

# 50 ЛЕТ – ГОЛОВНЫЕ ВОЛНЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ МЕТАЛЛОВ (часть 3)\*



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

## 7. Технологии ультразвуковой дефектоскопии головными волнами

### 7.1. При- и подповерхностные дефекты и УЗК головными волнами в неразрушающем контроле металлов

При рассмотрении эпюры (рис. 24) напряженного состояния стенки сосуда, трубопровода или других металлоконструкций становится понятно, почему наиболее опасными дефектами являются поверхностные и приповерхностные дефекты, в особенности трещины. Максимальные напряжения растяжения (сжатия) приходится на приповерхностную часть нагруженного элемента, что может привести к развитию дефектов и разрушению элементов. Этому также способствуют условия эксплуатации трубопроводов, сосудов и металлоконструкций, поверхности которых подвергаются тепловым, радиационным, физическим (механическим) и/или химическим (коррозионным) воздействиям. С другой стороны, анализ действующих технологий и методик НК, в том числе методик УЗК,

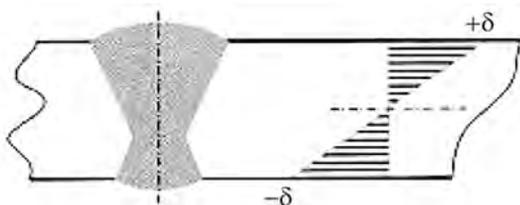


Рис. 24. Эпюра распределения нормальных напряжений по толщине стенки сосуда:  
 $\delta$  – значения максимальных нормальных напряжений

показывает, что в ряде случаев контроль приповерхностного слоя недостаточно эффективен. Способ УЗК эхо-методом сварных соединений с использованием ГВ показан на рис. 2 (см. часть 1 статьи).

УЗК ГВ обладает следующими важными достоинствами:

- ГВ распространяются почти по нормали к возможной поверхностной трещине. Как известно, при таком взаимодействии волны и трещины



Рис. 25. Примеры элементов металлоконструкций, трубопроводов и сосудов и приповерхностных дефектов в них: а – в сварных соединениях, в аустенитных наплавках и под ними; б – в основном металле валков и роторов; в – в шпильках, которые могут быть выявлены при УЗК ГВ

\* Часть 1 см. «Территория NDT», 2023. № 1. С. 54. Часть 2 см. «Территория NDT», 2023. № 2. С. 46.

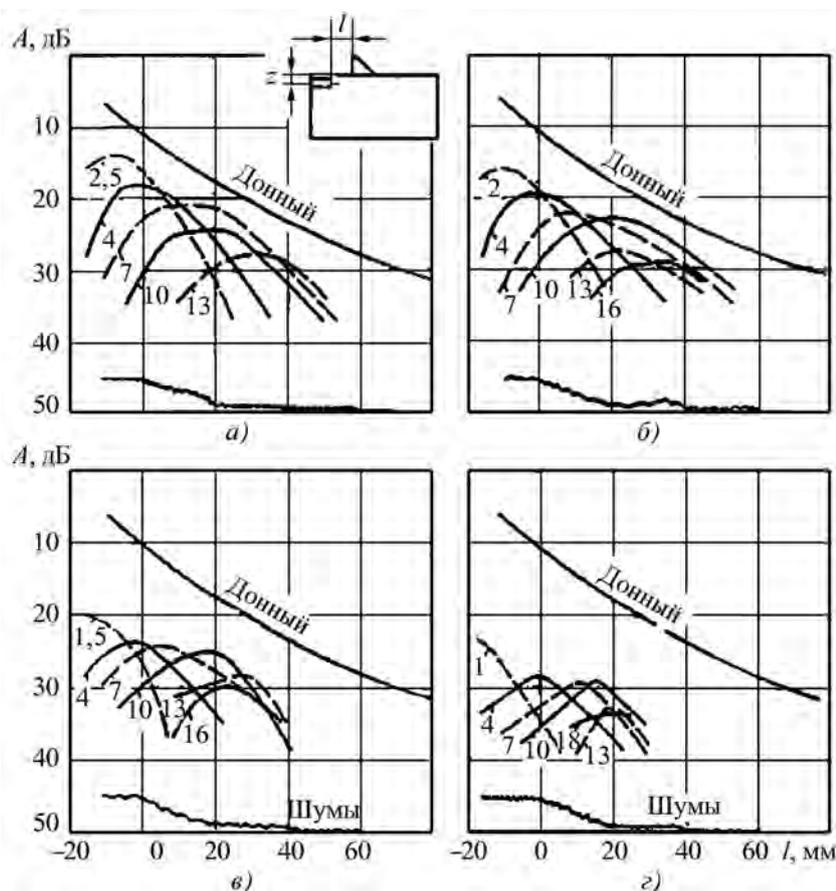


Рис. 26. Огибающие последовательности (полученные при контроле искателем ИЦ-61) амплитуд эхо-сигналов ГВ от отражателей, расположенных на различной глубине (цифры у кривых – глубина расположения плоскодонного отражателя):

диаметр отражателя: а – 5 мм; б – 4 мм; в – 3 мм; г – 2 мм; l – расстояние от искателя ИЦ-91 до эпицентра отражателя

обеспечиваются наилучшие условия для ее выявления;

- ГВ имеют максимальную скорость распространения по сравнению с другими волнами. Это в ряде случаев дает наилучшую интерпретацию сигнала и идентификацию отражателя.

Важным свойством способа контроля ГВ является возможность обнаружения дефектов под грубо обработанной или необработанной поверхностью. В ЦНИИТМАШ на основе первичного физического представления об УЗК ГВ и апробации способа контроля в 1974 г. была разработана первая в мире «Методика дефектоскопии подповерхностной части сварных со-

единений головными волнами». Она была включена в «Основные положения по ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений котлоагрегатов и трубопроводов тепловых электростанций» ОП № 501ЦД-75 [23] и в 1976 г. на выставке Министерства энергетического машиностроения СССР награждена бронзовой медалью ВДНХ СССР.

В дальнейшем эта методика была включена в НТД по УЗК оборудования и трубопроводов АЭС ОСТ 108.004.108-80 [24] и ее последующие редакции. В 1986 г. была разработана «Технология контроля изделий головными ультразвуковыми волнами», включающая в себя методику контроля

ИЦУ-3-84 и физическое представление об УЗК металлов ГВ. Она действует и сейчас.

На рис. 25 представлены некоторые примеры приповерхностных дефектов в элементах металлических конструкций, трубопроводах и сосудах, которые могут быть выявлены при использовании УЗК ГВ.

Накоплен большой опыт применения УЗК ГВ различных объектов, разработаны специальные методики контроля различных изделий, сварных соединений, металлоконструкций. Ниже представлены исследования при разработке и внедрении методик УЗК ГВ.

## 7.2. Выявление подповерхностных дефектов искателями головных волн

В ЦНИИТМАШ для обнаружения подповерхностных дефектов, в первую очередь трещиноподобных, которые ориентированы нормально к внешней поверхности проведены исследования выявляемости таких дефектов с помощью УЗК ГВ. Для этой цели разработаны и изготовлены образцы с подповерхностными трещиноподобными дефектами, которые моделируются дном плоскодонного отверстия, ориентированным нормально к контактной поверхности. В исследованиях использовали искатели ГВ ИЦ-61(-91) и ИЦ-70 [25, 26].

На рис. 26 и 27 приведены графики, характеризующие огибающие последовательности амплитуды эхо-сигналов ГВ для различных размеров дефектов. Параметром каждой кривой является глубина расположения дефекта. Зависимости, полученные при контроле искателем ИЦ-61 (рис. 26), свидетельствуют о следующем:

- для каждой глубины залегания дефекта имеется расстояние, при котором он выявляется с максимальной амплитудой эхо-сигнала;

- максимум чувствительности достигается вдоль луча с максимальной амплитудой поля излучателя 2;
- дефекты, расположенные ближе к поверхности, в том числе поверхностные, выявляются с меньшей амплитудой по сравнению с дефектами, находящимися на луче с максимальной амплитудой поля излучателя.

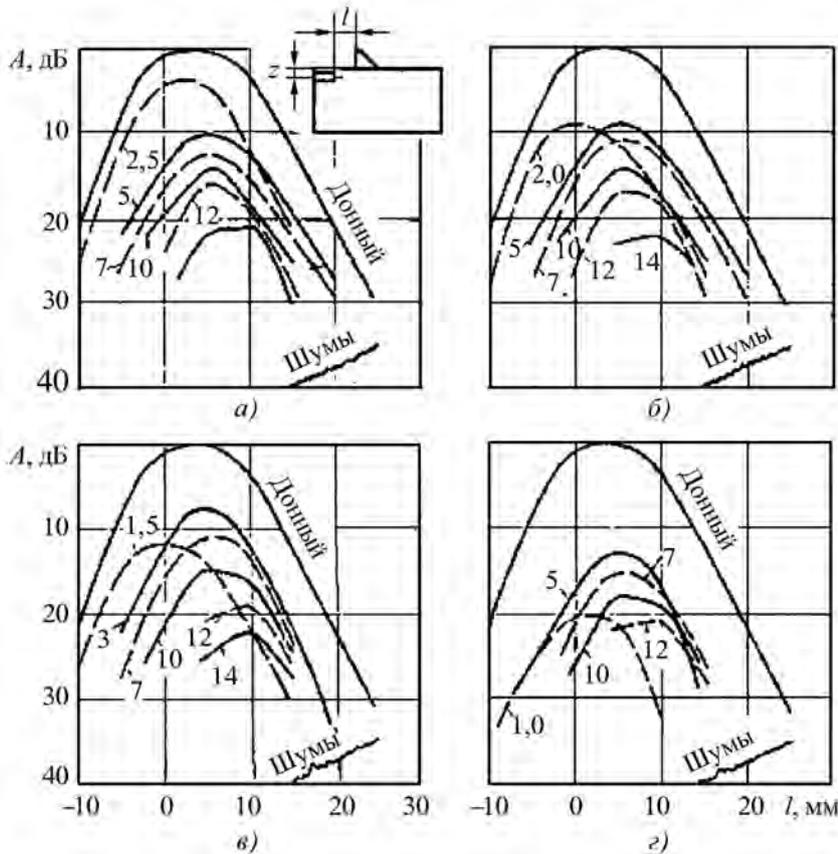


Рис. 27. Огибающие последовательности (полученные при контроле искателем ИЦ-70) амплитуды эхо-сигнала ГВ от отражателя, расположенного на различной глубине (цифры у кривых – глубина расположения плоскостонного отражателя): диаметр отражателя: а – 5 мм; б – 4 мм; в – 3 мм; г – 2 мм; l – расстояние от искателя до эцицентра отражателя

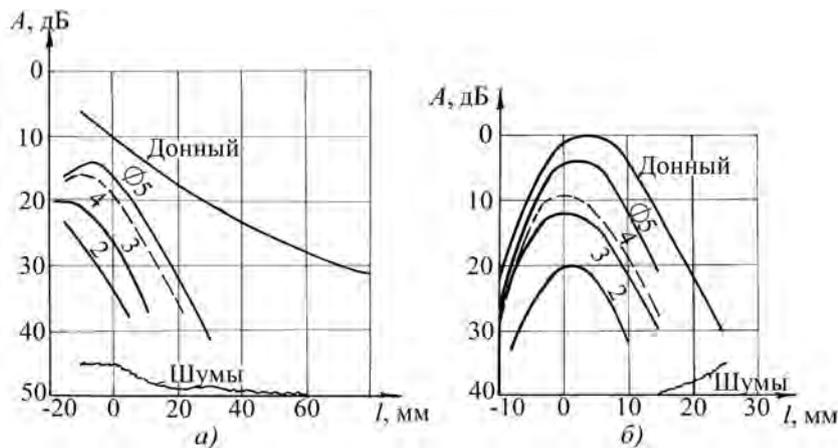


Рис. 28. Изменение амплитуды эхо-сигнала ГВ от поверхностного дефекта в функции от расстояния между искателем и отражателем: а – для ИЦ-61; б – для ИЦ-70; цифры у кривых соответствуют диаметру дефекта

нению с дефектами, находящимися на луче с максимальной амплитудой поля излучателя.

Для ИЦ-70 (рис. 27) максимальная чувствительность достигается на глубине, соответствующей пересечению лучей с максимальной амплитудой поля излучателя и приемника. Здесь же дефекты, расположенные ближе к поверхности, выявляются с меньшей амплитудой эхо-сигнала. Полученные зависимости аналогичны тем же для отражателей, дно которых перпендикулярно лучу с максимальным значением поля излучателя. Ввиду того что отражатели, имитирующие вертикальные трещины, ориентированы неблагоприятно по отношению к полю излучения-приемника (повернуты на угол  $12^\circ$  к лучу с максимальным значением поля излучателя), они выявляются при более высокой чувствительности дефектоскопа. Этим же объясняется уменьшение дальности обнаружения таких дефектов с помощью ИЦ-70. Кроме кривых, характеризующих изменение амплитуды сигнала от дефекта, на каждом графике изображена кривая донного сигнала и уровень шумов при контроле. Кривая донного сигнала соответствует изменению амплитуды эхо-сигнала от грани образца, перпендикулярной контактной поверхности и оси искателя.

### 7.3. Выявление поверхностных дефектов и дефектов под грубой поверхностью с помощью головных волн

Исследована выявляемость поверхностных дефектов при УЗК ГВ сталей перлитного класса [27]. Поверхностные дефекты имитировали с помощью отверстий с плоским дном, образующие которых касались контактной поверхности, и сегментных отражателей (в виде полукруга), выходящих на поверхность. Использовали два вида сегментных отражателей: 1) дно отражателей

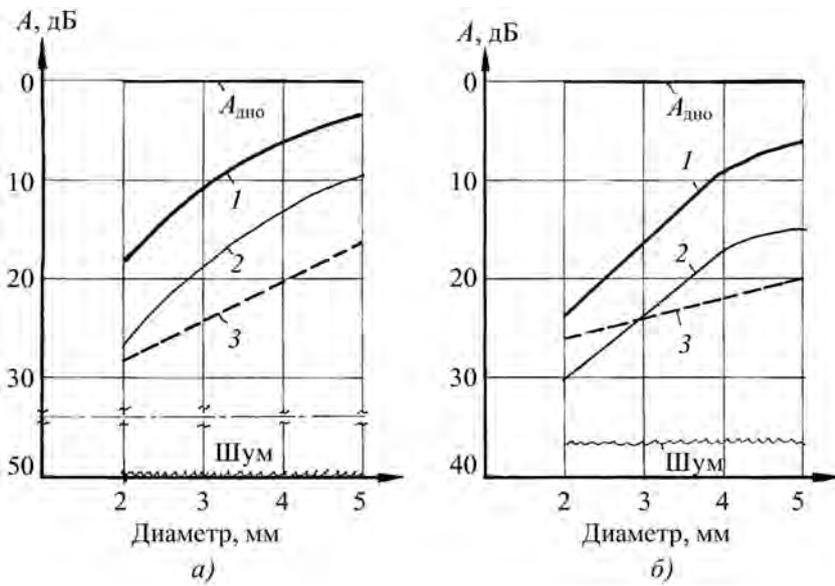


Рис. 29. Зависимости амплитуды эхо-сигнала ГВ от размера поверхностного дефекта: а – ИЦ-70; б – ИЦ-61; 1 – плоскодонные отверстия; 2 – сегментные отражатели, нормальные к поверхности; 3 – сегментные отражатели, образующие с поверхностью угол 78°;  $A_{дно}$  – амплитуда донного сигнала

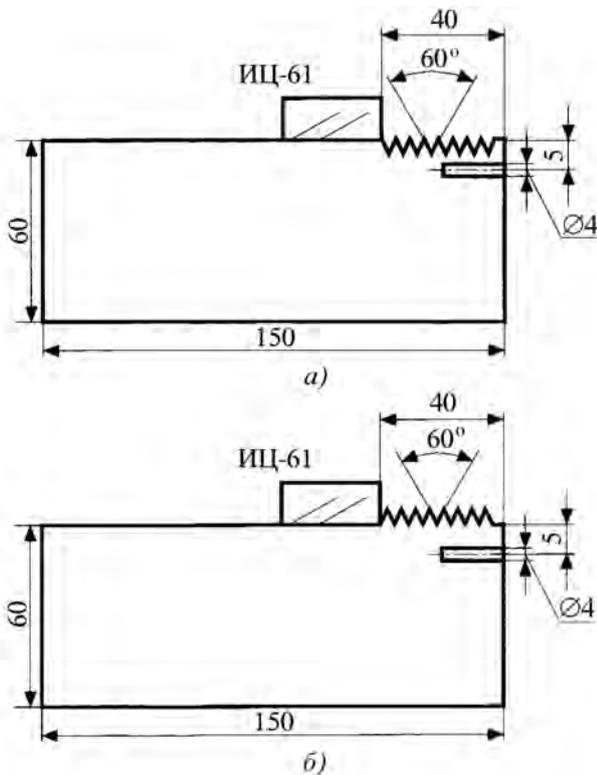


Рис. 30. Схема ультразвукового контроля головными волнами под грубо обработанной поверхностью или резьбой

ориентировано перпендикулярно контактной поверхности; 2) дно отражателей образует с контактной поверхностью угол 78°, т.е. расположено нормально лучу

с максимальным значением амплитуды поля ГВ.

Исследования проводили при показателях шероховатости поверхности  $Rz = 40$  мкм ( $\nabla 4$ ) и

$Rz = 100$  мкм ( $\nabla 2$ ) с помощью искателей ИЦ-61 и ИЦ-70 с частотой ультразвука 1,8 МГц. Экспериментальные данные показали, что для обоих значений шероховатости поверхности нормированная относительно опорного сигнала амплитуда эхо-сигнала от дефекта остается постоянной величиной со среднеарифметической погрешностью не более 0,5 дБ. Нормированные зависимости амплитуды донного сигнала эхо-сигнала от дефектов различных размеров и уровень шумов от расстояния между искателем и плоскостью отражателя (АРД-диаграммы) показаны на рис. 28. Видно, что можно обнаруживать поверхностные дефекты не только при  $Rz = 40$  мкм, но и при  $Rz = 100$  мкм, а по амплитуде эхо-сигнала ГВ можно определять эквивалентные и условные размеры поверхностных дефектов.

Дополнительным источником информации о размере дефекта может служить максимальное расстояние, на котором обнаруживается поверхностный дефект. На рис. 28, а четко прослеживается зависимость между размером (глубиной проникновения) поверхностного дефекта и максимальным расстоянием, на котором дефект обнаруживается: большему размеру дефекта соответствует большее расстояние.

На рис. 29 показаны зависимости амплитуды эхо-сигнала ГВ от размера поверхностного дефекта (плоскодонные отверстия и сегментов) при нулевом расстоянии между искателем и дефектом, т.е. когда дефект находится под передней гранью искателя.

Такое расстояние выбрано для упрощения методики определения местоположения (под передней гранью искателя) и размера дефекта, а также в связи с тем, что при нулевом расстоянии наиболее просто распознается ГВ по ее отражению от грани изделия или тест-образца. Экспериментальные данные показы-

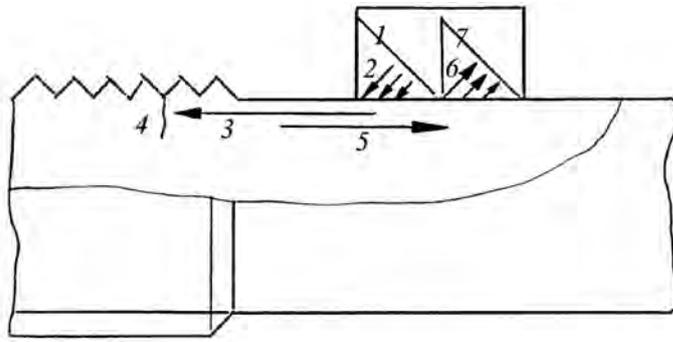


Рис. 31. Способ УЗК шпилек головными волнами:  
 1 – призма излучателя; 2 – падающая продольная волна; 3 – подповерхностная волна; 4 – трещина в металле; 5 – отраженная от трещины подповерхностная волна; 6 – боковая продольная волна в призме приемника; 7 – призма приемника искателя ГВ

вают, что с помощью ИЦ-70 и ИЦ-61 можно обнаруживать достаточно мелкие поверхностные дефекты, при этом искателем ИЦ-70 выявляют поверхностные дефекты при большем соотношении полезный сигнал/шум, чем искателем ИЦ-61.

Другой случай использования ГВ – это обнаружение дефектов под необработанной поверхностью или под резьбой, т.е. под поверхностью, по которой невозможно осуществлять сканирование искателем, но вблизи которой имеется поверхность, шероховатость и конфигурация которой допускают проведение контроля.

В стальном образце под поверхностью с регулярной насечкой изготавливали плоскодонное отверстие, имитировавшее дефект. Исследовали два случая: *a* – вершины насечки расположены заподлицо с контактной поверхностью; *b* – ее основание располагалось на одном уровне с контактной поверхностью (рис. 30). В каждом случае изучали четыре варианта глубины (высоты) насечки: 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 мм. С помощью ИЦ-61, установленного вплотную с краем насечки (как показано на рис. 30), измеряли амплитуду эхо-сигналов ГВ от края насечки и от плоскодонного отверстия, которые наблюдаются (каждый в соответствующем месте развертки дефектоскопа) од-

новременно. После этого амплитуду эхо-сигнала от насечки сравнивали с амплитудой донного сигнала от торца образца, а амплитуду сигнала от отверстия сравнивали с сигналом от такого же отверстия под гладкой поверхностью. Соответствующие расстояния от излучателя до отражателя были равны. Обнаружено, что в обоих случаях имеется эхо-сигнал от края насечки, амплитуда которого на 13–18 дБ меньше амплитуды соответствующего донного сигнала в случае *a* и на 17–22 дБ – в случае *b*. Эхо-сигнал от насечки в случае *b* образуется в результате дифракции ультразвука на краю насечки. При этом часть энергии входит в зуб, отражается от его грани и фиксируется искателем. Заметим, что эхо-сигнал от ступеньки, выступающей над контактной поверхностью (т.е. случай *b* до изготовления зуба), не наблюдается. Эхо-сигнал от дефекта во всех случаях уверенно фиксировался.

В случае *a* его амплитуда не изменялась по сравнению с сигналом от дефекта под гладкой поверхностью при глубине зуба 0,5 и 1,0 мм, уменьшалась на 5 дБ при глубине насечки 2 мм и на 8 дБ – при глубине 3 мм. Это уменьшение амплитуды связано с отражением части энергии ГВ от края насечки. В случае *b* амплитуда эхо-сигнала от отверс-

тий под насечкой и под гладкой поверхностью в пределах точности измерений  $\pm 1$  дБ оставалась постоянной.

Данные по выявляемости дефектов под насечкой говорят о том, что при контроле под резьбой эталонирование чувствительности можно проводить по гладкому тест-образцу, а в случае *a* необходимо вносить поправку в значение уровня контрольной чувствительности при настройке по тест-образцу с гладкой поверхностью или использовать тест-образец с такой же формой поверхности. С учетом исследований по выявляемости дефектов под поверхностью типа резьбы и под резьбой на шпильках, опыта применения способа сначала были разработаны «Методические указания по ультразвуковой УЗК шпилек на заводах и на тепловых и атомных станциях (рис. 31) дефектоскопии шпилек головными волнами» МЦУ-7–90, а затем «Методика ультразвукового контроля шпилек головными волнами» МЦУ-15–98.

#### 7.4. Ультразвуковой контроль головными волнами аустенитных сварных соединений трубопроводов Ду300 на АЭС

В 1997 г. в связи с массовым появлением трещин в аустенитных сварных соединениях (АСС) трубопроводов  $\varnothing 325 \times 15$  мм (Ду300) концерн «Росэнергоатом» поставил вопрос о разработке эффективной методики УЗК АСС данных трубопроводов.

Исследования и анализ показали, что основные сложности УЗК АСС трубопроводов Ду300 состоят в следующем:

- 1) высокий уровень радиационного фона, что обуславливает высокую производительность и простоту методики УЗК из-за невозможности длительного пребывания контролера на объекте;
- 2) сложная конструкция сварного соединения, включающая про-

точки различных размеров (по ширине и высоте) и углы ее скоса на внутренней поверхности, а также возможные технологические отражатели и дефекты в корне шва (провисания, утяжины, несоосность труб);

3) сложная крупнозернистая структура околосшовной зоны (ОШЗ) и металла шва сварного соединения, нагруженность внутренним давлением, усилиями от самокомпенсации труб и оборудования. Кроме того, в нем присутствуют остаточные сварочные напряжения;

4) ширина (валика) усиления в диапазоне 16–20 мм, но встречается и более. Вблизи усиления могут иметь место технологические утяжины и неровности, образованные при механическом удалении брызг от сварки, которые препятствуют созданию качественного акустического контакта преобразователя с металлом;

5) расположение сварных соединений в различных пространственных положениях, в стесненных условиях.

При постановке работы проектировщики и эксплуатационники исходили из реального положения дел в УЗД аустенитных сварных соединений – эффективной методики нет, трудности для УЗК существенные – методик нет в России, в Украине, в западных странах. В связи с этим перед разрабатываемой технологией УЗК поставили задачи:

- выявлять кольцевые протяженные (более 10 мм) трещиноподобные несплошности (эксплуатационные трещины) высотой 2 мм и более в сварном шве и ОШЗ;
- технология не должна предусматривать выявления технологических (объемных) несплошностей, регламентируемых требованиями правил контроля по радиографии.

В этот период исследования ЦНИИТМАШ и опыт работ поз-

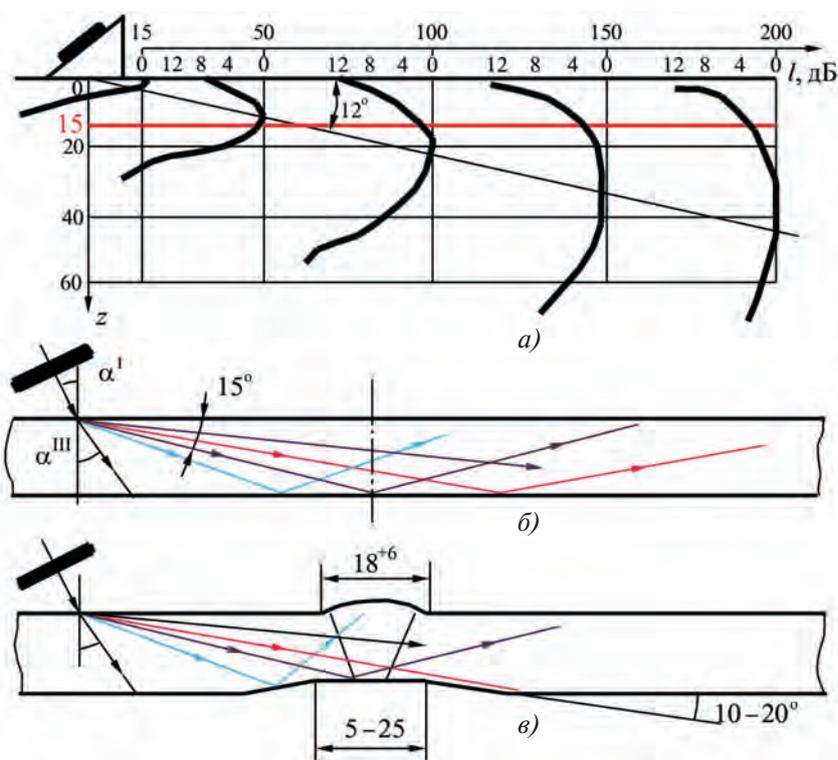


Рис. 32. Поле головной волны в полубезграничной среде (а), в листе (б) и трубопроводе со сварным соединением (в)

волили разработать эффективные методики выявления трещин в наплавках и под наплавками в биметаллических сосудах, трубопроводах и их сварных соединениях: корпусах реакторов ВВЭР-1000, трубопроводах главного циркуляционного контура Ду850 ВВЭР-1000 и контура многократной принудительной циркуляции Ду800 РБМК-1000 и др., была исследована применимость норм оценки качества при УЗК по Правилам контроля ПК 1514–72 [28], обоснована целесообразность их корректировки, разработаны, предложены и приняты новые нормы по УЗК сначала антикоррозионных наплавок [29], а затем и сварных соединений [30], впервые были разработаны методики определения толщины аустенитных наплавок и плакировок с помощью УЗК [31].

С учетом перечисленных факторов и обнаружения новых закономерностей мы вновь предложили использовать для УЗК

АСС трубопроводов Ду300 продольные волны головного типа [32]. При этом мы опирались на следующие базовые положения:

- при использовании ГВ они распространяются почти по нормали к преимущественной ориентации трещины в сварном соединении;
- ГВ имеют максимальную скорость распространения по сравнению с другими волнами. Это обеспечивает наилучшие возможности для интерпретации сигнала о наличии отражателя и его идентификации;
- ГВ на одной и той же частоте в сравнении с другими волнами имеют максимальную длину волны. Это обеспечивает возможность получения сравнительно высокого соотношения сигнал/шум от несплошности на фоне крупнозернистой структуры шва и ОШЗ;
- до проведения настоящих исследований к негативным факторам мы относили сравни-

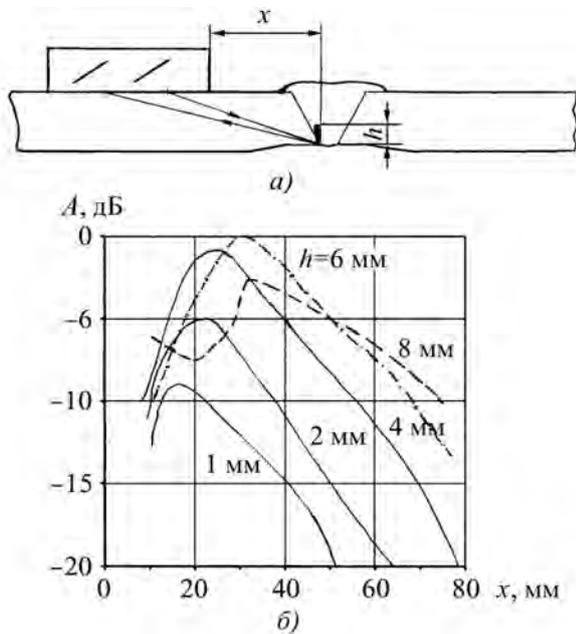


Рис. 33. Схема УЗК (а) и зависимость амплитуды эхо-сигнала ГВ от расстояния между издателем и отражателем для различной высоты трещины (б). Прозвучивание через основной металл и околосшовную зону АСС;  $h$  – высота трещины

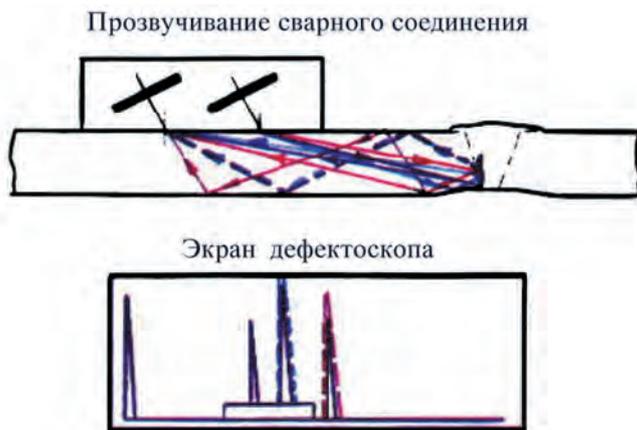
тельно небольшую толщину трубы – 15 или 16 мм, а в случае с проточкой – 11–12 мм. Считалось, что близость донной поверхности может мешать дефектоскописту из-за образования ложных сигналов в стробируемой зоне контроля.

Важным фактором оказался правильный выбор конструкции и разработка специализированного искателя ПГЦ-300.

Проведены дополнительные исследования структуры поля подповерхностной ГВ в контролируемом металле. На рис. 32 представлены известные закономерности для поля подповерхностной ГВ в полубезграничной среде: луч с максимальной амплитудой как бы отжимается от контактной поверхности, распространяется под углом 12–15° к ней, а амплитуда ГВ достаточно быстро убывает с расстоянием.

Исследования в листах толщиной 8–20 мм показали, что в них имеет место концентрация акустической энергии подповерхностной волны в ограниченном объеме, в том числе за счет переотражений на донной поверхности при больших углах падения продольных волн (они как бы скользят над донной поверхностью), как показано в листе и в сварном соединении на рис. 32. Было обнаружено, что при расстояниях 30–40 мм и более от точки выхода излучателя подповерхностная ГВ с максимальной амплитудой распространяется вдоль внутренней поверхности и располагается на высоте 2–5 мм от донной поверхности. Таким образом, вблизи донной поверхности образуется ультразвуковой поток, распространяющийся параллельно донной поверхности. Исследование акустического поля на трубах  $\varnothing 325 \times 15$  мм показало наличие закономерностей, полученных на листах.

Результаты этих исследований и полученные закономерности в значительной мере спо-



Реальные изображения на экране дефектоскопа при выявлении трещины на разных расстояниях

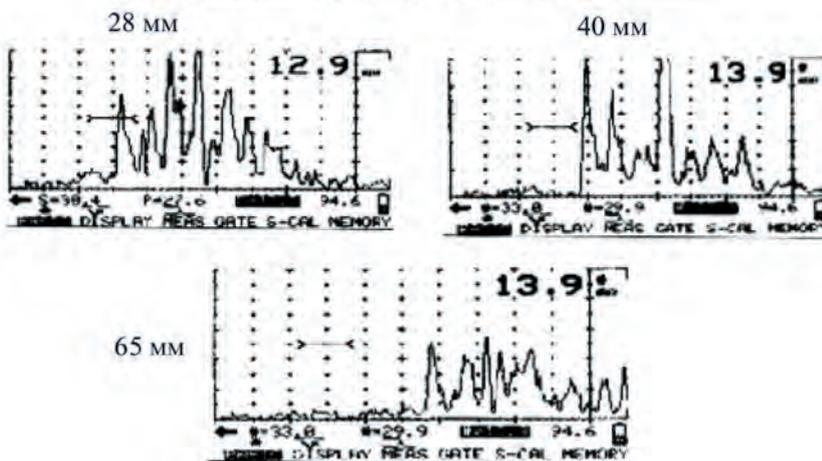


Рис. 34. Дефектоскопия аустенитного сварного соединения толщиной 12–15 мм головными волнами (в стробе импульс ГВ от трещины)

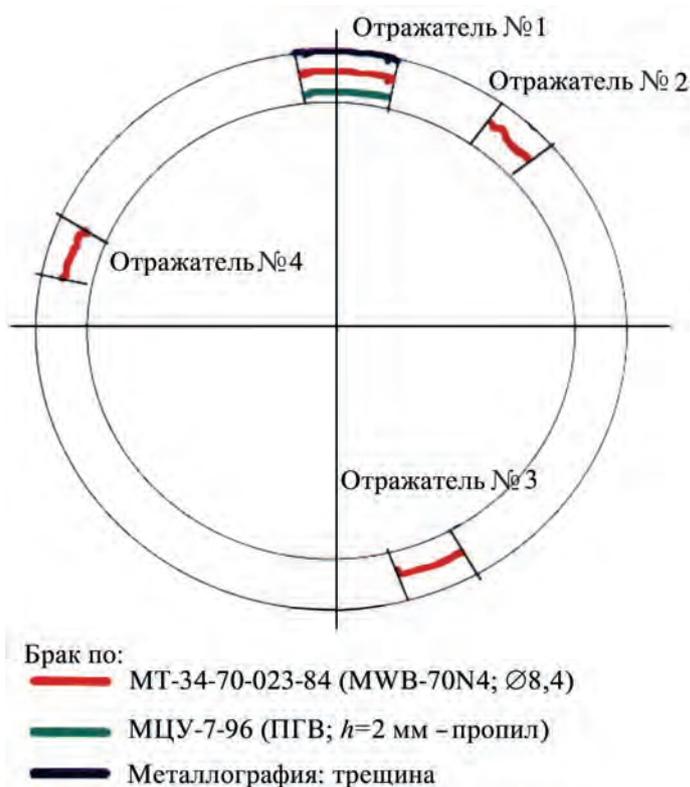


Рис. 35. Дефектограмма УЗК сварного соединения 23М2

способствовали разработке технологии УЗК корневых трещин в сварных соединениях трубопроводов Ду300. На рис. 33 и 34 представлены схемы прозвучивания и результаты измерений зависимости амплитуды эхо-сигнала ГВ от трещины различной высоты в функции расстояния между искателем и отражателем. На рис. 33 показаны зависимости при прозвучивании через основной металл, когда трещина расположена со стороны кромки шва, ближней к искателю. Анализ полученных зависимостей показал, что при выявлении корневых трещин высотой 2 мм и более имеется возможность обнаружения трещин с соотношением сигнал/шум 12 дБ и более при прозвучивании как через основной металл, так и через сварной шов.

Результаты показали, что предложенный способ УЗК позволяет:

- обнаруживать корневые трещины различной высоты в

сварных соединениях аустенитных трубопроводов и сосудов, выполненных по рекомендуемой технологии;

- обнаруживать корневые протяженные (более 10 мм) трещины высотой 1 мм и более;
- использовать при УЗК несколько информативных признаков, а именно: амплитуду эхо-сигнала; условную протяженность трещины; эквивалентную высоту трещины, определяемую через условную ширину отражателя как разницу расстояний между искателем и отражателем при различных уровнях чувствительности (или при различных амплитудах эхо-сигнала) для оценки высоты корневой трещины.

В процессе исследований возможности УЗК ГВ АСС трубопроводов Ду300 на образцах была выявлена специфическая особенность данной технологии УЗК. На рис. 34 показаны схема хода лучей в контролируемой трубе, экран

дефектоскопа и реальные изображения сигналов от трещины при различных расстояниях искателя от сварного шва. Особенность состоит в том, что наряду с эхо-сигналом подповерхностной ГВ, а он, как мы и предполагали, располагается ближе всех к зондирующему импульсу, имеют место сопровождающие его импульсы других головных, продольных и поперечных волн, которые распространяются по различным траекториям, показанным на рис. 34. Научиться правильно настраивать дефектоскоп с искателем на настроенном образце (НО) с имитатором трещины и отличать основной сигнал ГВ от сопровождающих на НО и реальном АСС трубопровода, как впоследствии оказалось, являлось одной из главных задач контролера УЗК при освоении новой технологии контроля.

На всех АЭС, где методика предполагалась к применению, осуществлялись специальные работы по определению эффективности и достоверности методики, в особенности эффективности выявления реальных трещин межкристаллитного коррозионного растрескивания под напряжением (МКРПН). На Курской АЭС проведено исследование сварного соединения 23М2 водоопускного трубопровода, вырезанного по результатам РГК. Исследование выполняли с применением разработанного ЦНИИТМАШ проекта «Методика УЗК аустенитных сварных соединений трубопроводов Ø325×15 АЭС с реакторами РБМК» МЦУ-7-96 и «Методике УЗК АСС с толщиной стенки 10–25 мм» МТ 34-70-023-86 [34]. Дефектограмма представлена на рис. 35.

Методика МТ 34-70-023-86 (УЗК поперечными волнами) выявила и забраковала четыре отражателя.

УЗК по методике ЦНИИТМАШ на поисковом уровне чувствительности зафиксировал отражатель № 1 с максимальным

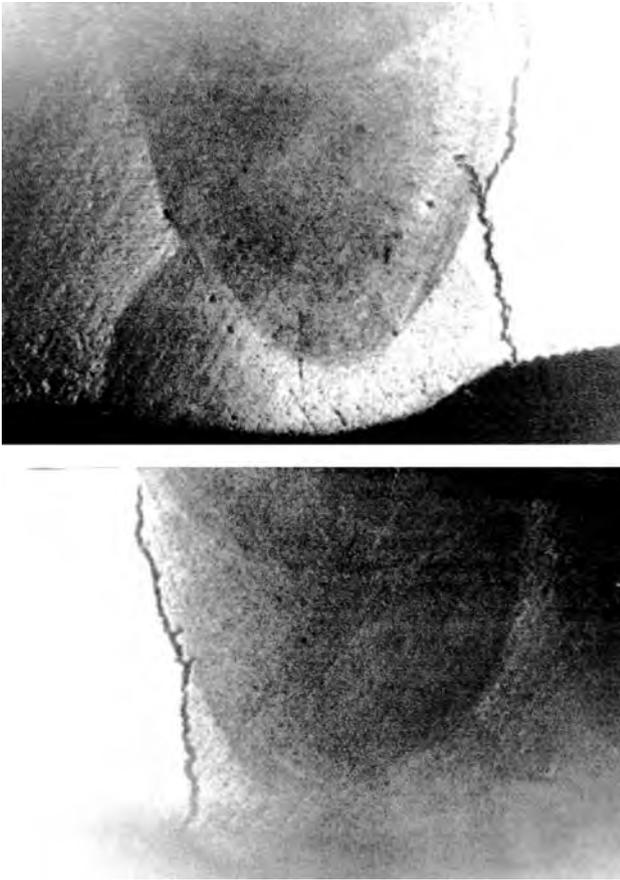


Рис. 36. Несплошности в сечении сварного соединения 23М2 на участке отражателя № 1 (две стороны реза)

превышением по амплитуде на 6 дБ с одной стороны шва и на 4 дБ с другой стороны шва, условная протяженность 37 мм. Отражатель № 2 выявлялся в виде отдельного сигнала (без соответствующего сопровождения другими импульсами) с амплитудой на 4 дБ больше браковочного уровня и условной протяженностью 40 мм. Отражатель № 3 давал эхосигнал меньше поискового уровня, точечный. Отражатель № 4 выявлялся как точечный с амплитудой, равной поисковому уровню. Участок № 1 по способу ЦНИИТМАШ был забракован, участок № 2 был отмечен как участок с повышенным шумом, участки № 3 и 4 не фиксировались.

В результате проведенных металлографических исследований было установлено:

- на участке № 1 выявлена протяженная несплошность (трещина) высотой от 3,1 до 7,0 мм в рассмотренных сечениях (см. рис. 35);
- на участках № 2–4 несплошностей не обнаружено. Анализ результатов УЗК показал:
- возможность ложной браковки сварных соединений при использовании методики МТ 34-70-023–86;
- удовлетворительные результаты контроля при применении способа и методики ЦНИИТМАШ.

Результаты исследований и апробации проекта «Методика УЗК аустенитных сварных соединений трубопроводов  $\varnothing 325 \times 15$  АЭС с реакторами РБМК» МЦУ-7–97 (рис. 36) позволили главному конструктору реакторной установки и концерну «Росэнергоатом» рекомендовать методику МЦУ-7–97 для использования при эксплуатационном контроле сварных соединений трубопроводов РБМК.

В табл. 1 представлены результаты УЗК АСС трубопроводов Ду300 первого блока Курской АЭС. Из таблицы видно, что методика МЦУ-7–97 позволила оценить реальную дефектность сварных соединений и определить объем сварных соединений для ремонта. Заключение по результатам 100%-ного УЗК по МЦУ-7–97 явилось основанием для оценки качества АСС трубопроводов Ду300 и позволило своевременно пустить блок в эксплуатацию.

Наибольшие подготовительные работы были проведены на Чернобыльской АЭС. Информация о разработке новой методики МЦУ-7–97 и отдельные результаты использования ее на АЭС России поступила и в Украину. Работы по реновации третьего блока ЧАЭС проводились за счет Европейского банка реконструкции и развития (ЕБРР). Для обеспечения нормативного использования новой технологии УЗК АСС трубопроводов Ду300 на Чернобыльской АЭС Администрации ядерного регулирования (АЯР) Украины, НАЭК «Энергоатом» и ЕБРР предложили осуществлять работы по двум направлениям.

1. Провести приемочные испытания методики МЦУ-7–97 в соответствии с рекомендациями

Таблица 1. Результаты исследований аустенитных сварных соединений трубопроводов Ду300 первого блока Курской АЭС

Метод контроля		Количество швов, шт.	Брак, шт.	Примечание
Радиография		444 (100%)	14 – непровары, шлак; 5 – трещины; 12 – технические отклонения	Нет трещин с коррозией под напряжением
УЗК	МТ-34-70-023–86	444 (100%)	222 (50%) (по амплитуде, протяженности)	Предположили перебраковку при чувствительности $\varnothing 8,4$ мм
	МЦУ-7–97	226	34 (1 < 100 мм)	Ремонт и допуск по техрешению

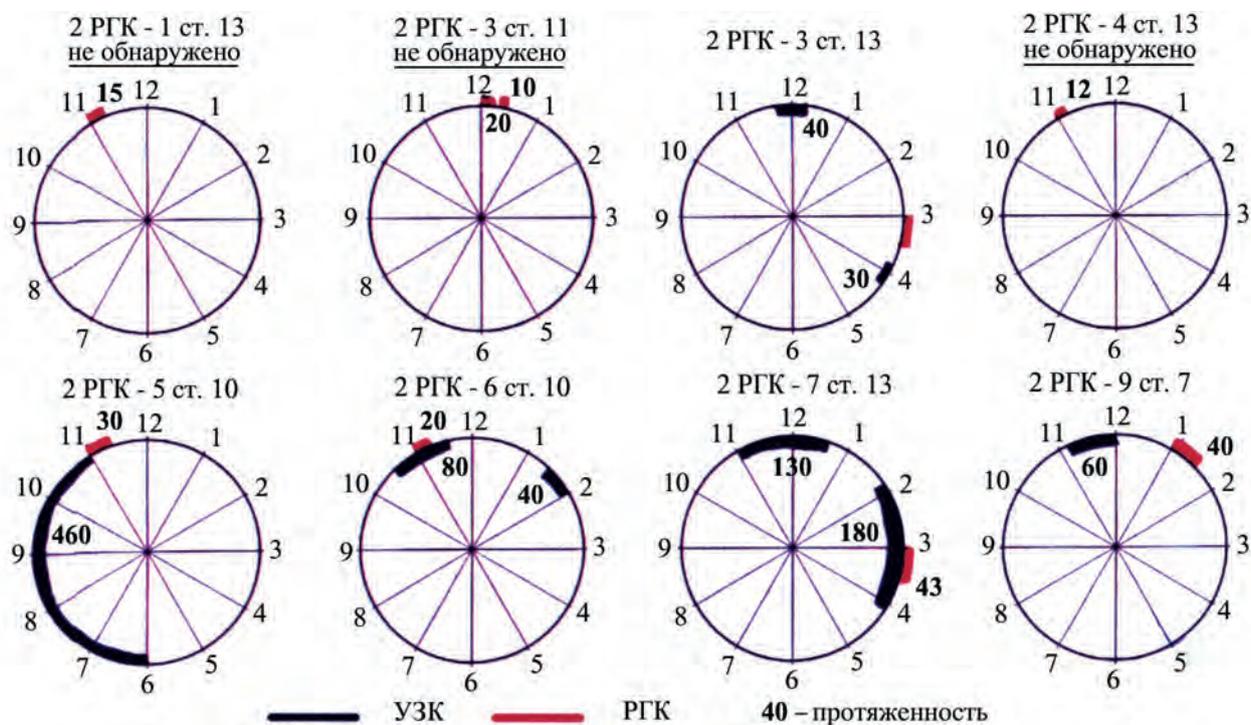


Рис. 37. Расположение дефектов по периметру АСС

Европейского сообщества по неразрушающему контролю ENIQ «Европейская методология по аттестации» [33]. (Отметим, что такие работы проводились впервые на территории бывшего СССР.)

2. Провести опытный экспертный УЗК по методике МЦУ-7–97 на трубопроводах третьего блока ЧАЭС.

Сразу после принятия этого решения из России на ЧАЭС прибыла команда российских контролеров для представления методики и экспертного УЗК АСС трубопроводов Ду300. Контролеры имели аттестацию по МЦУ-7–97 и свежий опыт УЗК на Курской и Смоленской АЭС.

В процессе выполнения экспертного УЗК проходила подготовка, обучение и тренинг контролеров УЗК Чернобыльской и других АЭС Украины. Они были аттестованы и в дальнейшем принимали участие в работах по аттестации методики и по сплошному УЗК. При экспертном УЗК было проконтролировано 135 АСС опускных трубопроводов

и 45 на напорных трубопроводах, не имевших замечаний по результатам РГК.

Результаты УЗК и металлографических исследований:

- из 135 АСС опускных трубопроводов в 19 обнаружены протяженные отражатели;
- из 45 АСС напорных трубопроводов в шести были обнаружены протяженные отражатели;
- выборочные разрушающие испытания темплетов шириной 42–47 мм (долом на разрывной машине), вырезанных на участках расположения по результатам УЗК трещинообразных отражателей, подтвердили наличие трещин различной высоты.

В табл. 2 представлены сравнительные результаты неразрушающего контроля (РГК и экспертного УЗК по МЦУ-7–97) сварных соединений трубопроводов Ду300. Они показали, что, во-первых, при радиографическом контроле возможна значительная перебраковка по количеству дефектных сварных соединений, а во-вторых, воз-

Таблица 2. Сравнительные результаты РГК и УЗК по МЦУ-7-97 АСС трубопроводов Ду300 КМПС 3-го энергоблока ЧАЭС

Метод контроля	Количество СС, где дефектов не обнаружено, шт.	Количество сварных соединений с протяженностью несплошностей, мм					Суммарная протяженность по всем СС	
		50 и менее	51-100	101-150	150-200	>200		Всего
РГК	–	32	11	2	–	–	45	1882
УЗК	6	5	16	8	5	5	39	4945

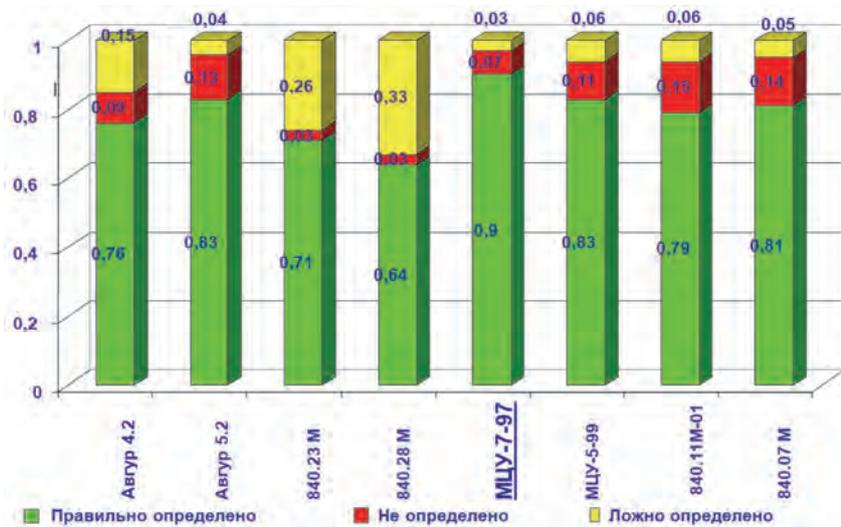


Рис. 38. Сравнительные характеристики выявляемости трещин МКРПН в АСС трубопроводов Ду300 и достоверность контроля (по РД ЭО 0488–03) при использовании методики МЦУ-7–97 и других допущенных к применению

можно недобраковка по протяженности трещин. В последнем столбце таблицы видно, что суммарная протяженность трещин по результатам УЗК более чем в 2,5 раза превышает данные по РГК. Данные по протяженности хорошо иллюстрируются диаграммами расположения дефектов по периметру сварных швов на рис. 37.

В соответствии с положениями Европейской методологии по аттестации [34] была разработана «Программа аттестации «Методики УЗК аустенитных сварных соединений трубопроводов Ø325×15 АЭС с реакторами РБМК» МЦУ-7–97», утверждена руководством НАЕК «Энергоатом» и Чернобыльской АЭС и согласована АЯР МЭБУ. Она определила: цели и задачи аттестации, требования к аттестационной комиссии, требования к тест-образцам, требования к персоналу, этапы аттестации, оценку результатов аттестации.

По результатам работы аттестационная комиссия решила:

- применение методики обеспечивает выявление трещин МКРПН высотой от 2 мм в реальных сварных соединениях и несплошностей в виде искус-

ственных отражателей высотой от 2 мм и более;

- результаты УЗК, полученные при использовании методики, являются основанием для оценки качества сварного соединения.

Положительные результаты аттестации позволили выполнить и принять результаты сплошного УЗК АСС Ду300 третьего блока Чернобыльской АЭС. Главный инженер ЧАЭС доложил об этом на заседании комиссии ЕБРР в докладе «Повышение безопасности энергоблока № 3 Чернобыльской АЭС в период ремонтной кампании 1997–1998 гг. Основные направления».

Следует особо отметить, что в рамках Комплексной программы Росэнергоатома 2001–2005 гг. были выполнены работы, позволившие обосновать и обеспечить безопасную эксплуатацию аустенитных трубопроводов Ду300 на АЭС с РБМК. НИКИЭТ были проведены работы по экспериментальной оценке достоверности методик контроля, допущенных Ростехнадзором, Росэнергоатомом и главным конструктором РБМК для УЗК АСС трубопроводов Ду300 и используемых

на АЭС. Работы были выполнены в рамках «Программы экспериментальных испытаний «30 катушек» на образцах сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 с реальными дефектами, вырезанными на АЭС с РБМК-1000 без привлечения ЦНИИТМАШ. На рис. 38 представлены результаты работ по этой программе [35]. Они продемонстрировали существенные преимущества методики МЦУ-7–97 в сравнении с другими методиками ручного, полу- и автоматизированного контроля. Несомненно, эти преимущества связаны с тем, что методика МЦУ-7–97 основана на применении продольных волн головного типа.

### 7.5. Ультразвуковой контроль трещинообразования под антикоррозионной аустенитной наплавкой на сосудах и трубопроводах

Правила контроля устанавливают объем неразрушающего контроля наплавки и нормы допустимых дефектов. В частности, для антикоррозионной наплавки корпуса реактора правилами предусматривается проведение УЗК зоны сплавления наплавки с основным металлом, внешнего осмотра и капиллярной дефектоскопии поверхности наплавки. Трещины во всех случаях не допускаются, а размеры других дефектов наплавки регламентируются нормами Правил контроля.

В начале 1970-х гг. в литературе появились сведения о трещинах, расположенных в зоне сплавления антикоррозионной наплавки с основным металлом. Результаты исследований [36] показали, что в целом трещинообразование под антикоррозионной аустенитной наплавкой является составной частью общей закономерности образования трещин в сварных соединениях при термической обработке. Об-

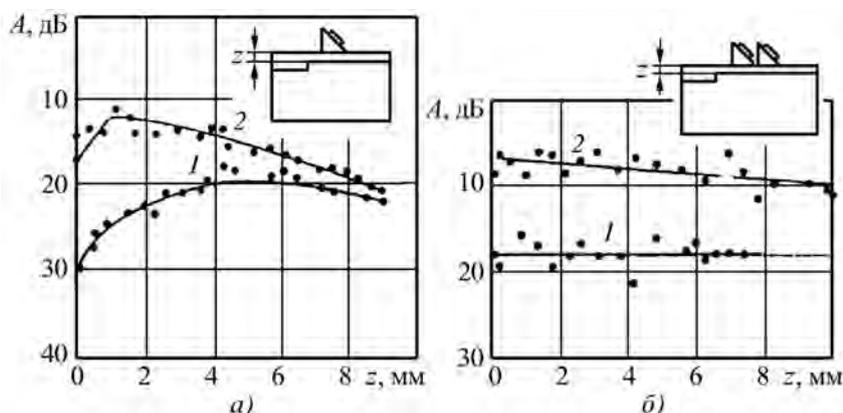


Рис. 39. Зависимости амплитуды эхо-сигнала головной волны от толщины аустенитной наплавки для искателей ИЦ-70 (а) и ИЦ-61 (б): 1 – для отражателей диаметром 2 мм; 2 – диаметром 4 мм

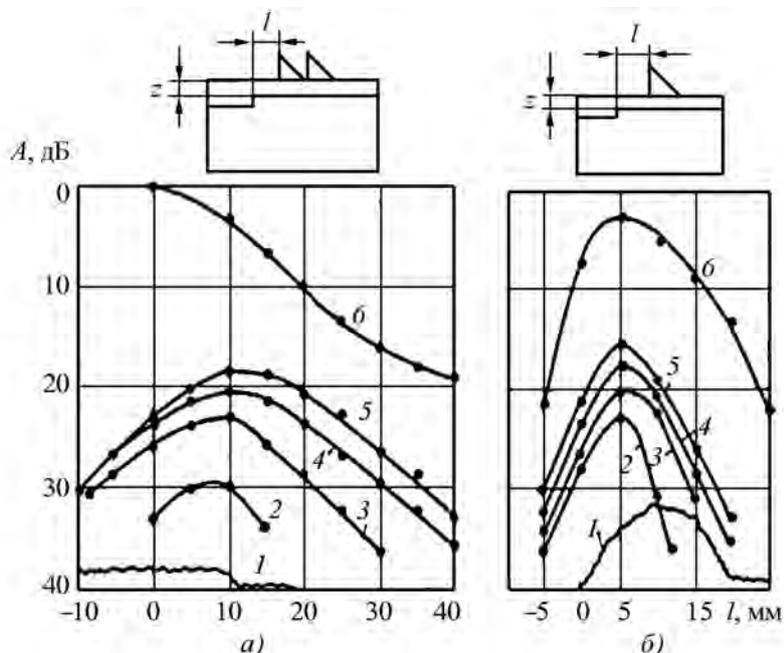


Рис. 40. Изменение амплитуды эхо-сигнала ГВ от дефекта под аустенитной наплавкой и уровень шумов в зависимости от расстояния между искателем и отражателем при толщине наплавки 5, 6 мм: а – ИЦ-61; б – ИЦ-70; 1 – шум; 2–5 – цифры соответствуют величине диаметра отражателя; 6 – донный сигнал

разование трещин было обнаружено под наплавкой, выполненной и лентой, и электродами. Как правило, трещины возникали в переходной зоне основного металла под перекрытиями двух рядом лежащих валиков. Непосредственно после наплавки трещины не образуются, они возникают лишь в процессе последующей термической обработки наплавленного элемента. Размеры

таких трещин лежат в пределах от незначительных граничных разделений между зернами до максимально встречающихся (длиной от 8 до 10 мм и высотой от 2 до 3 мм). Трещины ориентированы под определенным углом к направлению наплавки, обычно в пределах от 45 до 90°.

Наряду с выбором исходных материалов, параметров наплавки и термообработки, исключая

ших появление трещин в зоне сплавления антикоррозионной наплавки с основным металлом, встал вопрос о разработке метода неразрушающего контроля, позволяющего обнаруживать такие трещины. Для решения задачи обнаружения трещин под антикоррозионной наплавкой ЦНИИТМАШ предложил использовать головные волны (ГВ).

Возможность выявления трещин под наплавкой ГВ с помощью искателей ИЦ-61 и ИЦ-70 изучали на образцах [37]. Трещины в зоне сплавления наплавки с основным металлом имитировали дном плоскодонного отверстия, которое располагалось перпендикулярно линии сплавления. Контактной поверхностью являлась поверхность наплавки.

Наряду с амплитудой эхо-сигналов от отражателей измеряли уровень шумов. На рис. 39–41 представлены графики, характеризующие выявляемость трещинообразных дефектов под антикоррозионной наплавкой искателями ИЦ-61 и ИЦ-70 на частоте 1,8 МГц. Результаты показали способность и возможности с помощью ГВ обнаруживать трещины под наплавкой толщиной от 0,1 до 10,0 мм.

Изменение амплитуды эхо-сигналов от отражателей диаметром 2 и 4 мм в зависимости от толщины наплавки показано на рис. 39. Различный качественный характер зависимостей амплитуды от толщины наплавки (рис. 40) обусловлен конструкцией искателей и структурой акустического тракта. При использовании ИЦ-61 («тандем») ГВ падает на подповерхностный отражатель, отражается от всей поверхности плоскодонного отражателя и принимается приемником, расположенным после излучателя. На рис. 39, б точками представлены значения максимальных эхо-сигналов для каждой толщины наплавки. Имеют место значительные флуктуации

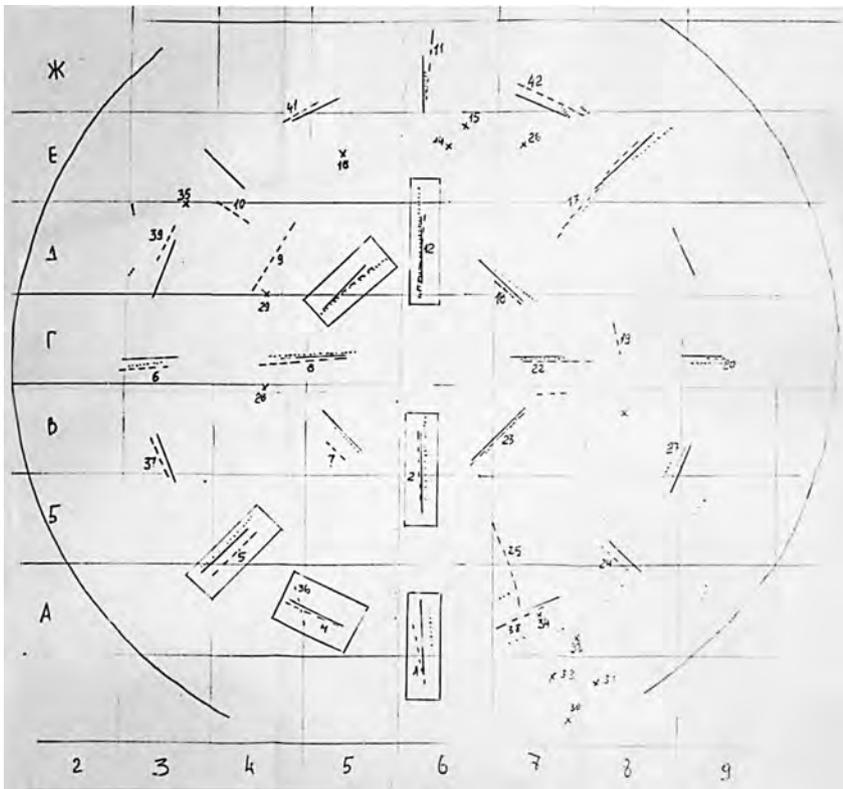


Рис. 41. Дефектограмма УЗК биметаллической плиты с поднаплавочными трещинами (прямоугольниками выделены несплошности, подвергшиеся металлографическим исследованиям)

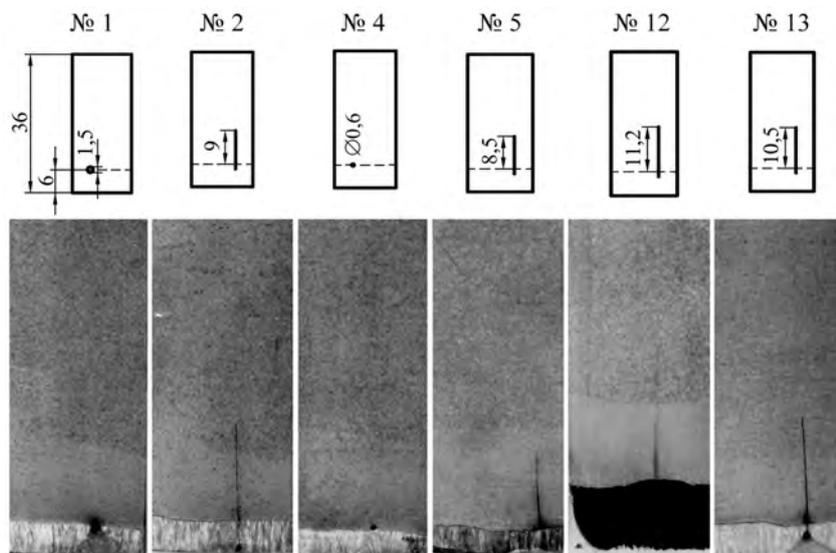


Рис. 42. Форма, ориентация и размеры выявленных несплошностей

амплитуд максимальных эхо-сигналов от отражателей на разной глубине.

ИЦ-70 обладает большей чувствительностью по глубине в сравнении с ИЦ-61, так как поз-

воляет выявлять отражатели диаметром 2 мм при толщине наплавки 10 мм и менее, но при толщине наплавки от 7 до 10 мм имеет меньшую разрешающую способность по амплитуде между

отражателями от 2 до 5 мм. ИЦ-61 выявляет отражатели диаметром 2 мм при толщине наплавки 8 мм и менее.

Наряду с корпусами реакторов важным оказалось иметь средства и методику УЗК, обеспечивающие выявление поднаплавочных трещин в биметаллических трубопроводах ГЦК Ду850 на АЭС с ВВЭР-1000 и КМПЦ Ду800 на АЭС с РБМК-1000. На рис. 40 показано исследование УЗК ГВ трещин на трубопроводах: изменение амплитуды эхо-сигнала в зависимости от расстояния между искателем и отражателем. Показан также относительный уровень шумов. Эти зависимости аналогичны полученным для перлитных сталей. В то же время при использовании ИЦ-61 имеется большее соответствие между амплитудой эхо-сигнала и размером отражателя и большая разрешающая способность при определении эквивалентного размера и высоты отражателя.

Эффективность и работоспособность методики УЗК ГВ при выявлении поднаплавочных трещинообразных и других несплошностей исследовалась на специально изготовленном испытательном образце с заложенными и выращенными дефектами (рис. 41). Исследования ставили своей целью оценить и сравнить способность различных методик обнаруживать дефекты, определять и выбирать параметры УЗК при выявлении и интерпретации различных несплошностей ГВ и со стороны перлитного металла наклонными искателями поперечных волн с углами ввода 40, 45, 50, 60 и 65°. Из всех дефектов в плите, выявленных при УЗК, выбраны шесть типичных (№ 1, 2, 4, 5, 12, 13, рис. 42).

Металлографические исследования показали, что:

№ 1 – шлаковое включение в зоне сплавления: максимальный размер 1,5 мм;

- № 2 – трещина под наплавкой и шлак в наплавке – 9 мм высота;
- № 4 – мелкое шлаковое включение (Ш0,6 мм) в зоне сплавления (ГВ не выявляется);
- № 5 – трещина под наплавкой высотой 8,5 мм и шлак в наплавке;
- № 12 – трещина под наплавкой высотой 11,2 мм;
- № 13 – трещина под наплавкой высотой 10,5 мм.

Цифры при несплошностях – высота в направлении, перпендикулярном зоне сплавления, по результатам металлографических исследований. При выборе этих несплошностей учитывалось, что все они зафиксированы при УЗК наклонными искателями, пять из них зафиксированы при УЗК ГВ, а один ГВ не фиксировался. Сравнительные ультразвуковые характеристики несплошностей представлены в табл. 3.

УЗК ГВ (правая часть табл. 3) определил несплошности № 2, 5, 12 и 13 как недопустимые (дефекты) по эквивалентному размеру и коэффициенту относительной условной ширины  $K_{ш}$ . С помощью УЗК зафиксирована несплошность № 1 с допустимыми эквивалентным размером и  $K_{ш}$  и не зафиксирована несплошность № 4. Оказалось, что для высоких трещин о размере и глубине их проникновения при УЗК можно судить по коэффициенту относительной условной ширины  $K_{ш}$ . Трещина № 12 распространяется прямолинейно в направлении, перпендикулярном к поверхности образца (наплавки). При увеличении  $\times 500$  наблюдались незначительная извилистость и изредка ответвления протяженностью 20–60 мкм. Трещина не была обнаружена непосредственно при вскрытии, травлении и визуальном осмотре. Наличие такой высоты трещины в перлитном металле было установлено только после исследования образца под микроскопом, что связано с малым раскрытием трещины.

Несплошности № 2, 5 и 13, так же как и № 12, при вскрытии оказались вертикальными трещина-

ми (рис. 42). Несплошность № 1 при вскрытии представляла собой шлаковое включение в зоне сплавления наплавки с основным металлом. Несплошность № 4, которая не была зафиксирована УЗК ГВ, оказалась мелким шлаковым включением. Размеры и форма всех несплошностей на шлифах показаны на рис. 42. Таким образом, исследования показали, что УЗК ГВ обеспечивает эффективное выявление трещин под аустенитной наплавкой, а также позволяет судить о типе и размерах дефектов под наплавкой по амплитуде сигнала и коэффициенту относительной условной ширины. Полученные результаты показали эффективность УЗК ГВ при выявлении трещин под наплавкой и возможность отстроиться от несущественных несплошностей. ЦНИИТМАШ разработана технологическая инструкция «Ультразвуковая дефектоскопия ГВ сварных соединений трубопровода ГЦК Ду850 ВВЭР-1000 (трещины под наплавкой)». Она используется при изготовлении, монтаже и предэксплуатационном контроле ВВЭР-1000 в России и за рубежом.

### 7.6. Головные волны в ДВМ и TOFD

В разделах 7.1–7.5 представлены работы по развитию эхо-метода УЗД головными волнами. Следует отметить также работы по использованию ГВ в режиме прозвучивания (тенево́м). Они приведены при исследовании законов возбуждения, приема и ослабления ГВ. Исследования прохождения ГВ в антикоррозионной наплавке показали, что ГВ могут быть возбуждены в изделиях с аустенитной наплавкой и зарегистрированы на расстоянии от 200 до 300 мм от излучателя, почти как в перлитных сталях.

Наряду с этим выявлена важная особенность закономерности изменения амплитуды ГВ с расстоянием, которая заключается в наличии ярко выраженных минимума и максимума в зависимости амплитуды от расстояния. Более того, установлено, что расстояние между излучателем и приемником,

**Таблица 3. Сравнительные УЗ-характеристики несплошностей**

Номер несплошности	УЗК наклонными поперечными волнами				УЗК головными волнами			
	Эквивалентная площадь $S_{э(маx)}$ , мм <sup>2</sup>	Угол ввода, °	$S$ , мм <sup>2</sup> , при угле ввода, °		Максимальная амплитуда в сравнении с имитатором трещины ( $\varnothing 4$ мм), $S = 12$ мм <sup>2</sup> , $A_{маx}/A_{деф}$	Эквивалентная площадь $S_э$ , мм <sup>2</sup>	Кoeffициент относительной условной ширины $K_{ш}$	
			50°	65°			Сторона	
						1	2	
1	10,0	65	4,0	10,0	+3 дБ	9	0,36	0,68
2	10,0	45	6,4	5,6	+8 дБ	27	0,92	1,56
5	10,0	60	8,8	8,8	+13 дБ	50	1,28	1,64
12	7,2	65	6,4	7,2	+7 дБ	25	1,24	1,16
13	7,2	65	4,0	7,2	+13 дБ	50	1,36	1,48
4	2,8	50	2,8	-	Не зафиксировано	-	-	-

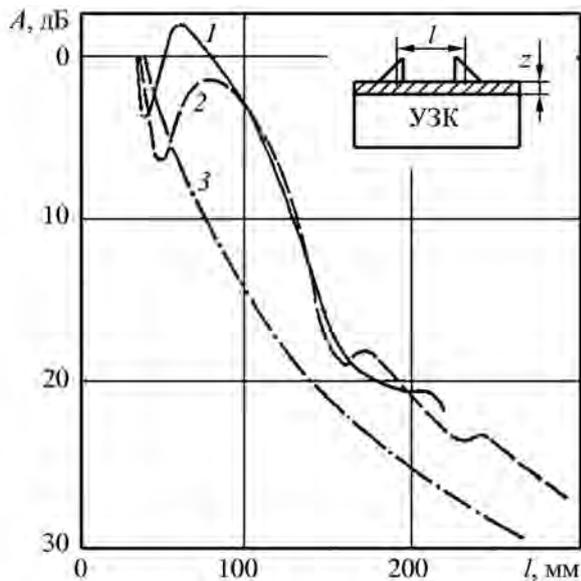


Рис. 43. Изменение амплитуды ГВ при распространении в изделии с аустенитной наплавкой: 1 –  $z = 8$  мм; 2 –  $z = 11$  мм; 3 – перлитная сталь;  $z$  – толщина наплавки; И – излучатель ГВ; П – приемник ГВ; на вставке схема прозвучивания

при котором имеет место минимум (или максимум), находится в прямой зависимости от толщины наплавки: большей толщине наплавки соответствует большее расстояние между излучателем и приемником в момент достижения максимума (минимума) (рис. 43) [37]. Наличие максимума и минимума связано с тем, что скорость ультразвука в аустенитной наплавке меньше, чем в основном металле. Подобное распределение скоростей создает условия, аналогичные приповерхностному звуковому каналу в гидроакустике при положительном градиенте скоростей.

В результате этого продольная подповерхностная волна, достигая зоны сплавления, рефрагирует в сторону среды с меньшей скоростью звука, т.е. в сторону поверхности наплавки. При выходе на поверхность она регистрируется приемником с соответствующим увеличением (уменьшением) амплитуды сигнала ГВ, которая достигает максимума (минимума) при сложении подповерхностной волны прямого прохождения и рефрагированной волны. Расстояние между излучателем и приемником в момент достижения максимума (минимума) прямо связано с толщиной наплавленного слоя. Позже тот же эффект обнаружен при исследовании закаленного слоя валков холодной прокатки [38].

Особенно полезным и эффективным оказалось совместное в одном методе использование ГВ и дифракционно-временного метода (ДВМ) (рис. 44) [39]. В нем для слежения за параметрами УЗК в качестве опорного сигнала используют им-

пульс ГВ, возбуждаемый лучом диаграммы направленности излучателя, падающим на поверхность контролируемого элемента под первым критическим углом одновременно с частью пучка, озвучивающим зону контроля и трещину. Ранее ЦНИИТМАШ зарегистрировал такой способ УЗК а.с. № 502311 (рис. 44, б), а МНПО «Спектр» на его основе разработал УЗ-толщиномер (рис. 44, в).

Теперь сравним первый (см. рис. 1) и последний (см. рис. 44) рисунки настоящей статьи. Мы видим, что круг замкнулся: та схема прозвучивания, которая была использована при исследовании акустических свойств металла в 1972 г. и привела к обнаружению неизвестных в УЗД металлов быстрых головных волн, полностью повторяется (красные линии на рис. 44, а) в современной технологии УЗК. Но сейчас мы знаем о головных волнах очень и очень много!!! И много для этого сделали.

### Заключение и приоритет СССР и России

Здесь представлена история обнаружения, результаты исследований закономерностей и становления физики, терминологии, технологии ультразвукового контроля головными волнами. В ней показано, что ЦНИИТМАШ был первым при:

- обнаружении и идентификации ГВ в металлах;
- исследовании и выявлении закономерностей возбуждения, распространения и приема ГВ;
- разработке физического представления о ГВ;
- разработке и изобретении новых способов УЗК ГВ;
- уяснении и обосновании новой терминологии ГВ как комплекса волн;
- обосновании и разработке концепции построения конструкций искателей головных волн в виде «тандем» и «дуэт»;
- исследовании технологических особенностей УЗК ГВ различных объектов энергомашиностроения и энергетики;
- разработке пионерских методик, инструкций и технологий УЗК ГВ, обосновании их эффективности и работоспособности;
- обосновании включения новых технологий и методик УЗД ГВ в методические документы, основные положения, отраслевые и государственные стандарты по НК;
- разработке технологий изготовления специализированных искателей ГВ, обеспечении ими заводов, предприятий, электростанций и компаний;
- обучении и тренинге специалистов и контролеров, оказании помощи во внедрении и использовании методик контроля на различных объектах и предприятиях;
- распространении новых научных знаний и опыта через публикации, выступления на конференциях и выставках, семинарах и совещаниях.

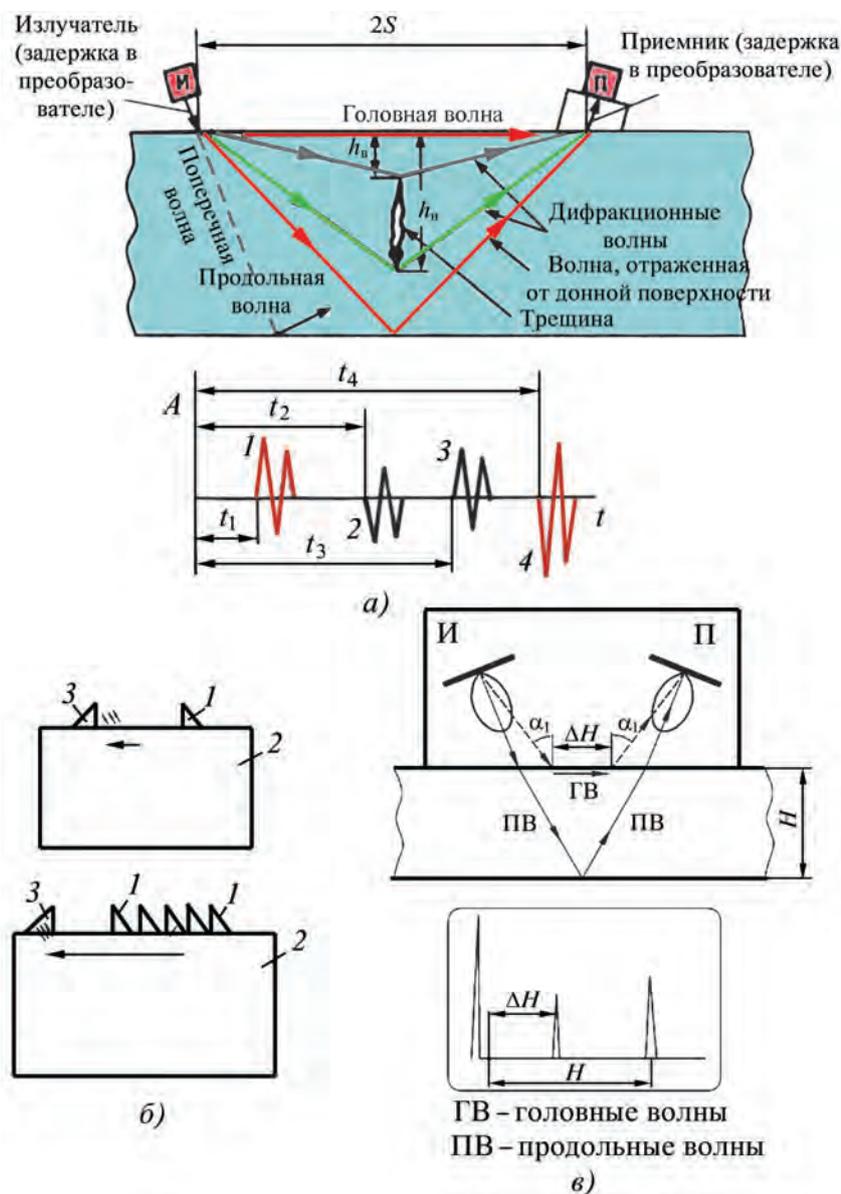


Рис. 44. Применение ГВ и сравнение способов УЗК: а – дифракционно-временной метод + ГВ (ТОFD); б – способ УЗК по а.с. 502311; в – безталонный способ УЗ-толщинометрии; ГВ – головная волна; ПВ – продольные волны;  $t$  – время распространения импульсов;  $S$  – половина расстояния между точками выхода излучателя и приемника;  $h$  – глубина залегания верхнего и нижнего краев трещины;  $H$  – толщина детали; 1, 2, 3 – искатели УЗК (а.с. 502311)

В заключение отметим и сравним первые доклады, патенты (авторские свидетельства) и публикации специалистов СССР (России) и Федеративной Республики Германии как наиболее передовых стран по УЗ-дефектоскопии металлов в 1970–1990 гг.

#### А. Авторские свидетельства и патенты

1. Первое а.с. СССР № 491092 с приоритетом от **1 июня 1973 г.** на «Способ ультразвукового контроля качества материалов», авторы: Н.П. Разыграев, И.Н. Ермолов, В.Г. Щербинский, Бюл. изобр. 1975. № 41.

2. Патент ФРГ № 2802278 с приоритетом от **15 января 1981 г.** на «Способ и устройство для неразрушающего контроля приповерхностного слоя», авторы: Х. Вюстенберг, А. Эрхард, В. Мехрле.

#### Б. Доклады на конференциях

1. Первый (пионерский) доклад СССР на VII Всесоюзной конференции «Неразрушающий контроль материалов изделий», **Киев, 1974 г.**: Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. «О выявлении подповерхностных дефектов ультразвуковым методом» (Труды конференции).
2. Доклад ФРГ на 9-й Всемирной конференции по неразрушающему контролю в **Мельбурне, Австралия, 1979 г.**: Wuestenberg H., Erhard F., Mundry E., Schulz E. Improved techniques for the ultrasonic inspection of welds (Улучшенные методики для УЗК сварных соединений).

#### В. Первые публикации по физике и технологии

##### 1. СССР (Россия):

- Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. Использование волн головного типа для УЗК // **Дефектоскопия. 1978. № 1. С. 33.**
- Разыграев Н.П. Экспериментальные исследования продольных подповерхностных волн и применение их для обнаружения подповерхностных дефектов в деталях энергетических установок: **дис. ... канд. техн. наук. М.: ЦНИИТМАШ, 1979.**

##### 2. Германия:

- Erhard A., Wuestenberg H., Schulz E., Mundry E. Anwendungen der longitudinalen Kriechwelle in der zerstörungsfreien Prüfung mit Ultraschall und Erfahrungen beim Einsatz von Kriechwellenprüfköpfen // **Materialprüfung. 1982. V. 24. P. 43–48.**
- Erhard A., Kroning M. Erzeugung, Ausbreitung und Anwendung von

Ultraschall-Kriechwellen // *Materialprüfung*, 1984. V. 26, No. 9. VDI-Verlag GmbH, P. 323–326. (Эрхард А., Кренинг М. Генерация, распространение и применение ультразвуковых ползучих волн).

#### Г. Независимый эксперт

Krautkramer J., H. *Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Funfte, Neubearbeitete Auflage. Berlin – Heidelberg: Springer-Verlag, 1986. 752 S.*

- Ссылки в журнале «Дефектоскопия» на статьи по ГВ в СССР № 411 (1979 г.), 412 (1978 г.), 413 (1978 г.), 1240 (1981 г.);
- Ссылки в журнале *Materialprüfung* на труды по ГВ (creeping wave) в ФРГ № 400 (1982 г.). 395 (1984 г.)

#### Д. Награды за результаты работ по ГВ

- СССР – премия Минэнергомаш – 1974 г. Н.П. Разыграеву молодому ученому за первые исследования ГВ.
- ФРГ – Германское общество NDT, приз и медаль Бертольдса (основатель неразрушающего контроля в Германии) – 1984 г. за исследования (B2) ползучей волны (creeping wave) А. Эрхарду, М. Кренингу.

Сопоставление показывает и подтверждает приоритет СССР во времени в обнаружении, физических исследованиях, разработках, технологической проработке УЗД головными волнами и creeping wave. Исключение – призовой фонд. Здесь можно отдать преимущество призу Германского общества неразрушающего контроля, которым наградили немецких ученых.

В завершение нынешней 50-летней истории головных волн хочу поблагодарить многих соратников и коллег за совместную плодотворную работу. При подготовке к юбилею совместно с А.Н. Разыграевым и с помощью редакции Издательского дома «Спектр» (особая благодарность!!!) была подготовлена и выпущена книга «Головные волны в ультразвуковой дефектоскопии металлов». Надеюсь, настоящая работа послужит нашей науке, поможет коллегам при разработке новых технологий УЗК, молодым ученым, инженерам и дефектоскопистам – в понимании физических процессов в ультразвуковой дефектоскопии металлов. А исследования ГВ продолжаются: д-р техн. наук В.Н. Данилов (АО «НПО «ЦНИИТМАШ») выполнил и опубликовал теоретические исследования УЗ ГВ в металле и вновь показал существование продольной подповерхностной ГВ [40]; а д-р техн. наук В.Г. Шевалдыкин (ООО «АКС») – исследования ГВ, возбуждаемых ЭМА-преобразователем [41].

**СПАСИБО ВСЕМ!**

#### Библиографический список

23. Разыграев Н.П. Основные положения по УЗД сварных соединений котлоагрегатов и трубопроводов тепловых электростанций «Методика дефектоскопии подповерхностной части сварных соединений головными волнами». ОП № 501 ЦД-75. М.: ЦНИИТМАШ, 1977.
24. ОСТ 108.004.108–80. Соединения сварные и наплавки оборудования атомных электростанций. Методы ультразвукового контроля. М.: Минэнергомаш, 1980.
25. Разыграев Н.П. О выявлении подповерхностных дефектов искателями головных волн ИЦ-61, ИЦ-70 // Дефектоскопия. 1981. № 3. С. 97–105.
26. Разыграев Н.П. Некоторые особенности ультразвукового контроля головными волнами // Дефектоскопия. 1982. № 6. С. 36–42.
27. Разыграев Н.П. Обнаружение поверхностных дефектов и дефектов под грубой поверхностью с помощью головных волн // Дефектоскопия. 1982. № 3. С. 21–23.
28. ПК-1514–72. Правила контроля сварных соединений и наплавки узлов и конструкций атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. М.: Металлургия, 1975.
29. Зубченко А.С., Разыграев Н.П., Рунов А.Е. и др. Оценка технологии изготовления и норм качества при ультразвуковом контроле наплавленных антикоррозионных покрытий // Энергомашиностроение. 1988. № 12. С. 16–20.
30. ПНАЭГ-7-010–89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля. М.: Энергоатомиздат, 1990.
31. ПНАЭГ-7-031–91. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Ультразвуковой контроль. Ч. 3. Измерение толщины монометаллов, биметаллов и антикоррозионных покрытий. М.: ЦНИИАтоминформ, 1992.
32. Разыграев А.Н., Разыграев Н.П. Ультразвуковой контроль аустенитных сварных соединений трубопроводов Ду300/ РАН // Дефектоскопия. 2006. № 10. С. 59–71.
33. ENIQ. Отчет № 2, EUR 17229 Ru. Европейская методология по аттестации. 2-е изд. / Генеральный директорат, Объединенный исследовательский центр. ECSC-EEC-EAEC. Brussels–Luxembourg, 1997.
34. МТ 34-70-023–86. Методика УЗК аустенитных сварных соединений с толщиной стенки 10–25 мм в процессе монтажа и эксплуатации атомных станций. М.: ВТИ им. Ф.Э. Дзержинского, 1986.

35. Стрелков Б.П., Арефьев А.А., Ловчев В.Н., Гущев Д.Ф. Анализ результатов ЭНК сварных соединений трубопроводов Ду300 КМПЦ РУ РБМК-1000 // МНТК-2008. Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики. Направление «Материаловедение». 21–23 мая 2008 г. М., 2008.
36. Vinoker A.L., Pense A.W. Review of underclad cracking in pressure vessel components WRS // Bulletin ASME. 1974. No. 197. P. 18–39.
37. Разыграев Н.П. УЗК трещинообразования под антикоррозионной аустенитной наплавкой // Дефектоскопия. 1984. № 2. С. 60–66.
38. Басацкая Л.В. Разработка теории и усовершенствованного метода ультразвукового контроля параметров поверхностного слоя изделий, закаленных токами повышенной частоты: дис. ... канд. техн. наук. М.: ЦНИИТМАШ, 1984. 210 с.
39. EN583-6 Non-destructive testing / Ultrasonic examination / Part 6. Time of fly diffraction as a method for detection and sizing of discontinuities, 2009.
40. Данилов В.Н. О головных и подповерхностных продольных волнах, излучаемых прямым преобразователем, находящимся на свободной плоской поверхности упругой среды // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24, № 4. С. 4–19.
41. Шевалдыкин В.Г. Головная поверхностная продольная акустическая волна: основные свойства и возможности применения // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24, № 7. С. 4–13. ■

# ЖУРНАЛ

## «ТЕРРИТОРИЯ NDT»

*У нашей ТЕРРИТОРИИ нет границ –  
попасть на нее можно ИЗ ЛЮБОЙ ТОЧКИ МИРА.*

В свободном доступе  
НА САЙТЕ  
[www.tndt.idspektr.ru](http://www.tndt.idspektr.ru)



СВЕЖИЙ НОМЕР журнала  
[http://tndt.idspektr.ru/  
index.php/current-issue](http://tndt.idspektr.ru/index.php/current-issue)



АРХИВЫ номеров  
[http://tndt.idspektr.ru/  
index.php/archive](http://tndt.idspektr.ru/index.php/archive)



Редакция: +7 (499) 393-30-25 • [tndt@idspektr.ru](mailto:tndt@idspektr.ru)

### Ответы на кроссворд

**По горизонтали:** 3. Порог. 7. Реверберация. 8. Рэлей. 9. Длительность. 12. Луч. 18. Азотирование. 19. Трансформация. 21. Катастрофа. 24. Баббит. 25. Несплошность. 28. Коллиматор. 29. Бейнит. 30. Раковина.

**По вертикали:** 1. Пора. 2. Снеллиус. 3. Период. 4. Преломление. 5. Свищ. 6. Цикл. 10. Критерий. 11. Оценка. 13. Частота. 14. Зазор. 15. Прожог. 16. Радиоскопия. 17. Стандарт. 20. Мода. 22. Обмотка. 23. Стоунли. 26. Полнос. 27. Сбой.