

ФИЗИКА, ТЕРМИНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ГОЛОВНЫМИ ВОЛНАМИ¹

© 2020 г. Н.П. Разыграев^{1,*}

¹АО «НПО «ЦНИИТМАШ», Россия 109088 Москва, ул. Шарикоподшипниковская, 4

*E-mail: NPRazygraev@cniitmash.com

Поступила в редакцию 25.06.2020; после доработки 08.07.2020

Принята к публикации 10.07.2020

Целью данной работы является исследование, дополнительная проработка и анализ физики, истории и терминологии в ультразвуковой дефектоскопии металлов головными волнами.

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

DOI: 10.31857/S0130308220090018

ВВЕДЕНИЕ

В начале 2019 г. в подкомитет ПК 3 «Ультразвуковой контроль» ТК 371 для разработки поступили новые стандарты, в том числе предполагаемая редакция стандарта ГОСТ Р 5577 (ISO 5577—2017) «Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль. Словарь». Стандарт устанавливает термины по ультразвуковому методу неразрушающего контроля и в дальнейшем может составить общую основу для стандартов России и общего использования.

Международный стандарт разработан Европейским Комитетом по Стандартизации (CEN) Техническим Комитетом CEN/TC 138 «Неразрушающий контроль» в сотрудничестве с Техническим Комитетом ISO/TC 135 «Неразрушающий контроль», подкомитетом SC 3 «Ультразвуковой контроль».

В стандарте не впервые предложены специфические термины по УЗК металлов головными волнами, которые находятся в некотором несоответствии с терминологией предложенной в СССР в 1970—80 гг. и используемой в России.

Примерно в это же время в украинском журнале «Техническая диагностика и неразрушающей контроль» опубликована статья «О терминологических особенностях в обозначении ультразвуковых волн, образующихся при первом критическом угле» [1]. В ней авторы рассматривают имеющееся широкое многообразие терминов при отображении и применении головных волн (ГВ) в УЗ дефектоскопии металлов и в сейсмоакустике двухслойных и многослойных сред.

Одновременно следует отметить, что в последние годы в статьях и в выступлениях имели место систематические обсуждения по терминологии акустического тракта ультразвукового контроля головными волнами. Много лет посвятив исследованиям головных волн и развитию технологий на основе их использования, по договоренности с председателем подкомитета проф., д.т.н. Г.Я. Дымкиным, специалисты ЦНИИТМАШ приняли на себя проработку новой редакции стандарта, а мною подготовлена настоящая статья.

НАЧАЛО И ПРЕД ИСТОРИЯ УЗК МЕТАЛЛОВ ГОЛОВНЫМИ ВОЛНАМИ

Украинская публикация особенно интересна и важна в связи с тем, что в 2022 г. исполняется 50 лет со времени пришествия в ультразвуковую дефектоскопию металлов головных волн.

В 1972 г. в лаборатории ультразвуковых методов исследования металлов (ЛУЗМИМ) ЦНИИТМАШ проводились исследования акустических характеристик сталей оборудования и трубопроводов АЭС с ВВЭР-1000. В процессе экспериментальных исследований впервые в ультразвуковой дефектоскопии металлов были обнаружены и зафиксированы на экране ультразвукового дефектоскопа USIP-10 фирмы Крауткремер, имеющем динамический диапазон экрана 36 дБ (это оказалось весьма важным в экспериментальных исследованиях), неизвестные ранее сигналы очень быстрой волны — они раньше всех других импульсов приходили на приемник и были примерно на два порядка слабее объемных продольной и поперечной волн. Н.П. Разыграев совместно

¹Статья является дискуссионной. Редакция имеет право не соглашаться с мнением авторов.

с И.Н. Ермоловым достоверно интерпретировали эту волну — как **аналог головных волн** в сейсмоакустике, доказали возможность использования их для выявления при- и подповерхностных дефектов в металле и доложили об этом в 1974 г. в Киеве на Всесоюзной конференции по неразрушающему контролю [2].

На основании исследований головных (в том числе **боковых**) волн, разработок новых способов и технологий УЗК, внедрения этих разработок на предприятиях и в организациях СССР и других стран Н.П. Разыграев под научным руководством проф., д.т.н. И.Н. Ермолова подготовил и защитил в 1979 г. диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Экспериментальные исследования продольных подповерхностных волн и применение их для обнаружения подповерхностных дефектов в деталях энергетических установок» [3]. Все результаты исследований были опубликованы до и после защиты диссертации.

Ниже представлены результаты исследований ЦНИИТМАШ, обсуждаются первичные термины, предложены термины и их определения в ГОСТ Р—ISO.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ФИЗИКА ГОЛОВНОЙ ВОЛНЫ

Выполненные в ЦНИИТМАШ в 1973—75 гг. в рамках научно-исследовательской работы Т-76: «Исследование боковых ультразвуковых волн, с целью определения возможности контроля подповерхностного слоя деталей энергетических машин (поисковая)» [4] оригинальные пионерские исследования возбуждения, распространения и приема головных волн в металле показали возможность использования их для обнаружения дефектов в при- и подповерхностном слое глубиной 1—15 мм. На основе использования головных волн были разработаны новые способы ультразвукового контроля качества материалов, защищенные авторскими свидетельствами [5, 6, 7].

В процессе экспериментально-теоретических исследований 1972—79 гг. акустических волн головного типа было установлено, что:

1. Оптимальным углом возбуждения и приема головных волн является первый критический угол α_1 (для границы оргстекло—сталь $\alpha_1 \approx 27,5^\circ$) [8].

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

3. Акустическое поле головной волны 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].

4. Для возбуждения и регистрации головных волн наиболее удобны призматические излучатели; при контроле эхометодом раздельно-совмещенные излучатели с обязательным разделением функций излучателя и приемника [11]. Разработаны конструкции двух типов излучателей для контроля подповерхностного слоя:

4.1. Излучатели типа ИЦ-61(-91) осуществляют схему «тандем» (излучатель и приемник расположены один за другим по отношению к отражателю), позволяют проводить ультразвуковой контроль на расстоянии 5—70 мм от излучателя и обеспечивают обнаружение дефектов с отношением сигнал/шум не менее 10 дБ.

4.2. Излучатели 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.

5. Исследование выявляемости подповерхностных дефектов головными волнами показало, что: амплитуда эхосигнала от дефекта пропорциональна площади отражающей поверхности; зависимость амплитуды эхосигнала от расстояния изменяется по сложному закону [12].

На основании проведенных исследований возбуждения, распространения и приема головных волн в 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

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГОЛОВНОЙ ВОЛНЫ

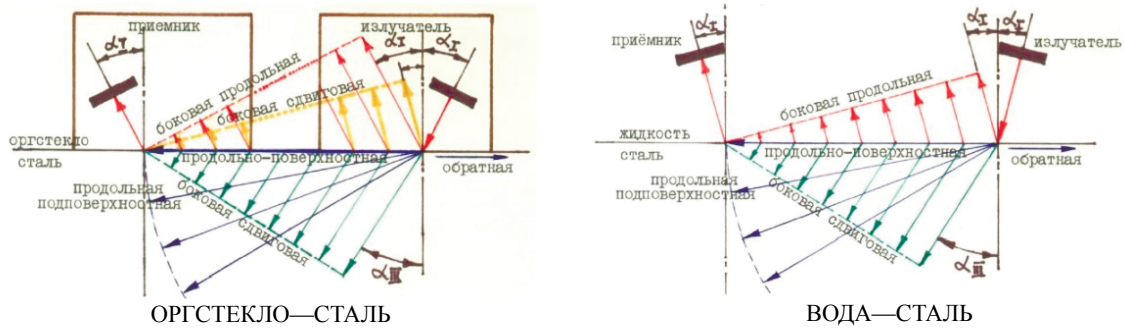


Рис. 1. Возбуждение, распространение головной волны вдоль границы раздела и прием.

контактным способом граничные условия более сложны и различны для участка, где расположена призма искателя, 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. Поверхностная волна, как известно, является комбинацией продольной и поперечной волн, распространяющихся вдоль поверхности с одинаковой скоростью поверхностной волны, которая несколько меньше скорости поперечной волны.

В нашем 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 искателя — контактного или иммерсионного. В случае иммерсионного режима контроля боковая волна в жидкости возбуждается в каждой точке границы. При контроле контактным способом напряжения на границе 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:

$$\sin \alpha_1 = C_{\text{орг}} / C_{\text{ст}},$$

где $C_{\text{орг}}$ — скорость продольной волны в оргстекле; $C_{\text{ст}}$ — скорость продольной волны в стали.

Для границы оргстекло—сталь первый критический угол примерно равен $27,5^\circ$. Такой угол падения имеют призмы излучателя и приемника головных волн.

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:

$$\sin \beta_t = C_{\text{орг}} / C_{\text{ст}},$$

где $C_{\text{орг}}$ — скорость поперечной волны в оргстекле.

ИССЛЕДОВАНИЯ ГОЛОВНЫХ ВОЛН

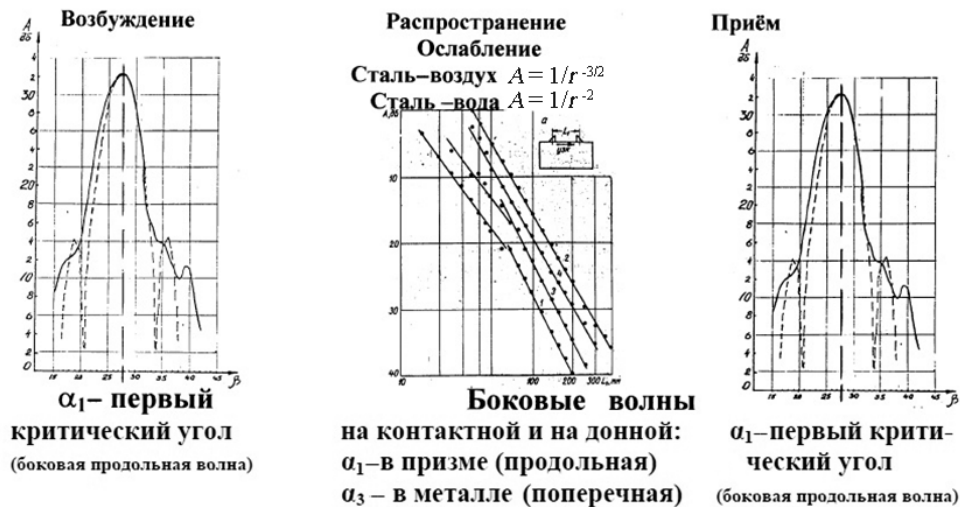


Рис. 2. Возбуждение (слева) и прием (справа) головной волны при различных углах и ослабление головной волны с расстоянием (в центре).

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 поперечной волны и нормалью к границе раздела также определяется законом Снеллиуса и называется **третьим критическим углом**:

$$\sin \beta_3 = C_{\text{лст}} / C_{\text{лст}}$$

где $C_{\text{лст}}$ — скорость поперечной волны в стали.

При падении поперечной волны на границу сталь—воздух под третьим критическим углом ($\beta_3 \approx 33^\circ$) на противоположную (донную) поверхность на ней в строгом соответствии с законом Снеллиуса образуется неоднородная продольно-поверхностная волна (рис. 3) и сопутствующие ей боковые (продольные и поперечные) волны по обеим сторонам от границы раздела сред.

ПОЛЕ ГОЛОВНОЙ ВОЛНЫ В КОНТРОЛИРУЕМОЙ СРЕДЕ

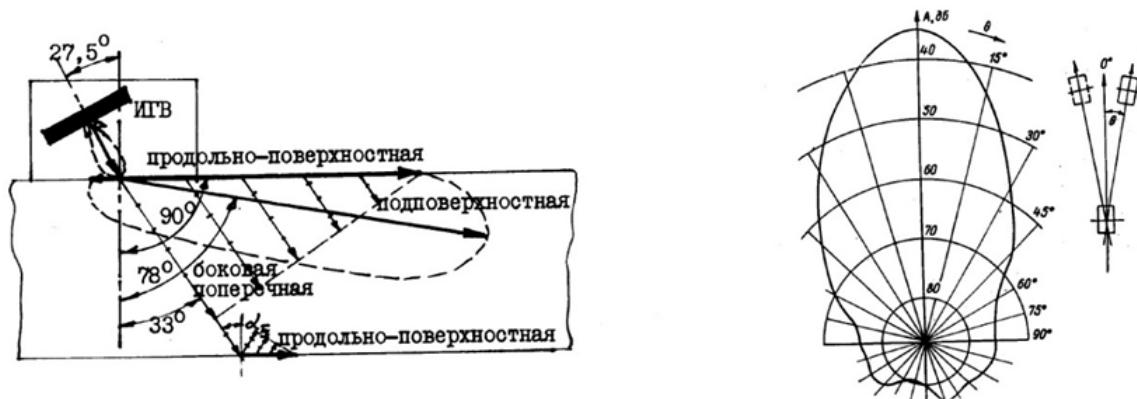


Рис. 3. Падение боковой поперечной волны на донную поверхность и образование волн на ней.

Если контролю подвергается изделие с плоскопараллельными поверхностями, то на донную поверхность, благодаря образованию боковой поперечной волны в каждой точке контактной поверхности, начиная от точки выхода излучателя (и точки ввода на контактной поверхности) и ее распространению под третьим критическим углом, падают поперечные волны (см. 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]. В сейсмоакустике параметры импульсов этих головных волн 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 свободной поверхности образуется лишь боковая поперечная волна в стали (боковая продольная волна в воздухе ничтожно мала и не отводит энергию в воздух), ослабление продольно-поверхностной волны пропорционально $r^{-1,75}$, т.е. происходит медленнее, чем в иммерсионном режиме (см. рис. 2).

Рассмотренная на рис. 1 картина распространения головной волны 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 искателем акустическое поле излучающего пьезоэлемента имеет не плоскую форму, а представляется в виде пучка с определенной диаграммой 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 1-го критического, преломляются на границе раздела, участвуют в формировании и образуют в нижней среде поле **продольной подповерхностной волны** со сферическим фронтом, начало которого совпадает с фронтом продольно-поверхностной волны (см. рис. 3). Значения амплитуд по сферическому фронту продольной волны связаны с амплитудой волны в направлении преломленного луча, которая качественно определяется суперпозицией соответствующего значения из диаграммы направленности на коэффициент прохождения по амплитуде (энергии).

Продольная подповерхностная волна неразрывно связана с неоднородной продольно-поверхностной волной. Она подпитывает ее и в связи с этим вблизи поверхности поле объемной продольной подповерхностной волны имеет энергетический минимум. Этот эффект особенно проявляется в описании задачи Гурвича (будет ниже), когда продольная волна прямого искателя распространяется вдоль вертикальной плоской несплошности. На плоских берегах несплошности образуются продольно-поверхностные и боковые поперечные волны и отводят энергию в стороны от оси диаграммы направленности. Акустическое поле (диаграмма направленности) продольной волны раздваивается, а амплитуда донного сигнала существенно уменьшается.

Исследования подтвердили, что нулевое значение напряжений продольной подповерхностной 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°) (см. рис. 3). При дефектоскопии волна не чувствительна к неровностям поверхности и реагирует лишь на дефекты отходящие от поверхности внутрь изделия и подповерхностные дефекты. В связи с этим волну предложено называть **подповерхностной волной**.

Ослабление амплитуды продольной подповерхностной волны вдоль любого луча с углом ввода менее луча с максимальной амплитудой происходит как в обычной продольной волне, т.е. пропорционально r^{-1} . Для других углов ввода эта закономерность требует дополнительного исследования.

При контроле изделий с сопряжениями (рис. 4) условия распространения головной волны несколько изменяются. Когда фронт продольно-поверхностной и продольной подповерхностной волн достигает сопряжения детали, продольно-поверхностная волна частично перерождается в объемную продольную волну, а частично распространяется с весьма малой амплитудой вдоль

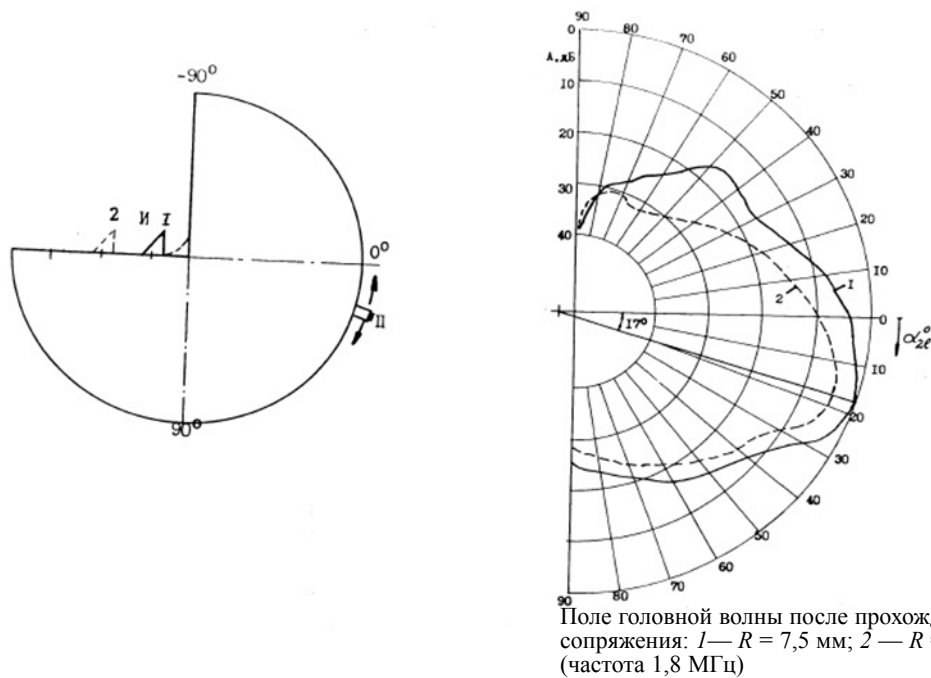


Рис. 4. Акустическое поле головной волны за сопряжением контролируемой детали.

линии сопряжения. Продольная подповерхностная волна минует (и частично огибает в результате дифракции) сопряжение и распространяется вдоль воображаемой линии контактной поверхности.

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

Такой же эффект усиления головной волны имеет место при распространении продольной подповерхностной 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 связи с этим амплитуда эхосигналов от дефектов одних и тех же размеров, расположенных под резьбой, больше, чем от аналогичных отражателей (поверхностных и подповерхностных дефектов) под гладкой поверхностью.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГОЛОВНОЙ ВОЛНЫ ПОД РЕЗЬБОЙ

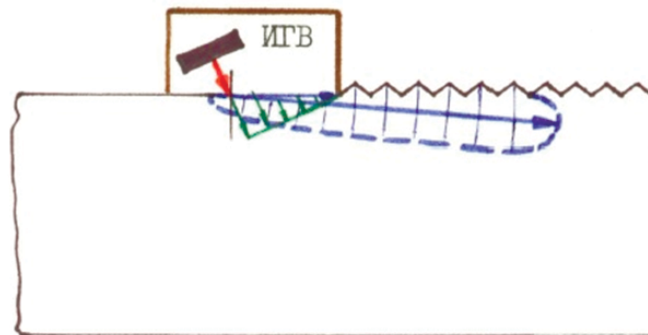


Рис. 5. Распространение головной волны под резьбой.

Будем учитывать 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;

а также то, что продольные волны распространяются с максимальной скоростью звука и первыми приходят на приемник.

В результате **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 **головной волны** распространяются с максимальной скоростью и первыми достигают приемника, что во многих случаях весьма благоприятствует интерпретации сигналов, расшифровке результатов контроля и повышает эффективность технологии УЗК головными волнами.

Применение физического представления о головной волне позволило найти объяснение, а затем и решение двум необъяснимым на начало 70-ых годов задачам акустического тракта.

Первая задача состояла в неоднозначной зависимости амплитуд эхосигналов от размеров (высоты и ширины) зарубок, сегментов и двугранных углов при контроле искателями с углом падения (призмы) $28\text{—}30^\circ$ или углом ввода $\beta \approx 57^\circ (= 90\text{—}33^\circ)$. Как правило, например, при угле ввода 45° , амплитуда эхосигнала от углового отражателя увеличивается строго пропорционально размеру отражателя. Эту задачу мы называем **задачей А.З. Райхмана**, который первым обнаружил и описал ее (рис. 6). Объяснение было найдено и предложено нами, когда во внимание было принято то, что амплитуда эхосигнала 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° ;

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

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА С ПОМОЩЬЮ ТЕОРИИ ГОЛОВНЫХ ВОЛН

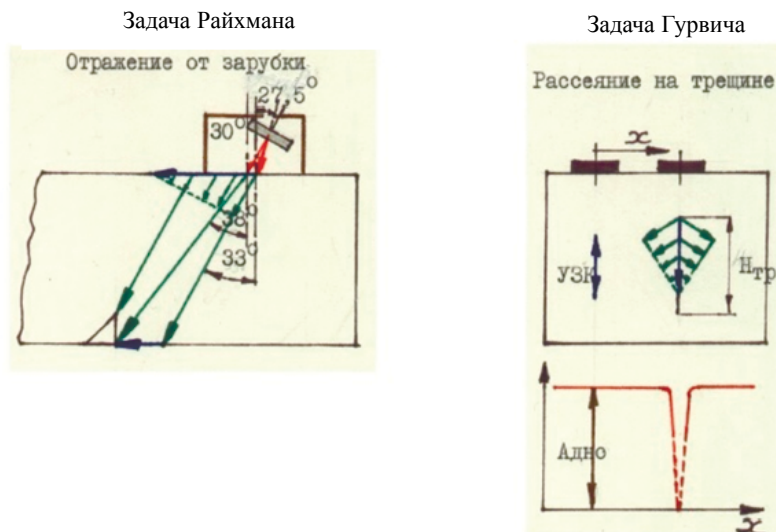


Рис. 6. Рассмотрение задачи Райхмана и задачи Гурвича с учетом физики головной волны.

Математическое решение задачи выполнено А.З. Райхманом и его учеником С.П. Переваловым и вошло в кандидатскую диссертацию последнего и докторскую диссертацию А.З. Райхмана.

Вторая задача акустического тракта, требовавшая решения, заключалась в уменьшении донного эхосигнала продольной волны при наличии на пути распространения ультразвука плоского, ориентированного вдоль направления распространения ультразвука, разрыва, несплавления, пропилы, трещины (см. рис. 6). Эту задачу я назвал **задачей Гурвича**, так как впервые услышал ее от

А.К. Гурвича на семинаре молодых ученых-дефектоскопистов УЗД в Гурзуфе в апреле 1973 г., организованном ЦК ВЛКСМ и прошедшем под его научным руководством. Объяснение и решение этой задачи было найдено, когда мы уяснили и 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 (см. закономерность 2 на рис. 2 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 эхосигнала.

В заключении настоящего раздела важно напомнить следующее. 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 (и ввода) на рис. 7 для границы оргстекло—сталь [14]. В точках первого критического угла коэффициенты 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**.

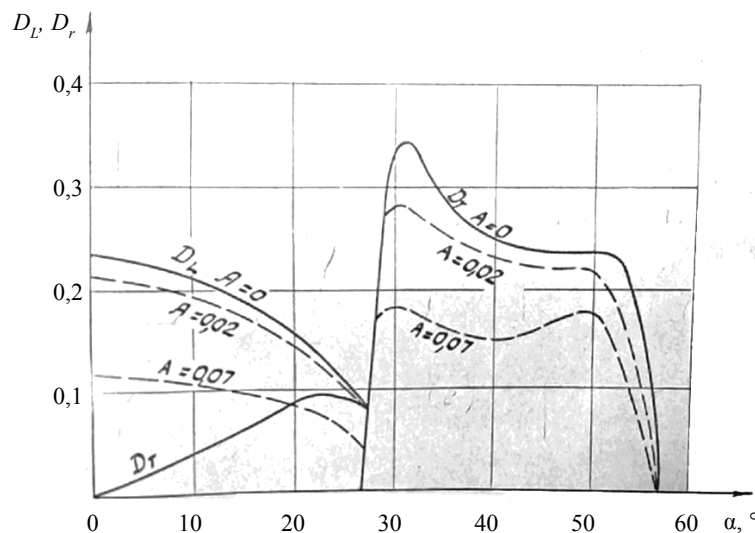


Рис. 7. График зависимости коэффициента прохождения по энергии при падении продольной волны под углом на границу оргстекло—сталь.

О ТЕРМИНАХ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ МЕТАЛЛОВ ГОЛОВНЫМИ ВОЛНАМИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

Наши пионерские исследования в УЗД головными волнами позволили уяснить 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 и подповерхностные волны**. В 1970—80 гг. многие специалисты в УЗД поддержали и приняли предложенные нами термины. Во-первых, мы были первыми исследователями этих волн, во-вторых, работа была выполнена в лаборатории ЛУЗМИМ ЦНИИТМАШ под руководством проф., д.т.н. И.В. Ермолова. Авторитет И.Н. Ермолова и его лаборатории в мировой и тем более в советской УЗД были широко признаны, а наши работы по УЗД головными волнами его еще более обогатили и укрепили.

В-третьих, и это очень важно для нашего нынешнего обсуждения, все эти названия (термины) хорошо и в полной мере интерпретируют специфическую физическую картину возбуждения, рас-

пространения и приема ультразвуковых продольных, поперечных и неоднородных волн, имеющих место при падении продольной волны под 1-ым критическим углом (и близких к нему углах) и при третьем критическом угле падения. На наш взгляд, они четко определяют «смысловое содержание терминов», о котором авторы украинской статьи высказываются в п.1 на стр. 4. Именно такое изображение и представление о головной волне, как комплексе волн, и составляющих ее волнах, позволило четко и однозначно рассмотреть и решить задачи Райхмана и Гурвича, объяснить численную и качественную разницу в ослаблении головной волны с расстоянием при распространении волны вдоль свободной границы (с воздухом) и в иммерсионном режиме, а также понять и уяснить физику явления усиления головной волны при распространении под поверхностью типа резьбы, на которой в УЗД не может распространяться продольно-поверхностная волна и не возбуждаются боковые (продольные и поперечные) волны, и после прохождения сопряжения детали.

Не все коллеги поддерживали нашу терминологию, при этом и мы (авторы предложенных терминов), и наши оппоненты из прикладной и теоретической акустики ссылались на книгу академика Л.М. Бреховских [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. Но не дай бог вам ощутить их, т.к. это может означать, что вы попали в зону землетрясения.

Напомню, что ультразвуковые волны с частотой более 20000 Гц ухо человека не слышит, и тем более оно не слышит ультразвуковые волны с частотой 1—10 МГц, которые используются в ультразвуковой дефектоскопии металлов.

Известно, что некоторые представители животного мира используют ультразвуковые волны для передачи информации между собой и координации в пространстве. Это, прежде всего, летучие мыши, которые прекрасно ориентируются в темноте, благодаря наличию ультразвуковых локаторов, и дельфины. Низкочастотные ультразвуки (писк), издаваемые этими животными, слышит и человек, но по-разному в зависимости от физиологического состояния.

В нормативной и технологической документации на УЗК основного металла, сварных соединений и наплавов в энергетическом и тяжелом машиностроении и в энергетике, в которых работал ЦНИИТМАШ, а также в трудах и документах по УЗД в других областях техники и промышленности использовались термины предложенные нами. Вместе с тем предложенная терминология не вполне удовлетворила отдельных специалистов в области акустических исследований и сейсмоакустики. Но они все-таки работали в другой области науки, техники и технологии.

Так, в [15] для обозначения предложенной нами одной из составляющих головной волны — продольно-поверхностной волны — используется термин **поверхностно-продольная** волна и ничего не говорится о продольной подповерхностной волне. Специалисты, пришедшие в УЗД из технической акустики (обучавшиеся в вузах или ранее работавшие), участвовавшие в обсуждении новых терминов, любили поговорить и обсудить новые термины, но в целом приняли нашу терминологию, тем более, что она в основном 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 головными волнами уже не могли. Отсюда появились их собственные представления о головных волнах. Они без обсуждения с авторами и первыми исследователями метода на свой лад вводили термины, давали свои интерпретации, печатали их в книгах, журналах, стандартах. В частности, в 2003 г. собственные описания физики и технологии УЗК головными волнами представлены у Ю.В. Ланге и В.А. Воронкова [16], другие привлекают собственные термины, например, **скользящая волна** [17], который в 1991 г. взят из сейсмоакустики.

Иностранные ученые и специалисты (немецкие, сотрудничающие с фирмой Крауткремер и ЦНИИТМАШ) по следам наших работ опубликовали свои статьи и патент [18, 19], в которых для обозначения продольно-поверхностной волны использовали термин **ползучая волна**, который в данном случае исходит от эффекта ползучести металла (изменение (увеличение) размеров металлического элемента, например, длины окружности трубы, под действием давления и температуры): **kriechwellen** (немецк.) 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 российские пионерские в мировой УЗД металлов научные труды, термины и технологии.

Но уже в 1986 г. в книге фирмы Крауткремер «Ультразвуковая дефектоскопия материалов» [20] авторы (в их числе соавторы указанного выше немецкого патента) приводят многочисленные

ссылки (№ № 411, 412, 413 и 1240) на наши пионерские и оригинальные исследования и разработки в области УЗК металлов головными волнами. На русском языке книга была издана под редакцией профессора, доктора технических наук В.Н. Волченко в изд-ве «Металлургия», Москва, 1991 г., 752 с. И в ней 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**, который появился позже, в 90-ые годы, на наш взгляд неверно переведен и неправомерно используется в некоторых стандартах, 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 и вдоль поверхности контролируемого металла.

К глубокому сожалению, после развала СССР наша дефектоскопическая общественность в некоторой степени утратила свою монолитность, в особенности после ухода отцов-основателей. Некоторые псевдоученые и менеджеры попытались сделать себе имя на «ползущих» волнах, не зная о головных волнах в СССР; другие, не разобравшись в результатах своих исследований, докладывали на конференции УЗДМ о своих новейших достижениях по УЗ контролю приповерхностного слоя. Отдельные «мало сведующие» специалисты открыли для себя и стали публиковать статьи по УЗД металлов «ползущими» зарубежными волнами, не зная о научных работах и технологических разработках ученых и специалистов СССР и России по головным волнам и не упоминая о них.

Некоторые соображения по «конкретным материалам из нормативно-технической и специальной литературы» из статьи [1] по п. 1—11 на с. 1—4. (№ пунктов и литературные ссылки в статье 1.)

Пункт 1. Авторы ссылаются на стандарт по сейсмоакустике и его термины. Считаю, что не следует впутывать сейсмоакустику в ультразвуковую дефектоскопию металлов. У них своя по В.Высоцкому «комплексная бригада», у нас своя. 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, в основном, 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 приемами.

В ультразвуковой дефектоскопии металлов дифракционно-временным методом (ДВМ) (англ. TOFD) в качестве одной из операций метода нашел применение способ контроля головной волной. Украинские коллеги неточно используют термины для отображения и интерпретации своих терминологических предложений: на рисунке страницы 4 на участке между излучающим и приемным искателями в воздушном пространстве не существует никакой боковой волны (Lateral wave). Боковая волна появляется только в призме приемного искателя на участке его соприкосновения с границей контролируемого объекта, вследствие распространения продольно-поверхностной волны (steering wave (англ), дословный перевод – ползучая волна). Более подробно об этом ниже.

Пункт 2. При всем уважении к Ю.В. Ланге (автору велосиметрического метода) и В.А. Воронкову (к.т.н., заведующий ЛУЗМИМ ЦНИИТМАШ), следует отметить, что они 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 еще как зависит (см. выше). 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 головную волну при УЗД и используется в дифракционно-временном методе УЗД (TOFD), как часть головной волны.

Пункт 3. ГОСТ Р ИСО 5577—2009. Используемый термин (название) правильный, но не верно прописан. В настоящее время документ перерабатывается. Предложена новая редакция термина головная волна — комплекс волн...

Пункт 4. Я не согласен с описанием ГВ в книге. Такая книга с дружеской надписью И.Н. Ермолова у меня конечно есть, о своей позиции по этому разделу я говорил уважаемым И.Н. Ермолову и Н.П. Алешину.

Пункт 6. ГОСТ Р ИСО 5577—2017 (проект). В отличие от ИСО 5577—2009 (П.3) используется не правильный термин, он не верно переведен и не верно прописан. В настоящее время проект документа перерабатывается в нашем подкомитете.

Пункт 7. ISO 22825:2012. В 2012 г. прошло сорок лет со времени обнаружения и начала работ с головными волнами. У них (за рубежом) в стандарте все по-своему и в данном случае с большими фактическими физическими и терминологическими ошибками. Авторы не хотят знать результаты наших исследований и терминологию. Конкретно:

а) представленное описание не соответствуют полученным нами закономерностям: термин «ползущие» неверен; волны «распространяются на глубину равную приблизительно одной длине волны от поверхности» — источники выводов не представлены, выводы голословны, противоречат нашим исследованиям головных волн (от 0 до 15—17 мм) [2, 12]. Как известно, на глубину, равную, одной длине волны распространяются поверхностные волны (волны Рэлея) [21];

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

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

г) «ползущие волны непрерывно генерируют сдвиговые волны (также называемые головными волнами), что является следствием взаимодействия с поверхностью». 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 (см. выше). Боковая волна в верхней среде позволяет в условиях одностороннего доступа к контролируемому объекту зафиксировать продольно-поверхностную волну.

Пункт 8. Уже отмечено выше в п. 3 и п. 6.

Пункт 9. ДСТУ ENV 583-6:2005. Обидно за украинских коллег. Как это можно пропустить и допустить: *a* — расстояние между точками выхода излучателя и приемника (нарисовано так), а переведено — поверхностная волна. Ясно, что переводил и редактировал не специалист. Ну и конечно, как все просто на схемах: принятые импульсы сами за себя сообщают анализатору результатов к какому типу волн они принадлежат: а) я продольная волна, б) я поперечная волна, в) я дифрагированная волна, г) я переотраженная и т.д.!!! При разработке новых стандартов, гармонизированных с зарубежными, мы в России имеем аналогичные трудности и пытаемся с этим бороться в меру сил с похожими редакциями стандартов.

Пункт 10. ДСТУ CEN/TS 583-6:2008. В данной редакции, в отличии от 2005г, сразу видна рука специалиста. Но есть недоработка. Применены неизвестные термин и объяснение: «конвертированная мода сигнала от паза у донной поверхности»??? Трудно точно уяснить, что это такое.

Пункт 11. Наш коллега к.т.н. взялся за перевод «Введения по применению технологии ультразвукового контроля фазированными решетками», не владея в полной мере знаниями по ультразвуковой дефектоскопии, а когда столкнулся с трудностями в акустическом тракте не удосужился (по-видимому, захотелось быть первым и единственным автором) привлечь своих коллег к работе по переводу и тем более к техническому и научному редактированию книги. От этого пострадала и книга, и научная общественность, и авторитет автора перевода и редактора.

Завершая рассмотрение представленного в работе [1] «беглого анализа текстов представленных фрагментов 1—11» трудно не согласиться с украинскими коллегами: в рассмотренных ими документах, книгах, стандартах «ясного и однозначного соответствия между терминами и определениями типов волн нет».

С учетом изложенного выше следует отметить, что в настоящий момент:

в книгах и отдельных публикациях, в научных трудах имеет место смысловая путаница в терминологии, используемой в УЗД головными волнами;

в российских и международных стандартах нет единой терминологии при отображении УЗК головными волнами;

созрела необходимость в создании единой терминологии в УЗД металлов головными волнами и гармонизации российских и международных стандартов.

ГОЛОВНАЯ ВОЛНА — КОМПЛЕКС ВОЛН

Чтобы исключить смысловую путаницу в терминологии УЗД головными волнами, вновь обратимся к описанию физики головной волны (см. выше) и терминам. Нами установлено и показано, что головная волна — это комплекс волн, распространяющихся от излучателя через контролируемый металл до приемника. В этот комплекс последовательно входят (для более полного уяснения повторим и дополним его по существу) следующие волны (рис. 8):

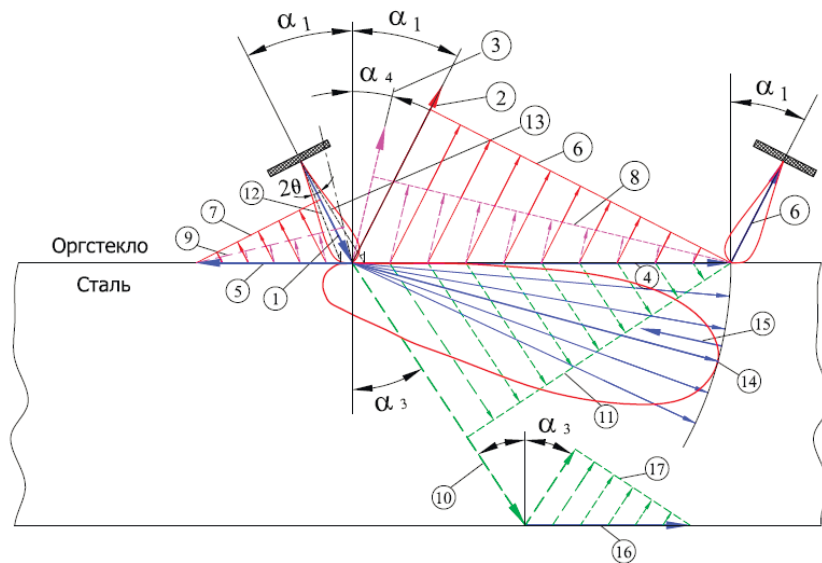


Рис. 8. Образование волн на границах раздела и вблизи них при критических и около критических углах и головная волна.

Этап излучения:

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

Этап возбуждения волн от падающей волны:

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

3) отраженная трансформированная под **4-ым 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;

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

6) боковая продольная волна, отходящая в верхней среде от границы под 1-ым 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 1-ым критическим углом, связанная с распространением волны 5;

8) боковая поперечная волна, отходящая в верхней среде от границы под 4-ым 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 4-ым критическим углом, связанная с распространением волны 5;

10) трансформированная поперечная волна в нижней среде с углом ввода, равным 3-му критическому углу;

11) боковая поперечная волна, отходящая в нижней среде от границы под 3-им 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 1-ым критическим углом к границе раздела сред и имеет диаграмму направленности с углом раскрытия $2\theta^\circ$.

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

12) продольные волны с углами падения меньше 1-го критического угла;

13) продольные волны с углами падения больше 1-го критического угла.

На этапе возбуждения:

продольные волны № 12 с углами падения меньше 1-го критического угла ($\alpha_1 - \theta^\circ$) образуют в нижней среде поле продольной подповерхностной волны № 14 (в обратном направлении при эхотоме волна № 15);

продольные волны № 13 с углами падения больше 1-го критического угла до $(\alpha_1 + \theta^\circ)$ образуют неоднородные продольно-поверхностные волны, с которыми связан эффект незеркального отражения.

На этапе 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), расположенный под 1-ым критическим углом к границе раздела (см. 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 (ГВ)** складывается из волн **(1+12) + (4+14) + (6+15)** соответственно на этапах излучения, возбуждения, прохождения и приема импульсов.

Эта головная волна и составляющие ее волны используются в УЗД металлов эхо, теневым, зеркально-теневым и ДВМ методами. Из Л.М. Бреховских известно множество головных волн. Большинство их на конечном этапе принимаются и фиксируются по боковой волне. Для УЗД металлов мы в 1970-ые годы предложили использовать головные волны, фиксируемые по боковой продольной волне в верхней среде и при углах близких к 1-ому критическому. Ясно и понятно, что и в дефектоскопии металлов возможна фиксация множества других головных волн, связанных с распространением других сопутствующих и распространяющихся в верхней и нижней среде волн. Методы их распознавания и идентификации разработаны и используются в сейсмоакустике и сейсморазведке. Описание некоторых из этих головных волн представлено в книге Л.М. Бреховских и в диссертации [3].

В УЗД металлов мы предложили и исследовали применение головных волн именно того типа, что описан выше. В том числе он используется 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.

Для нового международного стандарта ГОСТ Р 5577 (ISO 5577-2017) «Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль. Словарь» предлагается использовать следующие термины и их определения:

3.3.4 головная волна (head wave) – комплекс волн, возбуждаемых на границе раздела и в приграничных (соприкасающихся) средах при падении продольной волны под первым критическим углом, фронты которых распространяются со скоростью продольной волны в нижней среде;

3.3.4.1 продольно-поверхностная волна (creeping wave): неоднородная продольная волна (ползучая волна) (одна из составляющих головной волны) распространяющаяся по границе раздела совместно с образующимися при этом боковыми волнами (3.3.4.3);

3.3.4.2 подповерхностная продольная волна (undersurface longitudinal wave): продольная волна (другая составляющая часть головной волны), возбуждаемая в нижней среде при падении пучка (4.2.2) продольных волн под первым критическим углом;

3.3.4.3 боковая волна (lateral wave): продольная и поперечная волны, излучаемые в обе стороны от границы раздела под критическими углами, существующие совместно с неоднородной продольно-поверхностной волной. Являются физически неотъемлемыми составляющими частями неоднородной продольно-поверхностной и головной волн, обеспечивают возможность приема головной волны (рис. 2с в проекте стандарта).

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

КРИТИЧЕСКИЕ УГЛЫ

Выше показана исходящая от границы раздела боковая поперечная волна в верхней среде (см. рис. 8), также связанная с условием существования неоднородной продольно-поверхностной волны на границе раздела и распространяющаяся (и несущая упругое сдвиговое возмущение в твердой верхней среде) под соответствующим (определяемым по уравнению Снеллиуса) углом. В связи с нашими нынешними научными изысканиями этот угол, по-видимому, следует назвать **4-ым критическим** углом. Все критические углы связаны с возбуждением и распространением неоднородных волн: 1-й, 3-й и 4-й — с продольно-поверхностной волной, 2-ой — с неоднородной поперечной волной — поверхностной волной (волной Рэлея).

Еще раз обратим особое внимание на процессы возбуждения и распространения волн при критических углах (см. рис. 7). На графиках в 1-ом критическом угле мы имели «полное внутреннее

отражение» и нулевой коэффициент прохождения. Но падающая энергия не может исчезнуть в никуда. Эта энергия частично идет на образование неоднородной продольно-поверхностной волны и боковых волн, которые излучаются в приграничные среды. Эксперименты показали малую, в сравнении с объемными, 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 $29\text{--}30^\circ$. Особенно интересен этот феномен при ультразвуковом контроле пучком волн с диаграммой направленности, включающий эти углы и первый критический. С этим интересным феноменом я обратился к д.т.н. В.Н. Данилову, который является продолжателем дел И.Н. Ермолова по теоретическому изучению акустического тракта. Он обещал рассмотреть и описать этот феномен. Полученные результаты мы предложим научной общественности.

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 в реальном УЗК совместно существуют 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 прощупывается 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 ($3\text{--}7$ мм) от контактной поверхности. Этот эффект используется во всех методиках УЗК головными волнами при обучении контролеров, для идентификации головной волны и интерпретации импульсов головной волны.

Волна разряжения-сжатия (продольная) (колебания частиц металла в ней происходит вдоль контактной поверхности) при нормальном падении на границу внутри калибровочного или настроенного образца входит в палец (как в воду), что приводит к уменьшению амплитуды эхосигнала. Прикосновение к контактной поверхности при распространении продольно-поверхностной волны, когда частицы металла колеблются вдоль границы, не приводит к изменению амплитуды эхосигнала. Это также подтверждает факт отсутствия нормальной составляющей колебаний к контактной поверхности в продольно-поверхностной волне.

При 2-ом критическом угле падения продольной волны (в лучевом приближении) в нижней среде исчезает поперечная волна, но образуется неоднородная поперечная волна в виде поверхностной волны (волны Рэлея). 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 контактной поверхности. 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. В данном случае не до конца ясным остается вопрос о том, действительно ли можно говорить о колебаниях частиц по эллипсу?

О ВОЛНАХ НА ДОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Исходящая от границы раздела (контактной поверхности) 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 (см. 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 (другие головные волны) в сравнении с нашей головной волной. Эти импульсы очень сложно интерпретировать при УЗД сварных соединений, но можно использовать для обеспечения более надежного обнаружения дефектов в сварных соединениях малых ($4\text{--}8$ мм) и средних толщин ($8\text{--}20$ мм). В сейсмоакустике они используются и называются головными волнами 2, 3 и т.д.

НЕМНОГО К ДИСКУССИИ ПО ФИЗИКЕ И ТЕХНОЛОГИИ УЗК ГОЛОВНЫМИ ВОЛНАМИ И ПРИОРИТЕТЕ

Все вышеперечисленные 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 (термины, названия) волн, составляющих понятие **головная волна** полностью соответствуют физическим характеристикам волн: направлениям колебаний в волне, направлениям и скоростям 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 и/или волны в каждой среде. Это даст более полное понимание физики процессов и позволяет более точно интерпретировать имеющиеся первичные и вторичные излученные и принятые импульсы.

Если мы хотим предельно упростить схему контроля и/или блок-схему дефектоскопа, то можно пойти на упрощение (примитивизацию) этих схем. В особенности это может быть полезно в докладах для высоких чиновников, которым совсем не обязательно знать, в чем разница между боковой и головной волнами, а тем более, почему Н.П. Разыграев с коллегами И.Н. Ермоловым и В.Г. Щербинским сначала получили авторские свидетельства на использование «боковых» волн, а затем через несколько лет, после проведения исследований акустических свойств и технологических особенностей УЗК, разработав новые методики УЗК с применением головных волн, посчитали целесообразным предложить и использовать термин **головная волна**.

Также считал и считаю, что смысловое содержание термина головная волна в ультразвуковой дефектоскопии металлов, в том числе в ДВМ, в наилучшей степени характеризует ее, поскольку именно головная волна (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 головных волн в УЗД металла по минимальному времени распространения оказалась **наиважнейшей технологической (методической) характеристикой** как при обнаружении и интерпретации головных волн в 1972 г. в процессе исследований 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 «ломаются в открытую дверь» и пытаются доказать, что какой-то западный разработчик дифракционно-временного метода (ДВМ = TOFD) первым предложил использовать головную (боковую продольную волну) для слежения за акустическими характеристиками в процессе контроля (рис. 9б). Посмотрим еще раз на способ УЗК по а.с. № 502311 (1973 г.). Он состоит в том, что в призме искателя возбуждают УЗ колебания, вводят их в контролируемую зону, принимают прошедшие через нее 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. 9а).

Здесь представлено описание и говорится об использовании нами продольно-поверхностных, объемных и боковых волн, возбуждаемых одним пьезоэлементом с широкой диаграммой направленности, при УЗК эхо- и 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. Спорить об этом — это «толочь воду в ступе».

Следует вспомнить также, что еще в 1980-ые гг. для проведения безэталонной ультразвуковой толщинометрии раздельно-совмещенными контактными преобразователями сначала в СССР в МНПО «Спектр» д.т.н. В. Королевым был разработан и запатентован специализированный толщиномер (рис. 9в), который использовал дополнительную операцию прозвучивания головной волной (фактически по а.с. 502311) 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.

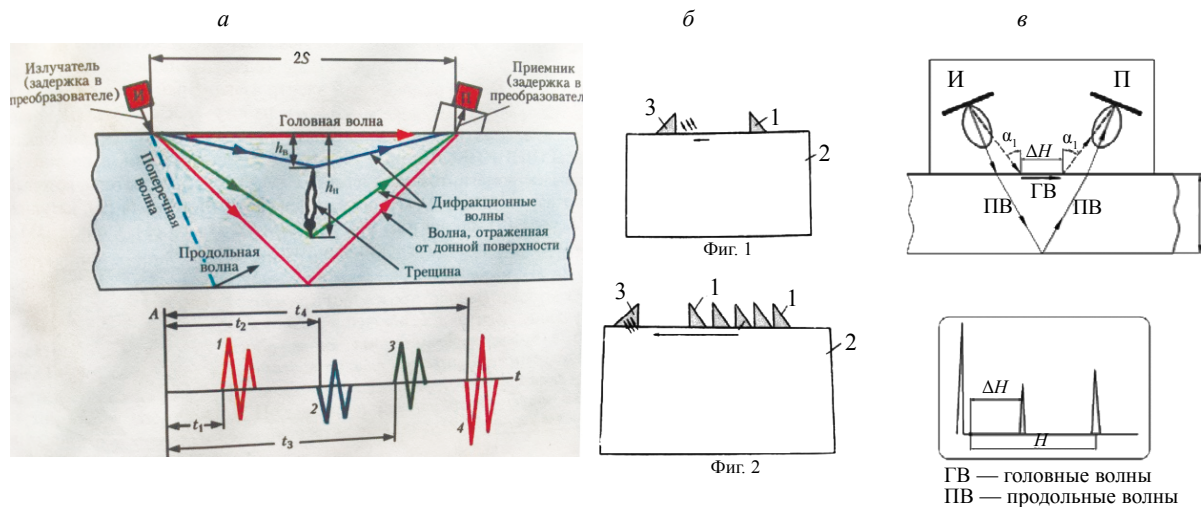


Рис. 9. Сравнение дифракционно-временного метода (ДВМ=ТОФД), способа УЗК по а.с. 502311 и безэталоного способа УЗ толщинометрии.

В настоящее время органы стандартизации и менеджеры по продажам призывают разработчиков новых стандартов к гармонизации с международными стандартами. При этом, как у нас в России, так и в Украине и в некоторых других странах из бывшего СССР, возникает много трудностей и принципиальных вопросов. Но давайте посмотрим назад и увидим, как наши зарубежные коллеги (в Европе) вводили новую терминологию по УЗД головными волнами в свои стандарты и не стеснялись в выборе своих терминов, без оглядки на наши исследования проведенные в СССР много раньше, на предложенную нами и используемую терминологию.

Сейчас идет гармонизация стандартов. В России и в Украине озабочились 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 в стандартах на ультразвуковой контроль, где в методическом плане СССР был всегда на переднем плане, а в части головных волн в 1970—80 гг. был далеко впереди планеты всей, мы можем много дискутировать и спорить. Но пойти на упрощенное, а тем более не верное описание физических особенностей и закономерностей, на использование некорректных терминов, когда исчезает полная физическая картина используемых и рассматриваемых волн, в тесной связи с используемой и уже сложившейся терминологией в СССР, в России и в Украине будет безусловно неправильно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спустя много лет потребовалось вновь окунуться в физику, технологию и терминологию УЗК головными волнами, чтобы представить выявленные ранее и новые закономерности, доработать физические объяснения некоторых явлений в акустическом тракте; дать пояснения по терминам, предложенным нами для использования в ультразвуковой дефектоскопии головными волнами, и другими специалистами, в том числе зарубежными.

Надеюсь настоящая работа послужит нашей науке, поможет коллегам при разработке новых технологий УЗК, поможет молодым ученым, инженерам и дефектоскопистам в понимании физических процессов в ультразвуковой дефектоскопии металлов. Также надеюсь на единодушное и дружное использование предложенной терминологии в России и за рубежом, в том числе в международных стандартах.

Будет совсем неплохо, если мы и про приоритет не будем забывать. Ведь многие методики УЗК головными волнами разрабатывались, испытывались и использовались вместе с российскими и зарубежными коллегами. 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 Института электросварки им. Е.О. Патона Национальной Академии наук Украины «Основные направления работ Отдела неразрушающих методов контроля качества сварных соединений» под редакцией проф. В.А. Троицкого,

Киев, 2019 г. [22]. В них на страницах 19 и 89—100 [23] используются предложенные ЦНИИТМАШ и ранее принятые к использованию в сообществе неразрушающего контроля в СССР, России, Украины, Болгарии и др. странах термины по УЗК металлов головными волнами.

Посвящается светлой памяти моего учителя и научного руководителя профессора, доктора технических наук Игоря Николаевича Ермолова.

Благодарю Антона Николаевича Разыграева и Григория Яковлевича Дымкина за помощь и ценные советы при подготовке данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдов Е.А., Дядин В.П., Шекеро А.Л. О терминологических особенностях в обозначении ультразвуковых волн, образующихся при первом критическом угле // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2018. № 3. С. 1—12.
2. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. О выявлении подповерхностных дефектов ультразвуковым методом / Труды VII Всесоюзной конференции «Неразрушающий контроль материалов изделий...». Киев, 1974.
3. Разыграев Н.П. Экспериментальные исследования продольных подповерхностных волн и применение их для обнаружения подповерхностных дефектов в деталях энергетических установок / Дисс. ... канд. техн. наук. М.: ЦНИИТМАШ, 1979.
4. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. Отчет НИР «Исследование боковых ультразвуковых волн, с целью определения возможности контроля подповерхностного слоя деталей энергетических машин (поисковая)» Т-76. М.: ЦНИИТМАШ, 1975.
5. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. Способ ультразвукового контроля качества материалов / Авт. свид. № 491092 от 01.06.73. Бюл. изобр. № 41. 1975.
6. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. Способ ультразвуковой дефектоскопии материалов / Авт. свид. № 502311 от 28.12.73. Бюл. изобр. № 5. 1976.
7. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. Способ ультразвукового контроля качества материалов / Авт. свид. № 565249 от 20.05.74. Бюл. изобр. № 26. 1977.
8. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. Использование волн головного типа для ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 1978. № 1. С. 33.
9. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. Исследование ослабления ультразвуковых головных волн с расстоянием // Дефектоскопия. 1979. № 1. С. 37.
10. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. Исследование процесса формирования акустического поля головной волны в контролируемой среде // Дефектоскопия. 1978. № 11.
11. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н. Искатели для контроля приповерхностного слоя головными волнами // Дефектоскопия. 1981. № 1. С. 53—62.
12. Разыграев Н.П. О выявлении подповерхностных дефектов искателями головных волн ИЦ-61, ИЦ-70 // Дефектоскопия. 1981. № 3. С. 97—105.
13. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1957. 497 с.
14. Ермолов И.Н. Методы ультразвуковой дефектоскопии. Курс лекций. Ч.1. М.: Горный институт, 1966.
15. Юозонене Л.В. Упругие поверхностно-продольные волны и их применение для неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 1980. № 8. С. 29—38.
16. Ланге Ю.В., Воронков В.А. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения / Справочник. М., 2003.
17. ГОСТ 16821—91. Сейсморазведка. Термины и определения.
18. Вюстенберг Х., Эрхард А., Мехрле В. Патент ФРГ №2802278 от 15.01.81. Способ и устройство для неразрушающего контроля приповерхностного слоя.
19. Erhard A., Kroning V. Erzeugung, Ausbreitung und Anwendung von Ultraschall-Kriechwellen // Materialprüfung 26 /1984 № 9. 1984. September. VDI-Verlag GmbH. P. 323—326.
20. Крауткремер «Ультразвуковая дефектоскопия материалов». Берлин, Хейдельберг, Нью-Йорк, Лондон, Париж, Токио, 1986 (нем. и англ.).
21. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 167 с.
22. Основные направления работ Отдела неразрушающих методов контроля качества сварных соединений / Под ред. Троицкого В.А. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2019. С. 19, 89—100.
23. Троицкий В.А., Шекеро А.Л., Давыдов Е., Миховски М., Алексиев А. Технология оценки размеров несплошностей в сварных соединениях с применением дифрагированных волн. Киев: ИЭС им. Патона НАНУ, 2019. С. 89—100.