно интересен этот феномен при ультразвуковом контроле пучком волн с диаграммой направленности, включающий эти углы и первый критический.

Несомненно, значения этих коэффициентов связаны с условиями трансформации продольных волн в поперечные. Решения и результаты на первом и втором критических углах качественно существенно разные. При первом критическом угле падения продольной волны (в лучевом приближении) в нижней среде исчезает продольная волна, но существует неоднородная продольно-поверхностная и подповерхностная волны. При этом вторая как бы подпитывает первую, которая быстрее ослабляется, вследствие возбуждения боковых волн в верхней и нижней средах. Продольно-поверхностная волна не демпфируется (не прощупываются пальцем) на границе раздела сред (на контактной поверхности). Но зато прекрасно прощупывается пальцем на торцевой поверхности, перпендикулярной к контактной и к направлению распространения ультразвука, на небольшом расстоянии ($3...7$ мм) от контактной поверхности. Этот эффект используется во всех методах УЗК ГВ при обучении контролеров и для идентификации ГВ.

Волна растяжения-сжатия (колебания частиц металла в ней происходит вдоль контактной поверхности) входит в палец (как в воду), что приводит к уменьшению амплитуды сигнала. Прикосновение к контактной поверхности при распространении продольно-поверхностной волны, когда частицы металла колеблются вдоль границы, не приводит к изменению амплитуды эхо-сигнала. Это также подтверждает факт отсутствия нормальной составляющей колебаний к контактной поверхности в продольно-поверхностной волне.

При втором критическом угле падения продольной волны (в лучевом приближении) в нижней среде исчезает поперечная волна, но образуется неоднородная поперечная волна в виде

поверхностной волны. Считается [20], что частицы в волне колеблются по эллипсу, а волна является суперпозицией продольной и поперечной волн. В поверхностной волне имеется мощная составляющая колебаний частиц металла, которые происходят также, как в поперечной волне – перпендикулярно направлению распространения волны. И они демпфируются при прикосновении пальцев к поверхности – амплитуда сигнала заметно уменьшается. Это эффект используется в УЗД поверхностными волнами для идентификации волны и для определения координат отражателей.

О волнах на донной поверхности. Исходящая от границы раздела боковая поперечная волна в нижней среде, связанная с неоднородной продольно-поверхностной волной на границе раздела сред, и распространяющаяся (и несущая сдвиговое упругое возмущение в нижней среде) под третьим критическим углом при падении на донную поверхность возбуждает (рис. 8):

16. неоднородную продольно-поверхностную волну на границе, аналогичную волне 4;

17. волна 16 в каждой точке границы возбуждает боковую поперечную волну, распространяющуюся в металле под третьим критическим углом к границе.

Именно волны 16 и 17 объясняют причины наличия несоответствия между амплитудами фиксируемых сигналов и размерами зарубок в задаче Райхмана. Они же являются причиной возникновения множества сопутствующих импульсов с большим временем распространения, в сравнении с головной волной. Эти импульсы можно использовать для обеспечения более надежного обнаружения дефектов в сварных соединениях малых (до $6...8$ мм) и средних толщин ($8...20$ мм). В сейсмоакустике они используются и называются головными волнами 2, 3 и т. д.

Все эти волны представлены на рис. 3. Соответственно, в воде отсутствует боковая поперечная волна, а в воздухе отсутствуют боковые продольная и поперечная волны. Считаю, что представленные здесь определения (названия) волн, составляющих понятие «головная волна», полностью соответствует физическим характеристикам волн: направления колебаний в волне, направления распространения волн и скорость распространения волн. На мой взгляд, если мы рассматриваем физические процессы распространения волн, в данном случае вблизи границы двух сред, то должны охарактеризовать каждую составляющую волну или волны в каждой среде. Это дает более полное понимание физики процесса и позволяет более точно интерпретиро-

вать имеющиеся первичные и вторичные принятые импульсы.

Смысловое содержание термина «головная волна» в ультразвуковой дефектоскопии металлов, в том числе в ДВМ, в наилучшей степени характеризует её, поскольку именно ГВ (комплекс волн) первой фиксируется приемником, а принятый импульс затрачивает минимальное время на прохождение от излучателя через изделие до приемника и поэтому его называют главным или головным. Из этого смыслового содержания и пошло название головной волны сначала в сейсмоакустике, а затем и в ультразвуковой дефектоскопии металлов.

Интерпретация импульсов ГВ в УЗД металла по минимальному времени распространения оказалась важнейшей технологической (методической) характеристикой, как при обнаружении и интерпретации ГВ в 1972 г. при исследовании акустических характеристик металлов для оборудования и трубопроводов первого контура АЭС с ВВЭР-1000 зеркально-теневым методом наклонными искателями, так и при контроле эхо-методом сварных соединений, аустенитных наплавов и основного металла.

Сейчас некоторые исследователи пытаются доказать, что какой-то западный разработчик ДВМ (TOFD) первым предложил использовать головную (боковую продольную волну) для слежения за акустическими характеристиками в процессе контроля. Посмотрим еще раз на способ УЗК по А.С. № 502311 [6]. Он состоит в том, что в призме искателя возбуждают УЗ колебания, вводят их в контролируемую зону, принимают прошедшие через неё колебания и по их параметрам, с учетом состояния акустического контакта искателя с материалом, определяют дефектность материала, отличающийся тем, что с целью повышения качества дефектоскопии об акустическом контакте судят по параметрам продольно-поверхностной волны возбужденной в материале искателем (рис. 9, а).

Здесь представлено описание и говорится об использовании нами продольно-поверхностных, объемных и боковых волн, возбуждаемых одним пьезоэлементом с широкой диаграммой направленности, при УЗК зеркально-теневым методом. Непредвзятый исследователь может убедиться в идентичности методов контроля и использовании в нем головных и/или боковых волн. В настоящее время технология ДВМ базируется на сигнале головной (боковой) волны – первом импульсе, пришедшем от излучателя к приемнику через контролируемый объект

Но все же, в п. 4 [1] авторы признают и указывают, что иностранные термины головной, ползучей и боковой волн не могут быть признаны соответствующими термину «головная волна» в УЗК металлов. Но также все эти термины не соответствуют стан-

дарту на «Сейсморазведку», который они напрямую притягивают вновь и вновь к УЗД металлов.

Можно согласиться с ними, что при гармонизации международных стандартов с новыми украинскими, а в РФ с российскими, возникает много трудностей. Но посмотрим назад и увидим, как наши зарубежные коллеги, часто к сожалению низкой квалификации (что показано выше), вводили новую терминологию в свои стандарты по УЗД и не стеснялись в выборе своих терминов волн, без оглядки на наши исследования, прове-

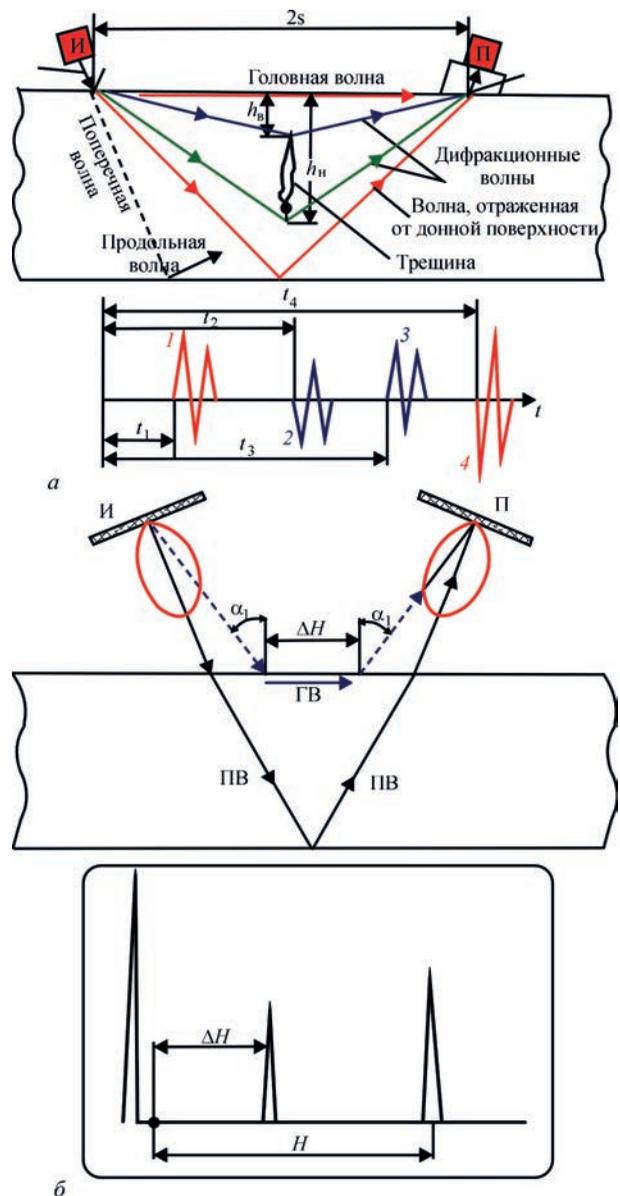


Рис. 9. Сравнение дифракционно-временного метода (ДВМ = TOFD) (а) и безгалванного способа (б) УЗ толщинометрии а: h_0 – глубина залегания верхней кромки трещины; h_1 – глубина залегания нижней кромки трещины; $2S$ – расстояние между излучателем и приемником; A – амплитуда волны; t_1 – время прихода ГВ; t_2 – время прихода волны, дифрагированной на верхней кромке трещины; t_3 – время прихода волны, дифрагированной на нижней кромке трещины; t_4 – время прихода волны, отраженной от внутренней поверхности б: ΔH – расстояние, проходимое ГВ в изделии; H – расстояние, проходимое продольной волной (ПВ) в изделии

денные раньше, на предложенную и используемую терминологию.

Сейчас идет гармонизация стандартов. В Украине и в РФ озаботились используемой терминологией, предлагаемой нам стандартами ISO и EN и вопросом, до какой степени мы должны или можем подняться или опуститься в уже разработанных стандартах.

О тексте и терминах стандартов на ультразвуковой контроль, где в методическом плане СССР был всегда на переднем плане, а в части ГВ в 1970–1980 гг. был далеко впереди, мы можем много дискутировать и спорить. Но пойти на упрощенное описание физических особенностей и закономерностей, когда исчезает полная картина используемых и рассматриваемых волн, в тесной связи с используемой и уже сложившейся терминологией в СССР, в РФ и в Украине, будет безусловно неправильно.

В разделе 5 [1] авторы при обсуждении характеристики головной волны – минимального времени распространения импульса, вновь предлагают использовать термин «боковая волна», а не «головная». При этом они весьма некорректно упоминают об ультразвуковой толщинометрии металлов прямыми преобразователями контактными искателями и сравнивают первый донный импульс («продольные волны... всегда вызывают первый сигнал на А-скане») на толщиномере и первый импульс ГВ при УЗД ГВ. Опыт УЗК и ультразвуковой толщинометрии на заводах и при эксплуатации различного оборудования, трубопроводов, элементов показал следующее.

Во-первых, первый импульс на толщиномере не обязательно бывает донным. В контролируемом изделии бывают расслоения и тогда отраженный от него импульс будет первым на А-скане или экране дефектоскопа (на толщиномере может не быть экрана). Но это не ГВ, и этот импульс с информацией о глубине залегания расслоения приходит на экран цифрового толщиномера, что может привести к неверным результатам контроля толщины и неправильной оценке качества.

Во-вторых, еще в 1970-е годы для проведения безэталонной ультразвуковой толщинометрии раздельно-совмещенными контактными преобразователями сначала в СССР в МНПО «Спектр» В. Королевым был разработан и запатентован специализированный толщиномер (рис. 9, б), который использовал дополнительную схему прозвучивания головной волной по [6] для эталонирования скорости распространения продольной волны непосредственно на контролируемом объекте. Затем патент у них приобрела фирма «Крауткремер», разработала и выпустила аналогичный толщиномер. Но приборы не нашли широкого применения.

Практика показала, что стандартная технология толщинометрии с настройкой толщиномера на образце из того же материала, что и контролируемое изделие, более проста, надежна и дешевле.

У нас в УЗД металлов никакой путаницы на сегодняшний день не имеется. Пока путаница имеется только в наших статьях и в разрабатываемых или редактируемых стандартах, пришедших из ISO или EN. Есть предложение украинских коллег отодвинуть термин «головные волны» на задворки УЗД, так как им он не нравится из-за наличия стандарта «Сейсморазведка» 1991 г., а также стандартов ISO или EN, в которых им нравятся слова «ползущие» («ползучие»), «скользящие» и «вытекающие» волны.

Я считаю, что позиция «нравиться – не нравится» может иметь место, но так как мы работаем в УЗД металлов и в большинстве случаев, в отличие от сейсморазведки, на однородных по структуре металлах, нужно также иметь понятия и учитывать физические и технологические закономерности и особенности ультразвуковой дефектоскопии металлов. Для того, чтобы специалисты уверенно и грамотно могли использовать терминологию, представленную в статьях, в стандартах и книгах и одинаково трактовать ее, с полным пониманием физических процессов решать задачи подобные задачам Райхмана и Гурвича, а они систематически встречаются в практическом контроле объемными и головными волнами, поддерживаю предложение авторов статьи не искать «... легких путей и не ограничиваться примитивными моделями» в особенности «...при работе с методом головных волн».

Будет совсем неплохо, если мы и про приоритет не будем забывать. Ведь многие методики УЗК головными волнами я имел честь разрабатывать, испытывать и использовать вместе с моими украинскими коллегами: Запорожская АЭС – В.Л. Санжаровский и Е.Е. Гефсиманский, Южно-Украинская АЭС – И.В. Малахов и А.Н. Паллий, Хмельницкая АЭС – Ю.М. Копылов и Н.П. Марокко, Чернобыльская АЭС – О.Я. Зинченко и В.Л. Зинченко, Ровенская АЭС – В.П. Кравец и Г.М. Ямпольский и другими уважаемыми коллегами, которых прошу не обижаться, если они здесь не упомянуты. Наш опыт и знания должны быть основой при использовании старых терминов, выработке и принятии новых терминов в ультразвуковой дефектоскопии металлов.

И это уже происходит. Достаточно посмотреть в труды ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ «Основные направления работ Отдела неразрушающих методов контроля качества сварных соединений» под редакцией проф. В.А. Троицкого, Киев, 2019 г. [22]. В них на стр. 19, а также на стр. 89-100 в [23]

используются предложенные АО «НПО «ЦНИИТ-МАШ» и ранее принятые к использованию в обществе неразрушающего контроля в СССР, РФ, Украины, Болгарии и др. стран термины по УЗК металлов головными волнами.

Список литературы

1. Е.А. Давыдов, Дядин В.П., Шекеро А.Л. (2018) О терминологических особенностях в обозначении ультразвуковых волн, образующихся при первом критическом угле. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **3**, 1–12.
2. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. (1974) О выявлении подповерхностных дефектов ультразвуковым методом. *Труды VII Всесоюзной конференции «Неразрушающий контроль материалов изделий...»*, Киев.
3. Разыграев Н.П. (1979) *Экспериментальные исследования продольных подповерхностных волн и применение их для обнаружения подповерхностных дефектов в деталях энергетических установок*. Дис. ... канд. тех. наук. Москва, ЦНИИТМАШ.
4. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. (1975) *Отчет НИР «Исследование боковых ультразвуковых волн, с целью определения возможности контроля подповерхностного слоя деталей энергетических машин (поисковая)»* Т-76. Москва, ЦНИИТМАШ.
5. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. (1975) *Способ ультразвукового контроля качества материалов*. А. с. № 491092 от 01.06.73. Бюл. изобр. № 41.
6. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. (1976) *Способ ультразвуковой дефектоскопии материалов*. А. с. № 502311 от 28.12.73. Бюл. изобр. № 5.
7. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. (1977) *Способ ультразвукового контроля качества материалов*. А. с. № 565249 от 20.05.74. Бюл. изобр. № 26.
8. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. (1978) *Использование волн головного типа для ультразвукового контроля*. *Дефектоскопия*. изд. АН СССР, **1**.
9. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. (1979) *Исследование ослабления ультразвуковых головных волн с расстоянием*. *Там же*, **1**.
10. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. (1978) *Исследование процесса формирования акустического поля головной волны в контролируемой среде*. *Там же*, **11**.
11. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н. (1981) *Искатели для контроля приповерхностного слоя головными волнами*. *Там же*, **1**, 53–62.
12. Разыграев Н.П. (1981) *О выявлении подповерхностных дефектов искателями головных волн ИЦ-61, ИЦ-70*. *Там же*, **3**, 97–105.
13. Бреховских Л.М. (1957) *Волны в слоистых средах*. Москва, Наука.
14. Ермолов И.Н. (1966) *Методы ультразвуковой дефектоскопии*. Курс лекций. Ч.1. Москва, Горный институт.
15. Юозонене Л.В. (1980) *Упругие поверхностно-продольные волны и их применение для неразрушающего контроля*. *Дефектоскопия*, **8**, 29–38.
16. Ланге Ю.В., Воронков В.А. (2003) *Контроль неразрушающей акустической. Термины и определения*. Справочник. Москва.
17. ГОСТ 16821-91. *Сейсмозащита. Термины и определения*.
18. Вюстенберг Х., Эрхард А., Мёхрле В. (1981) *Способ и устройство для неразрушающего контроля приповерхностного слоя*. Патент ФРГ № 2802278 от 15.01.81.
19. Erhard, A., Kroning, V. (1984) *Erzeugung, Ausbreitung und Anwendung von Ultraschall-Kriechwellen. Materialprüfung 26/1984 № 9*, September. VDI-Verlag GmbH, 323–326.
20. (1986) Крауткремер «*Ультразвуковая дефектоскопия материалов*» Берлин, Хейдельберг, Нью-Йорк, Лондон, Париж, Токио (нем. и англ.).
21. Викторов И.А. (1966) *Физические основы применения ультразвуковых волн Рэля и Лэмба в технике*. Москва, Наука.
22. (2019) «*Основные направления работ Отдела неразрушающих методов контроля качества сварных соединений*» под ред. проф. В.А. Троицкого. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 19, 89–100.
23. Троицкий В.А., Шекеро А.Л., Давыдов Е. и др. (2019) *Технология оценки размеров несплошностей в сварных соединениях с применением дифрагированных волн*. Киев, ИЭС им. Патона НАНУ, 89–100.

Поступила в редакцию 24.03.2020

НОВАЯ КНИГА

Эпизоды жизни и творчества, перспективы развития сварочной техники и дефектоскопии: монография / Троицкий В.А.; Киев: Интерсервис, 2020 – 252 с.

Мемуарное произведение, посвященное становлению и развитию в Украине дефектоскопии, регулируемых источников питания для различных технологических процессов. Описаны креативные электротехнические и дефектоскопические идеи, разработка и реализация которых повысит качество сварных соединений, обеспечит объективность мониторинга ответственных промышленных объектов. Освещена деятельность Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики (УО НКТД), становление Международной Академии неразрушающего контроля (ANDTI), деятельность Европейской Федерации неразрушающего контроля (EFNDT), Международного комитета неразрушающего контроля (ICNDT) и Международного комитета по стандартизации (ISO TC-135), ответственных за развитие в области неразрушающего контроля и мониторинга технического состояния ответственных объектов.

Показан приоритет Украины в решении многих проблем в дефектоскопии, в создании автоматизированных систем неразрушающего контроля качества в трубосварочном производстве, средств для мониторинга технического состояния различных металлоконструкций.

Книга будет интересна дефектоскопистам и электротехникам, занимающимся сварочной техникой, аспирантам и преподавателям, специалистам по историографии сварочной и дефектоскопической техники.

Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала.



Підписано до друку 14.07.2020. Формат 60×84/8.
 Офсетний друк. Ум. друк. арк. 8.37.
 Друк ТОВ «ДІА».
 03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.