

50 ЛЕТ – ГОЛОВНЫЕ ВОЛНЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ МЕТАЛЛОВ (часть 2)*



РАЗЫГРАЕВ Николай Павлович
Канд. техн. наук
АО «НПО «ЦНИИТМАШ», Москва

4. Физическое представление о головной волне (ГВ)

В процессе экспериментально-теоретических исследований 1972–1979 гг. акустических волн головной типа установлено:

1. Оптимальным углом возбуждения и приема ГВ является первый критический угол α_1 (для границы оргстекло–сталь $\alpha_1 \approx 27^\circ 30'$) [6].
2. При использовании излучателей и приемников ГВ с пьезоэлементами диаметром 12 и 18 мм и частотой от 1 до 5 МГц и промышленных дефектоскопов ГВ можно зарегистрировать на расстоянии от 200 до 300 мм; ослабление амплитуды ГВ с расстоянием пропорционально квадрату расстояния при контроле в иммерсионном режиме ($A \sim r^{-2}$) и при контроле контактными излучателями $A \sim r^{-1,75}$ [7].
3. 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 ГВ с пьезоэлементами диаметром 12 и 18 мм и частотой от 1 до 5 МГц этот луч образует с контактной поверхностью угол, примерно равный 12° [10].
4. Установлено, что для возбуждения и приема ГВ наиболее удобны призматические излучатели; при контроле эхо-методом это раздельно-совмещенные излучатели с обязательным разделением функций излучателя и приемника [13]. Разработаны

конструкции двух типов излучателей для контроля приповерхностного слоя:

- 4.1. Излучатели типа ИЦ-61(-91) реализуют схему «тандем» (излучатель и приемник расположены один за другим по отношению к отражателю), позволяют проводить УЗК на расстоянии от 5 до 70 мм от излучателя и обнаруживать дефекты с соотношением 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 от 5 до 20 мм, с соотношением сигнал/шум не менее 14 дБ.

5. Исследование выявляемости подповерхностных дефектов ГВ показало, что:

- амплитуда эхо-сигнала от дефекта пропорциональна площади отражающей поверхности;
- зависимость амплитуды эхо-сигнала от расстояния изменяется по сложному закону [14].

На основании проведенных исследований возбуждения, распространения и приема ГВ в ЦНИИТМАШ было разработано следующее физическое представление о них [15].

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. 16). При распространении этой волны вдоль границы обеспечивается выполнение граничных условий. При контроле иммерсионным способом эти условия представляют собой равенство нулю касательных напряжений и равенство нормальных напряжений. При контроле контактными способом граничные условия более сложны и различны для участка, где расположена призма излучателя, 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-по-

* Часть 1 см. «Территория NDT», 2023. № 1. С. 54.

верхностной) 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 одновременно 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 иммерсионном режиме 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 напря-

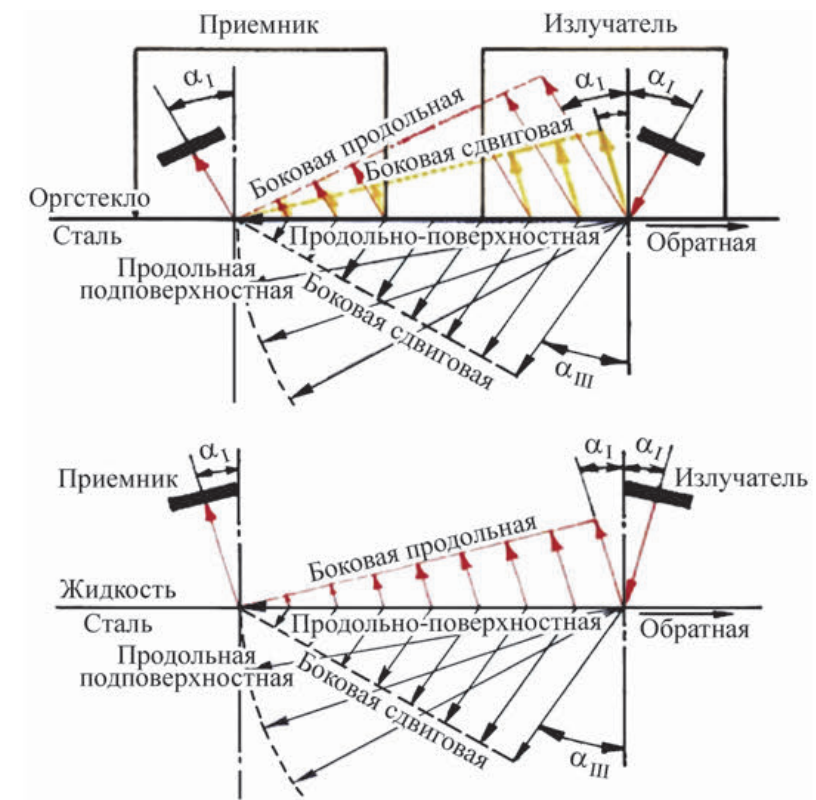


Рис. 16. Возбуждение, распространение ГВ вдоль границы раздела и прием

жения 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. 17). Его значение определяется из закона Снеллиуса

$$\sin \alpha_1 = c_{\text{лорг}} / c_{\text{лст}}, \quad (5)$$

где $c_{\text{лорг}}$ – скорость продольной волны в оргстекле; $c_{\text{лст}}$ – скорость продольной волны в стали, и он 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

$$\sin \alpha_t = c_{\text{торг}} / c_{\text{тст}}, \quad (6)$$

где $c_{\text{торг}}$ – скорость поперечной волны в оргстекле.

В нижней среде (в стали) в каждой точке на границе раздела сред генерируется боковая поперечная волна. Передняя точка фронта этой волны на границе раздела 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

$$\sin \alpha_3 = c_{\text{тст}} / c_{\text{лст}}, \quad (7)$$

где $c_{\text{тст}}$ – скорость поперечной волны в стали.

При падении поперечной волны на границу сталь–воздух под третьим критическим углом ($\alpha_3 \approx 33^\circ$) на противоположную параллельную (донную) поверхность на ней в строгом соответствии с законом Снеллиуса образуется неоднородная продольно-

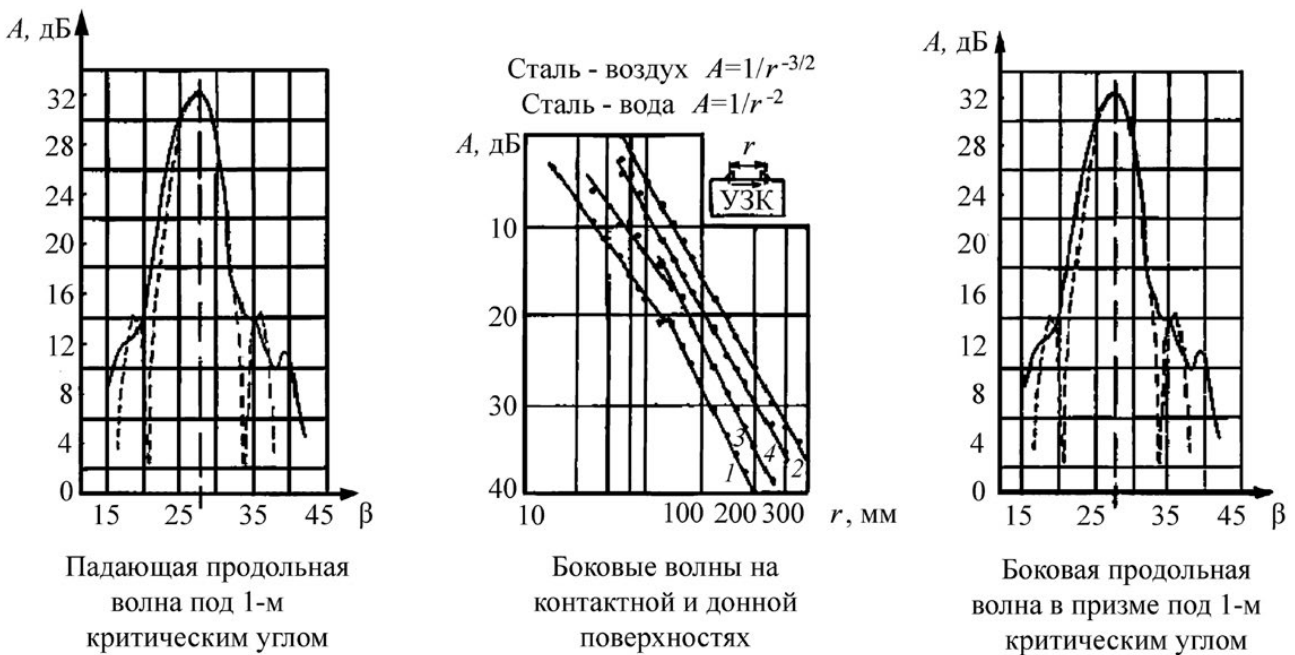


Рис. 17. Возбуждение (слева), прием (справа) ГВ при различных углах и ослабление головной волны с расстоянием (в центре) на частоте 1,8 МГц для границы вода–сталь (1 и 3) и оргстекло–сталь (2 и 4): β – угол падения осевого луча диаграммы направленности пьезоэлемента на границу оргстекло–сталь; кривые сплошные – экспериментальные диаграммы направленности пьезоэлементов в призме искателя; кривые штриховые – теоретически рассчитанные диаграммы этих пьезоэлементов

поверхностная волна (рис. 18) и сопутствующие 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 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. 18). Таким образом, 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: ГВ 1, ГВ 2 и т.д. [8], и параметры импульсов ГВ 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 [4].

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. 17).

Рассмотренная на рис. 18 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 – единственный способ 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

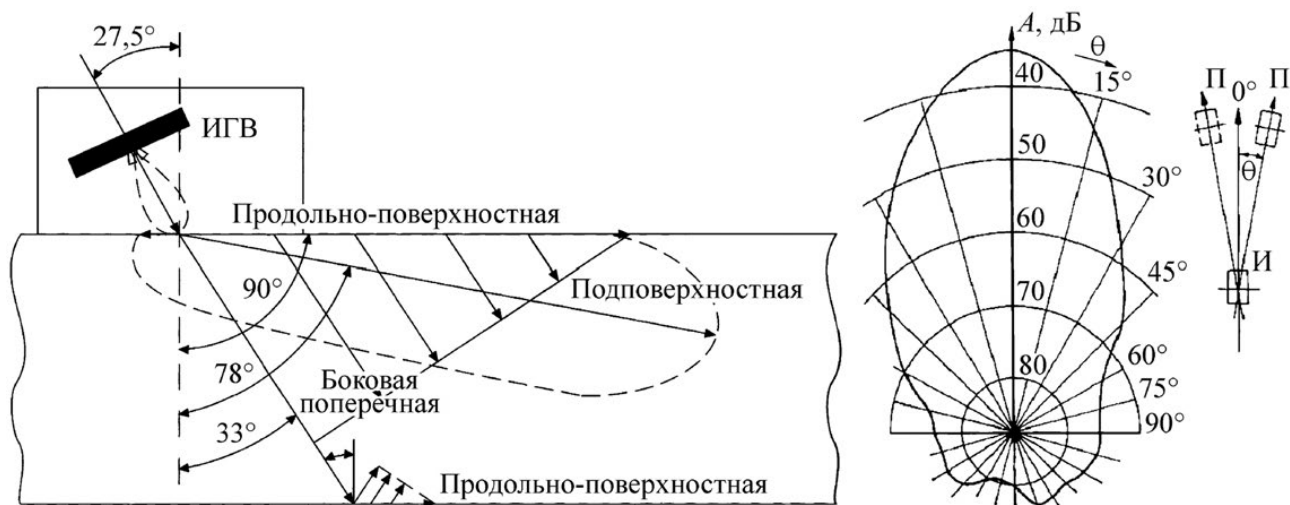


Рис 18. Поле ГВ в контролируемой среде и образование волн при падении боковой поперечной волны на донную поверхность (ИГВ – искатель ГВ)

углами падения меньше и больше первого критического. Продольные волны с углами падения больше 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, участвуют в формировании и образуют в нижней среде поле продольной подповерхностной волны с полусферическим фронтом, начало которого совпадает с фронтом продольно-поверхностной волны (см. рис. 18). 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 рассмотрена ниже), когда продольная волна от прямого искателя распространяется вдоль вертикальной плоской несплошности. На плоских берегах несплошности образуются продольно-поверхностные и поперечные боковые волны, которые отводят энергию в стороны. 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. 18). При дефектоскопии волна нечувствительна 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. 19) 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 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. 19). Здесь необходимо еще раз отметить факт, 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.

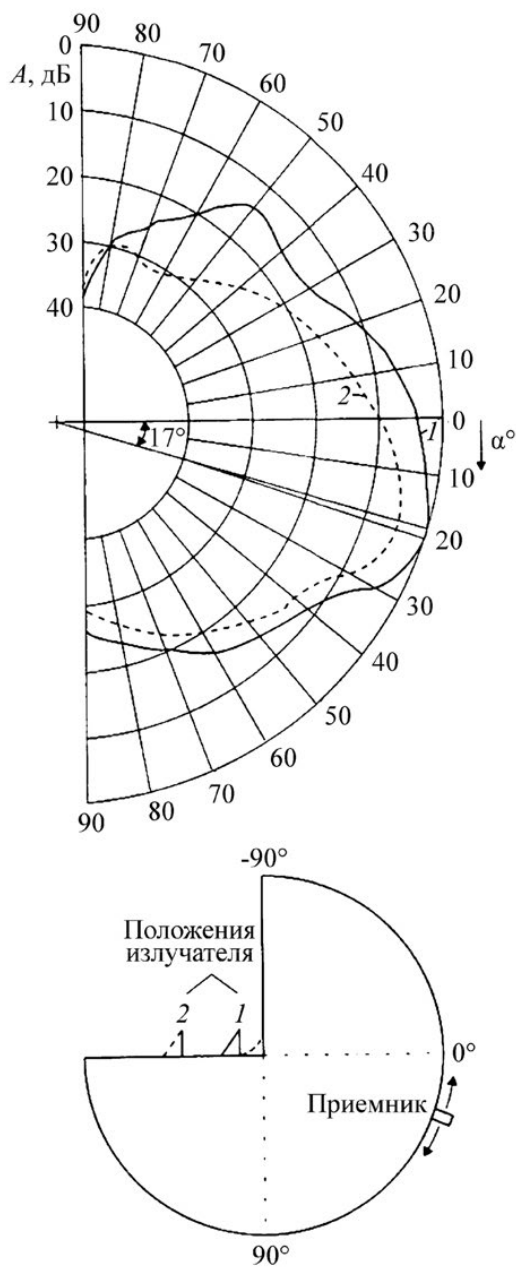


Рис. 19. Акустическое поле головной волны за сопряжением контролируемой детали: схема исследования – внизу; результаты исследования –верху

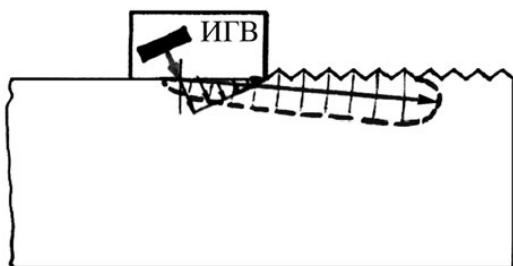


Рис. 20. Распространение головной волны под резьбой

Такой же эффект усиления ГВ имеет место при распространении продольной подповерхностной волны под резьбой и/или под поверхностью типа резьбы (рис. 20). 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 эхо-сигналов от дефектов одних и тех же размеров, расположенных под резьбой, больше, чем от аналогичных отражателей (поверхностных и подповерхностных дефектов) под гладкой поверхностью.

Учитывая особенности акустического поля излучателя с углом падения, равным первому критическому углу, как-то:

- 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, 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 благоприятствует интерпретации сигналов, расшифровке результатов контроля и повышает эффективность технологии УЗК ГВ. Применение физического представления о ГВ позволило найти объяснение, а затем и решение двум необъяснимым на начало 70-х гг. XX века задачам акустического тракта.

Первая задача состояла в неоднозначной зависимости амплитуд эхо-сигналов от размеров (высоты и ширины) зарубок, сегментов и двугранных углов при контроле искателями с углом падения (призмы) $28-30^\circ$ (угол ввода $33-35^\circ$) или углом ввода $\beta \approx 57^\circ$ ($90-33^\circ$), когда угол падения на вертикальную плоскость зарубки, сегмента, боковую поверхность образца равен третьему критическому углу. Как правило, при угле ввода 45° амплитуда эхо-сигнала от углового отражателя увеличивается строго пропорционально размеру отражателя. Эту задачу мы называем задачей А.З. Райхмана [15], который первым обнаружил и описал ее (рис. 21). Объяснение было найдено и предложено нами, когда во внимание было принято, 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° ;
- боковой поперечной волны на донной поверхности и ее отражения от зарубки.

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 сплошности, расплавления, пропила, трещины (см. рис. 21). Эту задачу назвали задачей Гурвича, так как впервые Н.П. Разыграев услышал ее от А.К. Гурвича на семинаре молодых

ученых-дефектоскопистов УЗД, организованном ЦК ВЛКСМ в Гурзуфе в апреле 1973 г.

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 продольно-поверхностные волны и сопровождающие их боковые поперечные волны (закономерность 2 на рис. 17 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.

В заключение настоящего раздела важно напомнить следующее. До наших исследований 1972–1976 гг. в ультразвуковой дефектоскопии металлов считалось, что при падении продольной вол-

1972 год – АКУСТИЧЕСКИЙ ТРАКТ УЗД			
Задача Райхмана Амплитуда эхо-сигнала от зарубки: не пропорциональна размерам зарубки		Задача Гурвича Амплитуда эхо-сигнала от дна: отражателя нет (!), а амплитуда резко уменьшается	
Теория акустического тракта не работает			
Излучение (И)			
	Излучение пучка продольных волн (ПрВ) с углом падения 30° , в том числе под первым критическим углом $27,5^\circ$; при этом на донной поверхности образуется ГВ от поперечных волн (ПВ), падающих под 3-м критическим углом		Излучение пучка ПрВ с углом ввода 0° . При распространении ПрВ вдоль трещины на ее берегах возбуждаются ГВ и боковые поперечные волны (БПВ)
Отражение, образование ГВ и БПВ, прием (П)			
	Отражение ПВ и ГВ от зарубки, образование БПВ на донной поверхности. Трансформация ПВ и БПВ в ПрВ и сложение волн на приемнике в различных фазовых состояниях, флуктуации амплитуды эхо-сигнала		ГВ и БПВ уносят часть энергии пучка ПрВ в стороны, что приводит к резкому уменьшению донного сигнала
С учетом физики головной волны работает теория акустического тракта			

Рис. 21. Рассмотрение задач Райхмана и Гурвича с учетом физики ГВ

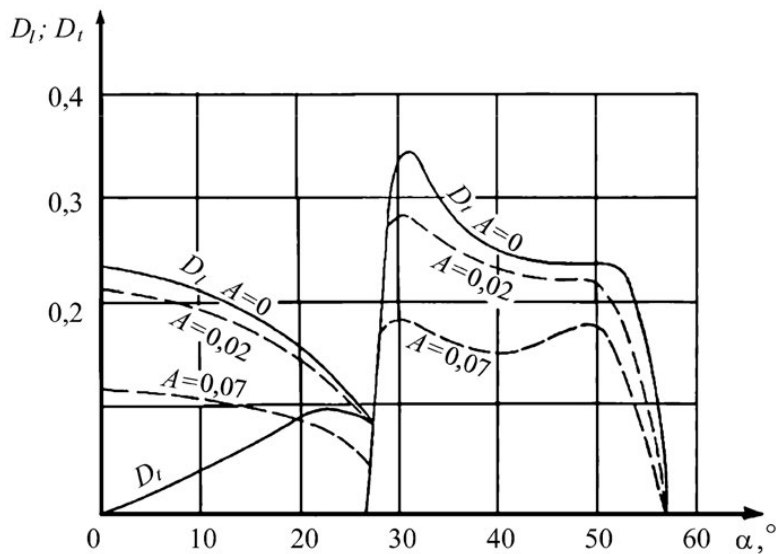


Рис. 22. График зависимости коэффициента прохождения по энергии при падении продольной волны под углом на границу оргстекло–сталь: D_l и D_t – коэффициенты прохождения продольной и поперечной волны соответственно; A – толщина контактного слоя в миллиметрах

ны 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) для границы оргстекло–сталь (рис. 22.) [10]. В точке 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.

5. О терминах в ультразвуковой дефектоскопии металлов головными волнами и их использовании

Пионерские исследования ЦНИИТМАШ в УЗД ГВ позволили уяснить процессы распространения продольных и попе-

речных 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 1970–1980 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 профессора, доктора технических наук И.Н. Ермолова. Авторитет И.Н. Ермолова и его лаборатории были признаны в мировой и тем более в советской УЗД, а работы по УЗД ГВ его еще более обогатили и укрепили. В-третьих, и это очень важно для их обсуждения, все эти названия (термины) хорошо и в полной мере интерпретируют специфическую физическую картину возбуждения, распространения и приема ультразвуко-

вых продольных, поперечных и неоднородных волн, имеющих место при падении продольной волны под первым критическим углом (и близких к нему углах) и при третьем критическом угле падения.

Именно такое представление о ГВ 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 ГВ с расстоянием при распространении волны вдоль свободной границы (с воздухом) и в иммерсионном режиме, а также понять и уяснить физику явления усиления 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, и после прохождения сопряжения детали.

Не все коллеги поддержали нашу терминологию, при этом все – и авторы предложенных терминов, и оппоненты из прикладной и теоретической акустики – ссылались на книгу академика Л.М. Бреховских [8]. В ней он описывает распространение упругих волн в слоистых средах в горных породах и воде. Как правило, это звуковые волны с частотой от 20 до 20 000 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, так как это может означать, что вы попали в зону землетрясения.

В нормативной и технологической документации на УЗК основного металла, сварных соединений и наплавов в энергетическом и тяжелом машиностроении и в энергетике, т.е. в областях, в которых работал ЦНИИТМАШ, а также в трудах и документах по УЗД в других областях техники и промышленности использова-

лись термины, предложенные нами. Предложенная терминология не вполне удовлетворила отдельных специалистов в области акустических исследований и сейсмоакустики [17]. Но они все-таки работали в другой области науки, техники и технологии. 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.

В то же время авторы новых книг, учебников, справочников, статей и стандартов по УЗД металлов, как правило, в полной мере не владели описываемыми явлениями, закономерностями и терминами, но обойтись без описания способов и технологии УЗК ГВ 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, например «скользящая волна» [16, 17], давали свои интерпретации, печатали их в книгах, журналах, стандартах.

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* (нем.) и *creeping wave* (англ.). Головной же волной они называют боковую поперечную волну в металле. При этом они вначале не ссылались на наши исследования ГВ и на российские пионерские в мировой УЗД металлов научные труды, термины и технологии.

Но уже в 1986 г. в книге фирмы «Крауткремер» [20] авторы (в их числе соавторы указанных выше немецких патента и статьи) приводят многочисленные ссылки (№ 411–413 и 1240) на наши пионерские и оригинальные исследования и разработки ЦНИИТМАШ в области УЗК металлов ГВ. На русском языке книга была издана под редакцией проф., д-ра техн. наук В.Н. Волченко. И в ней наряду с термином «головная волна», понимаемым нами как комплекс волн, используется термин «ползучая волна» для обозначения продольно-поверхностной волны. Дополнительно отметим, что термин «ползущая волна», который появился позже, в 1990-е гг., на наш взгляд, неверно переведен и неправомерно используется в некоторых стандартах, документах и трудах на русском языке, так как в данном случае волна не скользит (не ползет по поверхности) снаружи, а распространяется в

нижней среде по и вдоль поверхности контролируемого металла.

К сожалению, после развала СССР 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 ГВ в СССР; другие, не разобравшись в результатах своих исследований, докладывали о своих новейших достижениях по УЗК приповерхностного слоя. Отдельные «малосведущие» 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 ГВ и не упоминая о них.

Следует отметить, что на период 2014–2020 гг.:

- в книгах и отдельных публикациях, в научных трудах имелась смысловая путаница в терминологии, используемой в УЗД ГВ;
- в российских и международных стандартах не было единой терминологии при отображении УЗК ГВ;
- созрела необходимость в создании и принятии единой терминологии в УЗД металлов ГВ и гармонизации российских и международных стандартов.

6. Головная волна – комплекс волн

Чтобы исключить смысловую путаницу в терминологии УЗД ГВ, вновь обратимся к описанию физики ГВ (см. выше) и терминам [16, 21, 22]. Установлено и показано, что ГВ – это комплекс волн, распространяющихся от излучателя через контролируемый металл до приемника. В этот комплекс входят (для более полного уяснения повторим и дополним его по существу) следующие волны (рис. 23).

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

Этап возбуждения волн от падающей волны:

- отраженная классическая продольная волна 2, исходящая от границы раздела под первым критическим углом (в верхней среде);
- отраженная трансформированная под четвертым критическим углом (новый термин) классическая поперечная волна 3 (в верхней среде для границы: оргстекло – сталь $\alpha_4 \approx 11^\circ$);
- неоднородная продольно-поверхностная волна 4 с углом ввода 90° , распространяющаяся в нижней среде по границе раздела со скоростью продольной волны;
- обратная неоднородная продольно-поверхностная волна 5 с углом ввода -90° , распространяю-

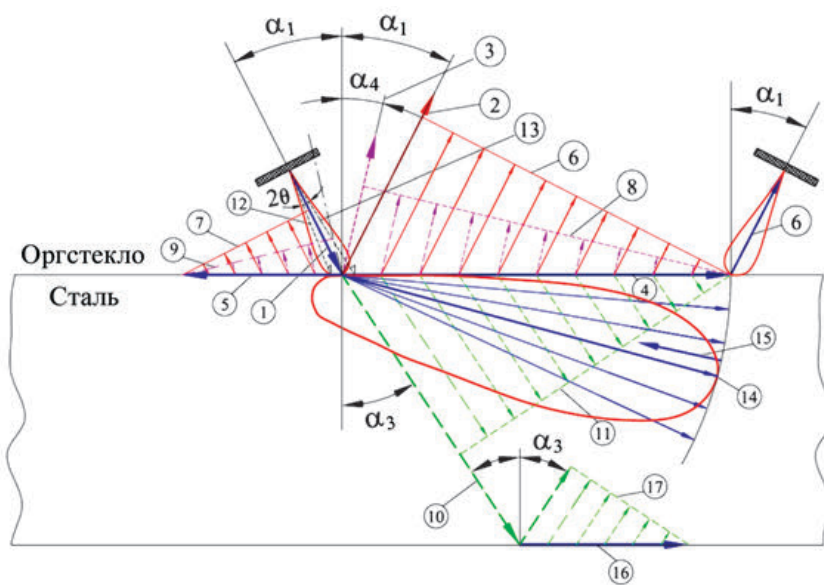


Рис. 23. Образование волн на границах раздела и вблизи них при критических и околоскритических углах и головная волна

щаяся в нижней среде по границе раздела со скоростью продольной волны;

- боковая продольная волна 6, отходящая в верхней среде от границы под первым критическим углом, связанная с распространением волны 4 (фронт волны связан с фронтом волн 2 и 4);
- обратная боковая продольная волна 7, отходящая в верхней среде от точки падения на границе под первым критическим углом, связанная с распространением волны 5;
- боковая поперечная волна 8, отходящая в верхней среде от границы под четвертым критическим углом, связанная с распространением волны 4 (фронт волны связан с фронтом волн 3 и 4);
- обратная трансформированная боковая поперечная волна 9, отходящая в верхней среде от точки падения на границе под четвертым критическим углом, связанная с распространением волны 5;
- трансформированная поперечная волна 10 в нижней среде с углом ввода, равным третьему критическому углу;

- боковая поперечная волна 11, 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, который имеет диаграмму направленности с углом раскрытия $2\theta^\circ$, акустическая ось которого ориентирована под первым критическим углом к границе раздела сред.

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

- продольные волны 12 с углами падения меньше первого критического угла;
- продольные волны 13 с углами падения больше первого критического угла.

На этапе возбуждения:

- продольные волны 12 с углами падения меньше первого критического угла ($\alpha_1 - \theta^\circ$) 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 кри-

тического угла до $(\alpha_1 + \theta^\circ)$ образуют неоднородные продольно-поверхностные волны, с которыми связан эффект незеркального отражения.

На этапе приема: излученный 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 первым критическим углом к границе раздела (см. рис. 23), 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 $(1 + 12) + (4 + 14) + (6 + 15)$ соответственно на этапах излучения, возбуждения, прохождения и приема импульсов.

Эта ГВ и составляющие ее волны используются в УЗД металлов эхо-теневым, зеркально-теневым и дифракционно-временным (ДВМ) методами. Из работ Л.М. Бреховских известно множество головных волн. Большинство из них на конечном этапе принимаются и фиксируются по боковой волне. Для УЗД металлов в 1970-е гг. ЦНИИТМАШ обнаружил и предложил использовать ГВ, возбуждаемые при углах, близких к первому критическому, и фиксируемые по боковой продольной волне в верхней среде. В дефектоскопии металлов также возможна фиксация множества других ГВ, связанных с распространением других волн, сопутствующих и распространяющихся в верхней и нижней средах. Методы их распознавания и идентификации разработаны и используются в сейсмоакустике. Описание некоторых из ГВ представлено в работах [8] и [9].

Применительно к УЗД металлов предложено и исследовано применение ГВ именно того ти-

па, что описан выше. Вновь отметим, что важнейшим физическим и технологическим фактором при использовании ГВ 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 проекта нового ГОСТ Р 5577 (ISO 5577–2017) «Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль. Словарь» предложено использовать следующие термины и их определения:

- **головная волна** – комплекс волн, включающий неоднородную продольно-поверхностную, подповерхностную продольную и боковые волны, возбуждаемых на границе раздела и в приграничных средах при падении пучка продольных волн под первым критическим углом, фронты которых распространяются со скоростью продольной волны в нижней среде;
 - **неоднородная продольно-поверхностная волна** – неоднородная продольная волна, распространяющаяся по границе раздела совместно с образующимися при этом боковыми волнами;
 - **подповерхностная продольная волна** – объемная продольная волна, возбуждаемая и распространяющаяся в нижней среде (контролируемой), имеющая энергетический максимум под поверхностью;
 - **боковая волна** – продольная и/или поперечная волны, излучаемые в обе стороны от границы раздела под критическими углами, являются физически неотъемлемыми составляющими частями головной волны вместе с продольно-поверхностной и подповерхностной волнами; обеспечивают возможность приема головной волны. Здесь уместно напомнить, что УЗ-дефектоскопия (выявление дефектов) ГВ в приповерхностном слое металлов осуществляется подповерхностной продольной волной, имеющей энергетический максимум под поверхностью, откуда и проистекают замечательные свойства УЗД головными волнами.
- В связи с изложенным полезно рассмотреть несколько физических моментов и, в частности, образование волн 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 (параллельную контактной) возбуждает (см. рис. 23):
- неоднородную продольно-поверхностную волну 16 на границе, аналогичную волне 4;

- волна 16 в каждой точке границы возбуждает боковую поперечную волну 17, 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 ГВ) в сравнении с нашей ГВ. Эти импульсы сложно интерпретировать при УЗД сварных соединений, но можно использовать для обеспечения более надежного обнаружения дефектов в сварных соединениях малых (4–8 мм) и средних (8–20 мм) толщин. В сейсмоакустике они используются и называются головными волнами № 2, 3, 4 и т.д.

Библиографический список

14. Ермолов И.Н., Разыграев Н.П. Исследование выявляемости подповерхностных дефектов головными волнами // Тр. 8-й Всесоюз. конф. по неразрушающим физическим методам и средствам контроля. Кишинев, 1977. С. 138–141.
15. Перевалов С.П., Райхман А.З. Акустический тракт наклонного искателя для отражателя углового типа // Дефектоскопия. 1979. № 11. С. 5–15.
16. 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.
17. ГОСТ 16821–91. Сейсморазведка. Термины и определения. М.: Кодекс, 2022.
18. Вюстенберг Х., Эрхард А., Мехрле В. Способ и устройство для неразрушающего контроля приповерхностного слоя: Пат. ФРГ № 2802278 от 15.01.81.
19. Erhard A., Kroning M. Erzeugung, Ausbreitung und Anwendung von Ultraschall-Kriechwellen // Materialprüfung. 1984. V. 26, No. 9. S. 323–326.
20. Krautkramer J. und H. Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Funfte, Neubearbeitete Auflage, Berlin: Springer-Verlag, 1986. 752 s.
21. Разыграев Н.П. Ультразвуковая дефектоскопия головными волнами – физические предпосылки и практическое применение // Дефектоскопия. 2004. № 9. С. 27–37.
22. Разыграев Н.П. Головные волны в ультразвуковой дефектоскопии металлов и терминология // Дефектоскопия. 2020. № 9. С. 3–19.

Продолжение читайте в следующих номерах журнала.