

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ГОЛОВНЫМИ ВОЛНАМИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ Ду-300 НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Н.П. Разыграев, А.Н. Разыграев

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

В настоящей работе ставилась цель ознакомить читателей с опытом разработки специалистами НПО «ЦНИИТМАШ» УЗК головными волнами трубопроводов из аустенитных сталей, который был применен при оценке состояния трубопроводов Ду-300 на Чернобыльской АЭС. Библиогр. 16, табл. 2, рис. 14.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль (УЗК), трубопроводы, аустенитная сталь, продольная волна, поперечная волна, головная волна (ГВ), поверхностная волна, сварное соединение, методика контроля, межкристаллитное коррозионное растрескивание под напряжением, трещина

В 1986–1987 гг. на АЭС с РБМК-1000 впервые были обнаружены и идентифицированы повреждения вследствие межкристаллитного коррозионного растрескивания под напряжением (МКРПН) в сварных соединениях водоуравнительных трубопроводов барабан-сепараторов РБМК. В те годы эффективной и работоспособной методики УЗК для выявления дефектов МКРПН не существовало.

На Чернобыльской АЭС в 1987 г. было проведено опытное исследование возможности применения УЗК методом ГВ для выявления трещин МКРПН в сварных соединениях трубопроводов из аустенитных сталей (АСС) Ду-300 (325×12 мм). Исследования проводилось на специальной катушке (отрезке трубы) с реальным сварным соединением, в котором предположительно имелась трещиноподобная несплошность, с помощью искателя ГВ ИЦ-91 («тандем»).

Следует отметить, что ещё на самых ранних этапах исследований УЗК ГВ при разработке первой методики контроля было отмечено наличие различных паразитных сигналов при УЗК изделий, элементов и сварных соединений толщиной до 30 мм [1, 2]. В «Методике контроля изделий головными ультразвуковыми волнами» 1974 г. (п. 1) не рекомендовалось применять УЗК ГВ при толщине элементов менее 30 мм. Наши исследования всех ГВ [3], возникающих одновременно с первой ГВ (рис. 1), позволили идентифицировать все эти «ложные» сигналы и учесть их в новых современных методиках, способах и операциях УЗК. Так, например, в связи с применением искателя ГВ типа «тандем» ИЦ-91 была разработана новая технология УЗК «корневой тандем» для выявления дефектов вблизи и на донной поверхности. В этом способе была исследована поперечная волна (рис. 2), возбуждаемая в стали под третьим критическим углом (она намного мощнее, чем ГВ), а затем использована

© Н.П. Разыграев, А.Н. Разыграев, 2021

ещё более мощная поперечная волна с углом ввода $\sim 35^\circ$, возбуждаемая падающей под углом $\sim 29 \dots 30^\circ$ продольной волной с максимальным коэффициентом прохождения в сталь (рис. 2, а).

Позднее при разработке методики УЗК сварных соединений биметаллических трубопроводов Ду-850 искатель КТ-35 был переработан в КТ-45 с углом ввода поперечной волны 45° , который обеспечил возможность выявления поднаплавочных трещин с наружной поверхности трубопровода (рис. 2, б). Эта методика УЗК была включена в ПНАЭГ-7-30-91 [4].

Первичные исследования УЗК ГВ на трубе толщиной 12...15 мм на Чернобыльской АЭС вновь продемонстрировали существенные сложности при расшифровке множества сигналов УЗК от отражателей в АСС. Определенный оптимизм появился при обследовании и фиксации сигналов ГВ на участке, где предположительно располагалась трещина. Быстро создать методику выявления трещин в АСС трубопроводов Ду-300 с помощью УЗК ГВ не удалось. Первичные исследования показали

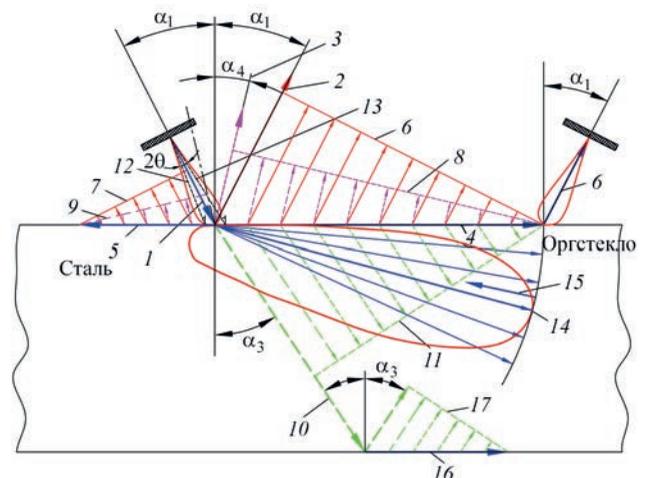


Рис. 1. Образование волн на границах раздела и вблизи них при критических и околочитических углах

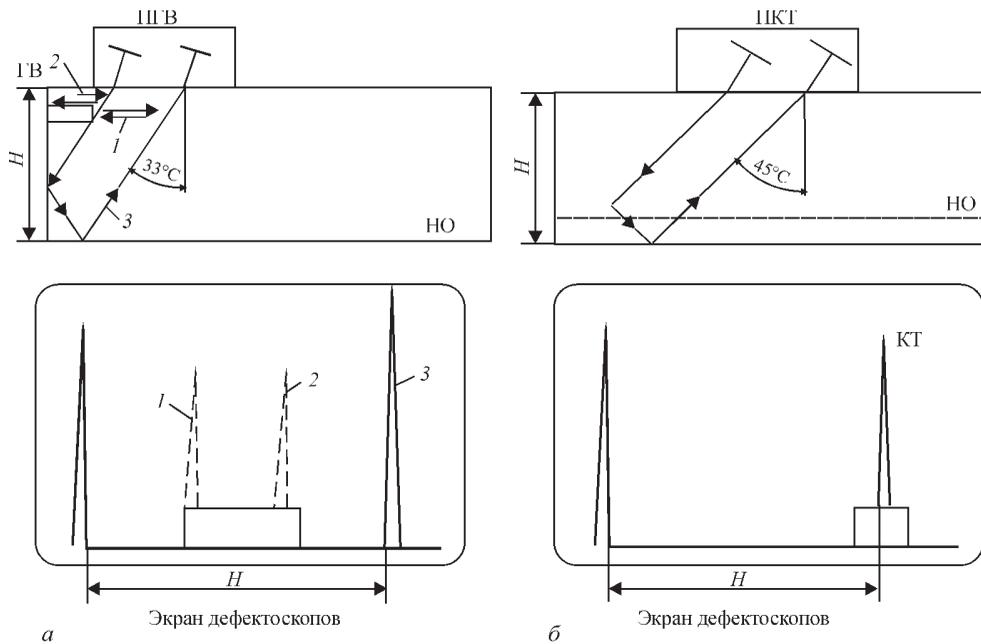


Рис. 2. Схемы УЗК и выявления дефектов в подповерхностном слое и под аустенитной антикоррозионной наплавкой: *а* – головными волнами; 1 и 2 – ход лучей и эхо-сигналы ГВ соответственно от дна плоскдонного отверстия (НО); 3 – ход лучей и сигнал поперечной волны (ПГВ) по схеме «корневой тандем» (КТ); *б* – ход лучей по схеме «корневой тандем» КТ-45 поперечными волнами (ПКТ) при выявлении поднаплавочных трещин при УЗК снаружи трубопровода или сосуда

необходимость проведения специальных исследований и разработки новой методики УЗК.

На новом этапе работ по УЗК АСС Ду-300 совместные изыскания с конструкторами и эксплуатационниками АЭС с РБМК-1000 показали:

- трещины МКРПН инициируются на внутренней поверхности сварных соединений вблизи линии сплавления и распространяются на расстоянии 0,7...1,0 мм вглубь сечения и в кольцевом направлении по окружности трубы;
- трещины, берущие начало как бы в одной точке (на расстоянии 1,5 мм от линии сплавления в корне шва), «паукообразно» распространяются преимущественно в основной металл и в меньшей степени в металл шва.

Трещинообразование по механизму МКРПН происходит при одновременном присутствии трех основных факторов:

- коррозионно-активной среды с присутствием кислорода в теплоносителе (около 30 мкг/кг);
- узкой чувствительной зоны (балл 1-3 зерна аустенита) вследствие повышенного тепловложения от многопроходной сварки;
- высоких растягивающих напряжений и наличия концентраторов на внутренней поверхности сварного соединения [5].

На рис. 3 представлена трещина МКРПН, выявленная УЗК ГВ после металлографического исследования сварного соединения опускного трубопровода. Выявленные кольцевые трещины инициируются в околошовной зоне (ОШЗ). Они имеют весьма слабое раскрытие, ветвистый характер и тонкие ответвления от магистральной

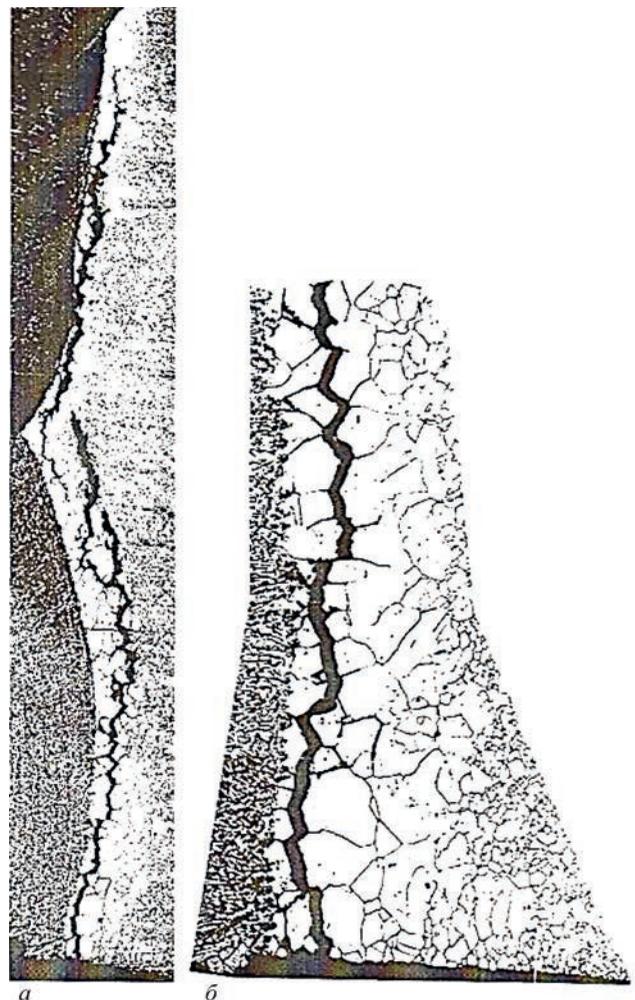


Рис. 3. Трещина МКРПН после металлографического исследования аустенитного сварного соединения опускного трубопровода: общий вид трещины и структуры металла АСС (*а*), начало трещины (*б*)

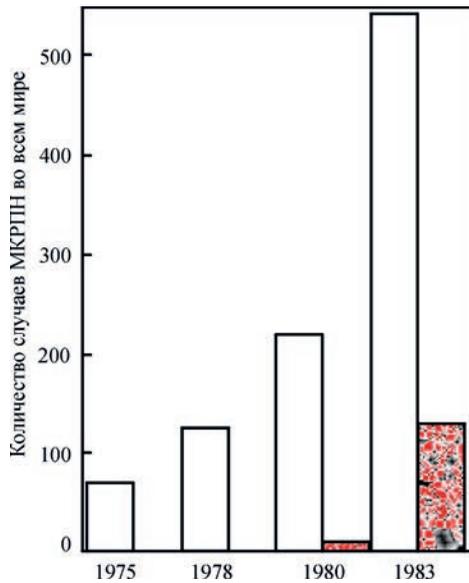


Рис. 4. Количество наблюдавшихся повреждений на трубопроводах реакторной установки типа ВВР в начальный период проявления механизма МКРПН: □ – для всех трубопроводов; ■ – для всех трубопроводов свыше 20 дюймов (510 мм) трещины. Высота трещин может достигать 2/3 толщины трубы. На участках с трещинами металл в ОШЗ имеет крупнозернистую структуру (балл 1, 2, 3), образовавшуюся под воздействием термического цикла многопроходной сварки. Такая структура границы обуславливает образование эхо-сигналов поперечной волны из-за их отражения от границы зерен с различным размером. Эти

паразитные сигналы поперечных волн от структурных неоднородностей металла при отсутствии несплошностей объясняют физическую суть невозможности качественной УЗД аустенитных сварных соединений поперечными УЗ волнами.

Следует отметить, что на АЭС западных стран и Японии с реакторами ВВР с проблемой растрескивания сварных соединений трубопроводов, изготовленных из аустенитных сталей, столкнулись в начале 70-х г. XX ст. [6]. В Германии впервые трещины были замечены на втором блоке Дрезденской АЭС в 1994 г. [7]. На АЭС США проблема коррозионного растрескивания имела большие масштабы. В среднем 25 % сварных соединений имели показания на наличие трещины, причем на некоторых блоках уровень дефектности доходил до 50 % [8]. Количество наблюдавшихся повреждений на трубопроводах реакторных установок ВВР в начальный период проявления механизма показано на рис. 4 [9].

На АЭС РФ проблема трещинообразования в сварных соединениях трубопроводов 325×16 мм (Ду-300) реакторов РБМК-1000 остро встала в начале 1997 г. Сначала множественные трещины были выявлены на опускных трубопроводах Ленинградской АЭС, затем на Курской АЭС.

В 1997 г. в связи с массовым появлением трещин в трубопроводах Ду-300 концерн «РОСЭНЕРГОАТОМ» поставил вопрос о разработке эффективной методики УЗК на АЭС.

Конструкционные элементы подготовки кромок свариваемых деталей согласно рекомендациям ОП 1513-72 и ПНАЭГ 7-009-89

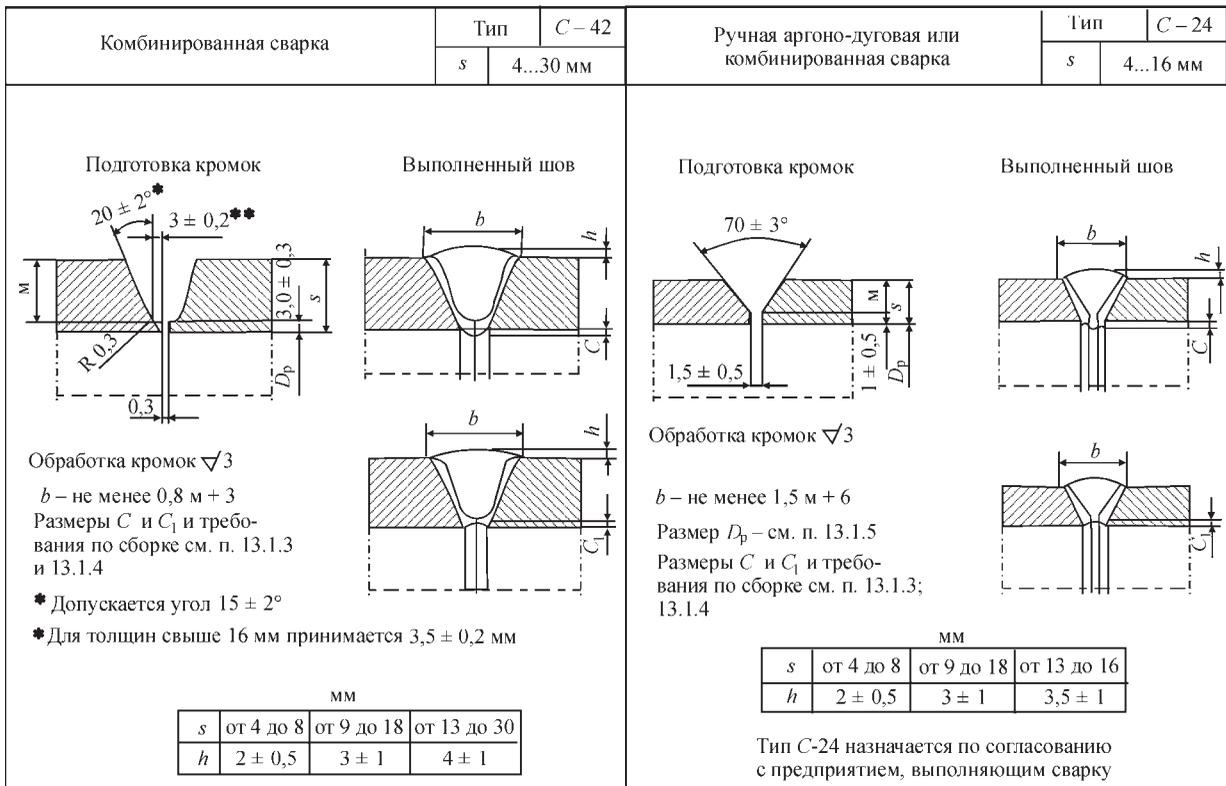


Рис. 5. Конструкции сварных соединений трубопроводов Ду-300 в соответствии с рекомендациями ОП 1513-72 и ПНАЭГ-7-09-89

Исследования и анализ показали, что основные сложности УЗК АСС трубопроводов Ду-300 состоят в следующем:

- высокий уровень радиационного фона, что предполагает высокую производительность и простоту методики УЗК из-за невозможности длительного пребывания контролера на объекте;
- сложная конструкция сварного соединения (рис. 5), включающая проточки различных размеров (по ширине и высоте) и углы её скоса на внутренней поверхности, а также возможные технологические отражатели и дефекты в корне шва (провисания, утяжины, несоосность труб);
- сварное соединение имеет сложную крупнозернистую структуру в ОШЗ и в металле шва, нагружено внутренним давлением, усилиями от самокомпенсации труб и оборудования. Кроме того, в нем присутствуют остаточные сварочные напряжения (рис. 6);
- ширина (валика) усиления установлена в диапазоне 16...20 мм, но встречается и больше. Вблизи усиления могут иметь место технологические утяжины и неровности, образованные при механическом удалении брызг от сварки, которые препятствуют созданию качественного акустического контакта искателя с металлом;
- сварные соединения располагаются в различных пространственных положениях, в стесненных условиях (в особенности на напорных трубопроводах), на различной высоте.

В связи с этим перед разрабатываемой технологией УЗК АСС поставили задачи:

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

При выборе способа УЗК руководствовались следующими соображениями. Многочисленные исследования по УЗК сварных соединений из аустенитных сталей показали, что при УЗК попе-

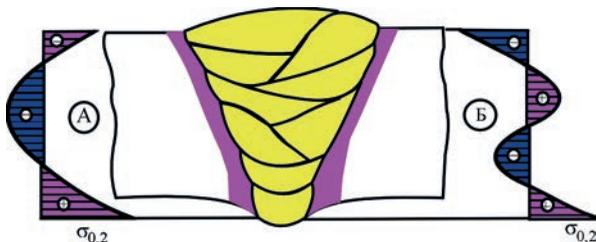


Рис. 6. Схемы распределения остаточных напряжений (σ_y) в ОШЗ сварных соединений, выполненных в несколько проходов (многослойная сварка): стыковое сварное соединение пластин (А), стыковое сварное соединение трубопровода 325×16 мм из стали 08Х18Н10Т (Б)

речными волнами основным препятствием для его применения является перебраковка, связанная с образованием отраженных сигналов от границ зерен, трансформацией волны на этих границах и образованием ложных сигналов. По форме, характеру и времени распространения эти сигналы практически не отличаются от сигналов от несплошностей и технологических отражателей.

Одновременно и параллельно с нашими исследованиями на АЭС Украины и РФ поступали предложения от стран Западной Европы и США на использование их технологий УЗК поперечными волнами. Похожая «Методика УЗК АСС с толщиной стенки 10...25 мм в процессе монтажа и эксплуатации атомных станций» МТ 34-70-023-86 существовала и в СССР. Она была разработана в 1986 г. в московском ВТИ и предложена специалистами Ровенской АЭС для использования на Чернобыльской АЭС и специалистами ВНИИ АЭС – на Курской АЭС.

Изучение опыта применения этих технологий показало, что они, могут быть применены для контроля сварных соединений оборудования и трубопроводов, выполненных из нестабилизированных аустенитных сталей. Это связано с тем, что их растрескивание происходит на расстоянии 2...7 мм от линии сплавления. При таком расположении трещин, выходящих на внутреннюю поверхность трубопровода, они располагаются в основном металле с мелкозернистой структурой и могут быть выявлены при УЗК через основной металл. При прозвучивании через сварной шов использование поперечных волн не эффективно. То есть такая технология может быть рекомендована только для УЗК сварных соединений аустенитных нестабилизированных сталей с двусторонним доступом к ним – для обеспечения выявления трещин с обеих сторон сварного соединения.

НПО «ЦНИИТМАШ» на протяжении многих лет проводил исследования возможности применения продольных волн, в том числе головных, для выявления дефектов (трещин) в аустенитных наплавках и под антикоррозионными наплавками, которые имеют сложную дендритную структуру наплавленного металла и зон сплавления между слоями наплавки и с перлитным металлом. Были разработаны эффективные методики выявления трещин в наплавках и под наплавками в биметаллических сосудах, трубопроводах и их сварных соединениях: корпусах реакторов ВВЭР-1000, трубопроводах ГЦК Ду-850 и КМПЦ Ду-800 и др. [10], новые нормы по УЗК антикоррозионных наплавки [11, 12]. Впервые были разработаны методики определения толщины аустенитных наплавки и плакировок с помощью УЗК (ПНАЭ Г-7-31-91) [13].

С учетом перечисленных факторов и обнаружением новых закономерностей нами вновь пред-

ложено использовать для УЗК сварных соединений трубопроводов Ду-300 продольные волны головного типа. При этом мы опирались на следующие базовые положения:

- при использовании ГВ они распространяются почти по нормали к преимущественной ориентации трещины в сварном соединении. Как известно, при таком взаимодействии волны и отражателя обеспечиваются наилучшие условия для его выявления;

- ГВ имеют максимальную скорость распространения по сравнению с другими волнами. Это обеспечивает наилучшие возможности для интерпретации сигнала о наличии отражателя и его идентификацию;

- 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 от крупнозернистой структуры шва и ОШЗ. Дополнительным фактором, способствующим этому, является то, что колебания волны происходят в направлении её распространения. Эти факторы также являлись предпосылкой для выявления трещин в сварном соединении при наличии одностороннего доступа к сварному шву с помощью прозвучивания через сварной шов;

- до проведения настоящих исследований к негативным факторам мы относили сравнительно

небольшую толщину трубы: 15 или 16 мм, а при наличии проточки 11...12 мм. Считалось, что близость донной поверхности может мешать контролю из-за образования паразитных сигналов в стробируемой зоне контроля. Выше уже отмечено, что в первых методиках УЗК ГВ сосудов, трубопроводов, наплавов с аустенитной структурой рекомендовалось контролировать детали толщиной 30 мм и более, чтобы исключить влияние сигналов поперечных волн, падающих на внутреннюю поверхность под третьим критическим углом.

Важнейшим фактором мы считали правильный выбор конструкции искателя головных волн: «тандем» или «дуэт». С учетом формы и диаметра поверхности трубопровода, ширины контролируемой зоны сварного соединения, возможных неровностей и ям (утяжин) вблизи сварного шва, расположения, ориентации и формы трещин, необходимости прозвучивания в полном объеме всего сварного соединения по толщине (в том числе под усилением шва) и ширине с самого начала мы склонились в пользу схемы «тандем». Были разработаны специализированные искатели ГВ ПГЦ-300. Испытания искателей, последующие результаты исследований и практика контроля и выявления дефектов подтвердили правильность выбора конструкции искателя.

Были проведены дополнительные исследования структуры поля подповерхностной ГВ в кон-

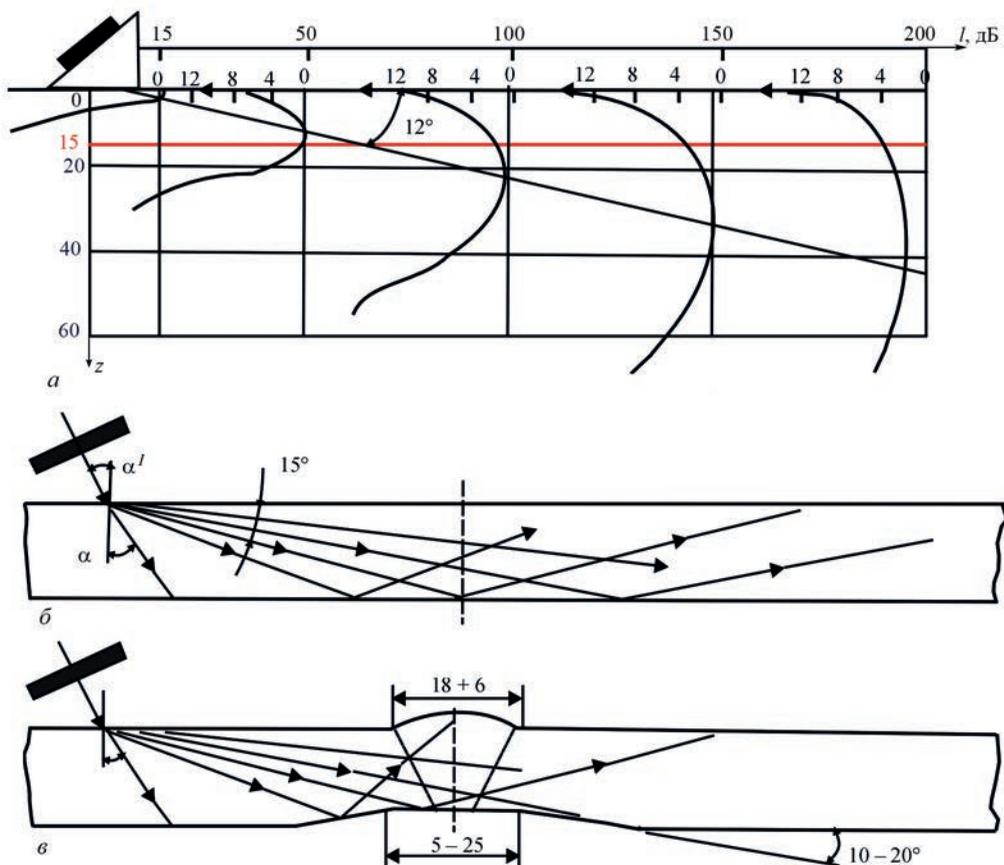


Рис. 7. Структура акустического поля ГВ в полубезграничной среде (а), в листе (б) и в сварном соединении трубопровода (в)

тролируемом металле. На рис. 7 показаны известные закономерности для поля подповерхностной ГВ в полубезграничной среде: луч с максимальной амплитудой как бы отжимается от контактной поверхности, распространяется под углом $12...15^\circ$ к ней, а амплитуда ГВ достаточно быстро убывает с расстоянием [14].

Исследования на листах толщиной $8...20$ мм показали, что в них имеет место концентрация акустической энергии подповерхностной волны в ограниченном объеме, в том числе за счет преотражений на донной поверхности при больших углах падения продольных волн (они как бы скользят над донной поверхностью). Было обнаружено, что при расстояниях $30...40$ мм и более от точки выхода излучателя максимальное значение амплитуды подповерхностной головной волны распространяется вдоль внутренней поверхности и располагается на высоте $2...5$ мм от донной поверхности. То есть вблизи донной поверхности образуется ультразвуковой поток, распространяющийся параллельно донной поверхности.

Исследование акустического поля на трубах 325×15 мм показало наличие закономерностей, полученных на листах. В трубе вблизи донной поверхности также имеет место акустический поток подповерхностной ГВ. Результаты этих исследований и полученные закономерности в значительной мере способствовали разработке технологии УЗК корневых трещин в сварных соединениях Ду-300.

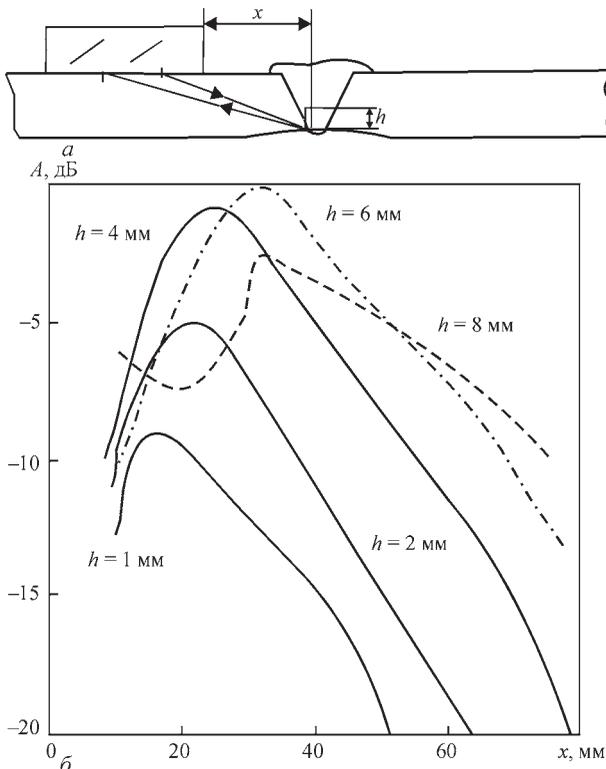


Рис. 8. Схема УЗК (прозвучивание через основной металл) (а) и зависимость амплитуды эхо-сигнала ГВ A от расстояния между искателем и отражателем x для различной высоты трещин h (б)

Исследование возможности выявления трещин в АСС трубопроводов Ду-300 проводилось на специальных образцах со сварным швом и реалистичными имитаторами трещин: вертикальными пазами различной высоты и плоскодонными отверстиями в корне сварных швов. Исследования проводились при прозвучивании сварного соединения:

- с двух сторон от шва;
- при различных расстояниях между сварным швом (имитатором трещины) и искателем;
- при различной высоте трещин.

На рис. 8, 9 представлены схемы прозвучивания и результаты измерений зависимостей амплитуды эхо-сигнала ГВ от трещины различной высоты в функции расстояния между искателем и отражателем. Рис. 8 представляет зависимости при прозвучивании через основной металл, когда трещина расположена со стороны кромки шва, ближней к искателю, а на рис. 9 – при прозвучивании через сварной шов, когда трещина расположена со стороны дальней кромки сварного шва.

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.

Дальность обнаружения трещин высотой $2, 4, 6$ и 8 мм при измерении на поисковом уровне, рав-

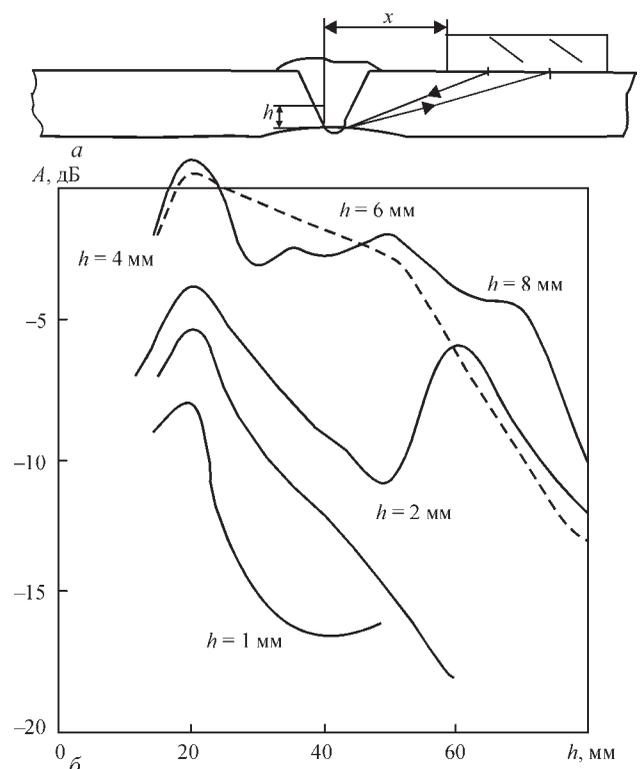


Рис. 9. Схема УЗК (прозвучивание через основной шов) (а) и зависимость амплитуды эхо-сигнала ГВ A от расстояния между искателем и отражателем x для различной высоты трещин h (б)

ном максимальной амплитуде от трещины высотой 2 мм плюс 6 дБ, достигает соответственно 43, 60, 73 и около 80 мм при прозвучивании через основной металл и 23, 30, 60 и 74 мм – при прозвучивании через сварной шов. Несомненно, что при прозвучивании через сварной шов на величину эхо-сигнала влияет ослабление сигнала в сварном шве и на границах зерен, а также переотражение на неровностях в корне шва. Эти же факторы влияют на дальность обнаружения трещин. Наличие дополнительных экстремумов в зависимостях амплитуды от расстояния связано с наличием наклонной проточки и интерференцией импульсов эхо-сигналов, непосредственно отраженных от дефектов и с переотражением от донной поверхности (на скосе).

Важным результатом представляется возможность реализации способа оценки высоты (термин «эквивалентной высоты» предложен нами по аналогии с эквивалентной площадью дефектов) трещины путем измерения дальности обнаружения трещины и сопоставления ее с высотой имитатора трещины в виде прямоугольного паза с известной высотой. На рис. 10 на основе зависимостей, представленных на рис. 8, 9 и экспериментальных данных на трещинах известной высоты изображена связь высоты корневой трещины с дальностью её обнаружения. Эта связь может характеризоваться прямой зависимостью.

Полученные результаты показали, что предложенный способ УЗК позволяет:

- обнаруживать корневые трещины различной высоты в АСС трубопроводов и сосудов, выполненных по технологии, рекомендуемой для АЭС РБМК;
- 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 чувствительностях (или при различных амплитудах эхо-сигнала) для оценки высоты корневой трещины.

В процессе исследований возможности УЗК ГВ сварных соединений трубопроводов Ду-300 на образцах была выявлена специфическая особенность данной технологии УЗК. На рис. 11 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. 11. Научиться правильно настроить дефектоскоп с искателем на настроечном образце (НО) с имитатором трещины и отличать основной сигнал ГВ от сопровождающих на НО и реальном АСС в трубопроводе, как в последствие оказалось, являлось одной из главных задач контролера УЗК при освоении новой технологии контроля.

При отработке и исследованиях методики на реальных сварных соединениях трубопроводов РБМК проведены сравнительные исследования разработанного способа УЗК с другими способами и методами контроля. Исследования и испытания проводились совместно со специалистами АЭС, конструкторских, научно-исследовательских и других организаций, надзорных органов. Использовались стандартная и нестандартная аппаратура, методики УЗК, внешний осмотр, радиографический контроль (РГК), капиллярный контроль, металлография. Некоторые результаты представлены ниже.

На всех АЭС, где методика предполагалась к использованию, проводились специальные работы по определению эффективности и достоверности методики и в особенности в эффективности выявления реальных трещин МКРПН. Совместно со специалистами Курской АЭС проведено обследование сварного соединения 23М2 водоупускного трубопровода УЗК и металлографией.

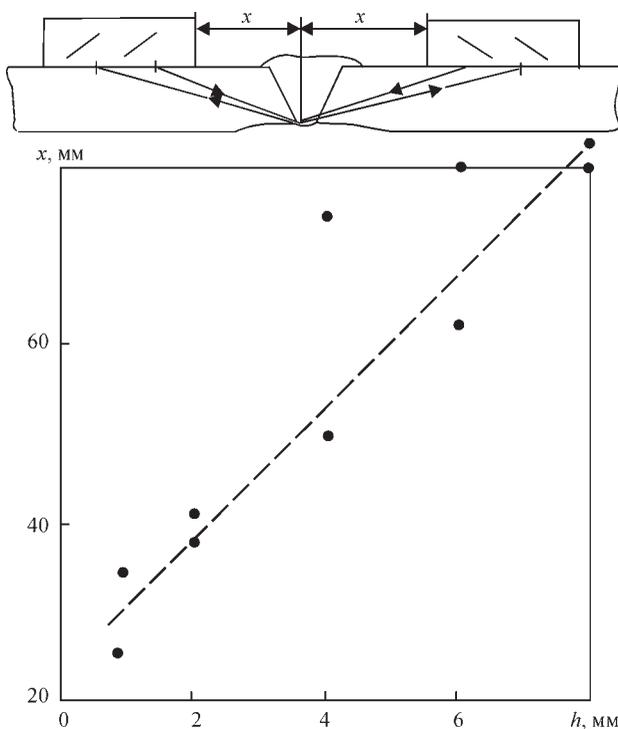


Рис. 10. Зависимость между эквивалентной высотой трещины в АСС h и максимальной дальностью обнаружения дефекта x различной высоты при УЗК ГВ

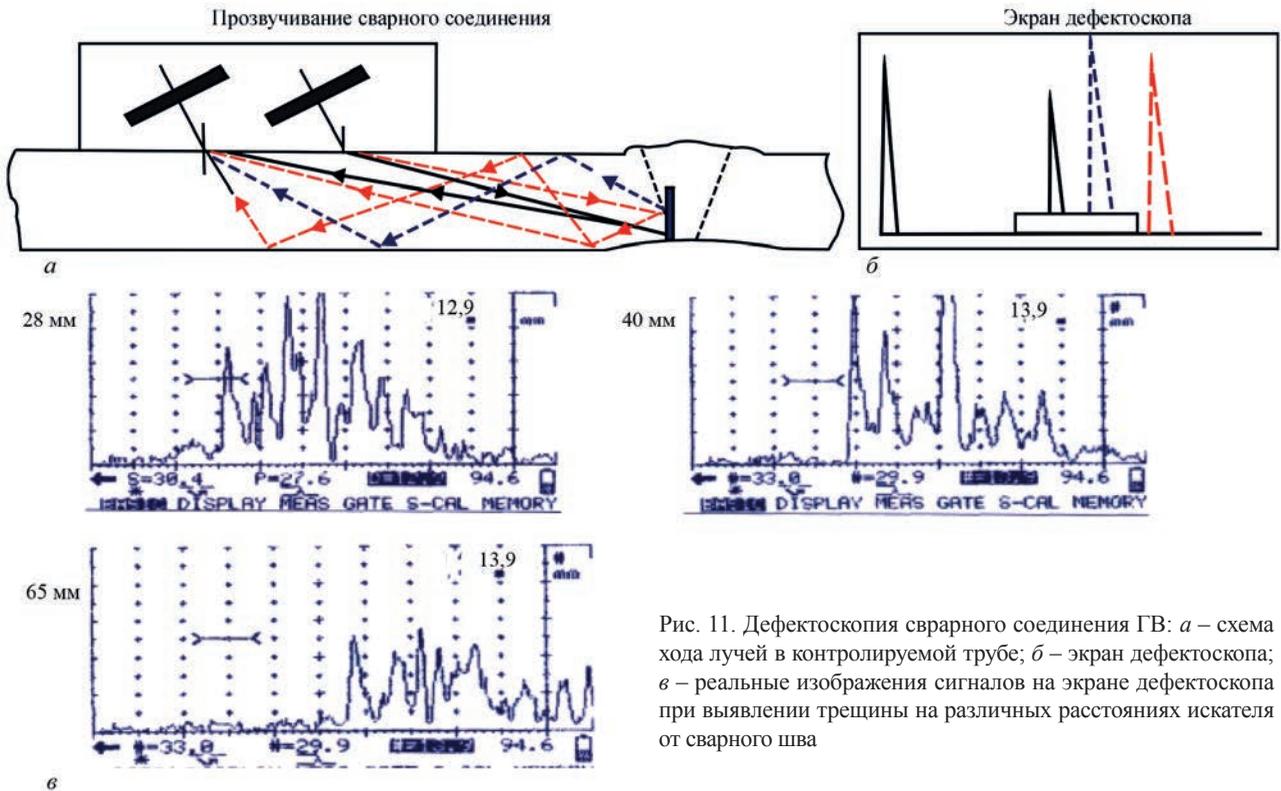


Рис. 11. Дефектоскопия сварного соединения ГВ: а – схема хода лучей в контролируемой трубе; б – экран дефектоскопа; в – реальные изображения сигналов на экране дефектоскопа при выявлении трещины на различных расстояниях искателя от сварного шва

По результатам радиографического контроля сварное соединение 23М2 водоупусного трубопровода было вырезано из трубопровода в виде катушки длиной 500 мм. Исследование сварного соединения производилось с применением разработанного НПО «ЦНИИТМАШ» проекта «Методики УЗК аустенитных сварных соединений трубопроводов 325×15 АЭС с реакторами РБМК» МЦУ-7-96 и методики ВТИ «Методика УЗК АСС с толщиной стенки 10...25 мм в процессе монтажа и эксплуатации атомных станций» МТ 34-70-023-86.

Контроль по методике МТ 34-70-023-86 производился с помощью преобразователей МWB-70N4 с настройкой чувствительности по вертикальному отверстию диаметром 8,4 мм (однажды отраженным лучом). Амплитуда эхо-сигнала соответствовала контрольному уровню чувствительности.

Контроль по проекту методики НПО «ЦНИИТМАШ» проводился с использованием доработанного для УЗК АСС трубопроводов Ду-300 искателя ГВ ИЦ-91. Диапазон контроля и чувствительность определялись по специальному настроечному образцу и устанавливались соответственно по положению на развертке и по амплитуде эхо-сигнала ГВ от имитатора трещины высотой 2 мм.

В процессе контроля определялись максимальная амплитуда сигналов от выявленных отражателей и условная протяженность. Дефектограмма представлена на рис. 12.

Методика МТ-34-70-86 выявила 4 отражателя со следующими характеристиками:

- максимальная амплитуда на 14 дБ превышала контрольный уровень чувствительности, условная протяженность 80 мм;
- максимальная амплитуда на 6...7 дБ превышала контрольный уровень, условная протяженность 40 мм;
- максимальная амплитуда на 6 дБ превышала контрольный уровень, условная протяженность 60 мм;
- максимальная амплитуда на 5 дБ превышала контрольный уровень, условная протяженность 20 мм.

Отражатели I-IV выявлялись только с одной стороны от шва. Участки с отражателями I-IV по МТ-34-70-86 считаются браком.

Способ НПО «ЦНИИТМАШ» УЗК ГВ на поисковом уровне чувствительности зафиксировал отражатель I с максимальным превышением по амплитуде на 6 дБ с одной стороны шва и на 4 дБ с другой стороны шва с условной протяженностью 37 мм. Отражатель II выявлялся в виде отдельного сигнала (без соответствующего сопровождения другими импульсами) с амплитудой на 4 дБ больше браковочного уровня и условной протяженностью 40 мм. Отражатель III давал эхо-сигнал меньше поискового уровня, точечный. Отражатель IV выявлялся как точечный с амплитудой равной поисковому уровню.

Отражатели II-IV наблюдались только с одной стороны шва. Участок 1 по способу НПО «ЦНИИТМАШ» считается браком, участок 2 должен

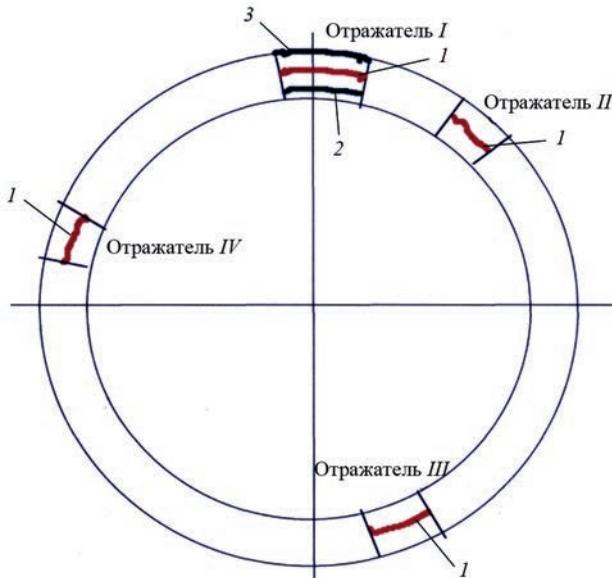


Рис. 12. Дефектограмма НК и металлографии сварного соединения 23М2: 1 – МТ-34-70-023-84 (МWB-70N2, $d = 8,4$ мм); 2 – МЦУ-7-96 (ПГВ, $h = 2$ мм, пропилен); 3 – металлография, трещина

быть отмечен как участок с повышенным шумом, участки 3 и 4 не фиксируются.

На поверхности сварного шва были отмечены координаты отражателей, в них намечены сечения для резов и проведено вскрытие фрезерованием. Затем поверхности резов шлифовались, подвергались травлению, рассматривались под микроскопом и фотографировались при наличии несплошностей.

В результате установлено:

- на участке 1 выявлена протяженная несплошность (трещина) высотой 3,1...7 мм в рассмотренных сечениях (рис. 13);

- на участках 2-4 несплошностей не обнаружено.

Анализ результатов УЗК показал:

- возможность ложной отбраковки сварных соединений при использовании методики МТ-34-70-86;

- удовлетворительные результаты контроля при использовании способа и методики НПО «ЦНИИТМАШ».

На основании результатов исследований и апробации способа УЗК ГВ и проекта методики и апробации технологии контроля сварных соединений трубопроводов Ду-300 была разработана «Методика УЗК аустенитных сварных соединений трубопроводов 325×15 мм АЭС с реакторами РБМК» МЦУ-7-97. Испытания и опытное апробирование

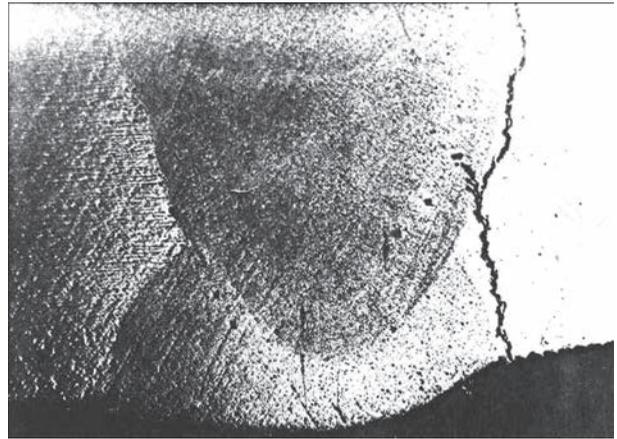


Рис. 13. Несплошность – трещина МКРПН на участке сварного соединения 23М2 с отражателем I

ее на АЭС показали реальные возможности способа в части выявления трещин МКРПН различной протяженности и высоты по сравнению с другими методами неразрушающего контроля. В табл. 1 представлены результаты контроля АСС трубопроводов Ду-300 1-го блока Курской АЭС.

Видно, что методика МЦУ-7-97 позволила оценить реальную дефектность сварных соединений и определить объем сварных соединений для ремонта. Заключение по результатам 100 % УЗК по МЦУ-7-97 сварных соединений явилось основанием для оценки качества трубопроводов Ду-300 и позволило своевременно пустить блок в эксплуатацию.

Аналогичные испытания уже утвержденной методики МЦУ-7-97 до начала ее использования были проведены на Смоленской АЭС. Результаты апробации продемонстрировали эффективность методики и она была принята для использования на АЭС [15].

Наибольшие подготовительные работы перед допуском к применению методики МЦУ-7-97 были проведены на Чернобыльской АЭС.

Для обеспечения нормативного использования новой технологии УЗК АСС трубопроводов Ду-300 на Чернобыльской АЭС АЯР Украины и НАЭК «Энергоатом» предложили проводить работы по двум направлениям:

1. Провести приемочные испытания методики МЦУ-7-97 в соответствии рекомендациями европейского сообщества по неразрушающему контролю ENIQ «Европейская методология по аттестации (второе издание)» 1997 г. [16].

Таблица 1. Результаты исследований АСС трубопроводов Ду-300 1-го блока Курской АЭС

Метод контроля		Количество швов, шт.	Брак, шт.	Примечание
РГК		444 (100 %)	14 – непровары, шлак 5 – трещины 12 – технологические отклонения	Не выявлено трещин с коррозией под напряжением
УЗК	МТ-34-70-023-86	444 (100 %)	222 (50 %) (по амплитуде, протяженности)	Предположили перебраковку при чувствительности $d = 8,4$ мм
	МЦУ-7-96	226	34 ($1 < 100$ мм)	Ремонт и допуск по техрешению

Таблиця 2. Сравнительные результаты неразрушающего контроля (РГК и УЗК по МЦУ-7-97) сварных соединений (СС) трубопроводов Ду-300 КМЩЦ энергоблока №3 Чернобыльской АЭС

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

2. Провести опытный экспертный УЗК по методике МЦУ-7-97 на трубопроводах 3-го блока Чернобыльской АЭС.

В процессе выполнения экспертного УЗК проходила подготовка, обучение и тренинг высококвалифицированных контролеров УЗК, аттестованных по правилам и унифицированным методикам УЗК ПНАЭГ, Чернобыльской и других АЭС Украины. Эти специалисты в дальнейшем принимали участие в работах по аттестации методики и по сплошному УЗК АСС Ду-300 на 3-м блоке Чернобыльской АЭС.

По методике МЦУ-7-97 при экспертном УЗК было проконтролировано 135 сварных соединений опускных трубопроводов и 45 сварных соединений напорных трубопроводов, не имевших замечаний по результатам РГК.

Результаты УЗК:

- из 135-и сварных соединений опускных трубопроводов в 19-и были обнаружены протяженные отражатели;
- из 45-и сварных соединений напорных трубопроводов в 6-и были обнаружены протяженные отражатели;
- выборочные разрушающие испытания темплетов шириной 42...47 мм (долотом на разрывной машине), вырезанных на участках расположения по результатам УЗК трещинообразных протяжен-

ных отражателей, подтвердили наличие трещин различной высоты.

Анализ результатов экспертного УЗК по методике МЦУ-7-97 и металлографических исследований показал, что РГК не обеспечивает выявления трещинообразных несплошностей в сварных соединениях трубопроводов Ду300.

В табл. 2 представлены сравнительные результаты неразрушающего контроля (РГК и экспертного УЗК по МЦУ-7-97) сварных соединений трубопроводов Ду-300. Результаты свидетельствуют о том, что, во-первых, при радиографическом контроле возможна значительная перебраковка по количеству дефектных сварных соединений, а во-вторых, возможна недобраковка по протяженности трещин. В последнем столбце табл. 2 показано, что суммарная протяженность трещин по результатам УЗК более чем в два с половиной раза превышает данные по РГК. Сравнительные данные по протяженности хорошо иллюстрируются диаграммами расположения дефектов по периметру сварных швов на рис. 14.

Была разработана «Программа аттестации методики УЗК аустенитных сварных соединений трубопроводов 325×15 мм АЭС с реакторами РБМК» МЦУ-7-97, которая утверждена руководством НАЕК «Энергоатом» и Чернобыльской АЭС и согласована АЯР МЭБУ. Она определила цели и задачи аттестации, требования к аттеста-

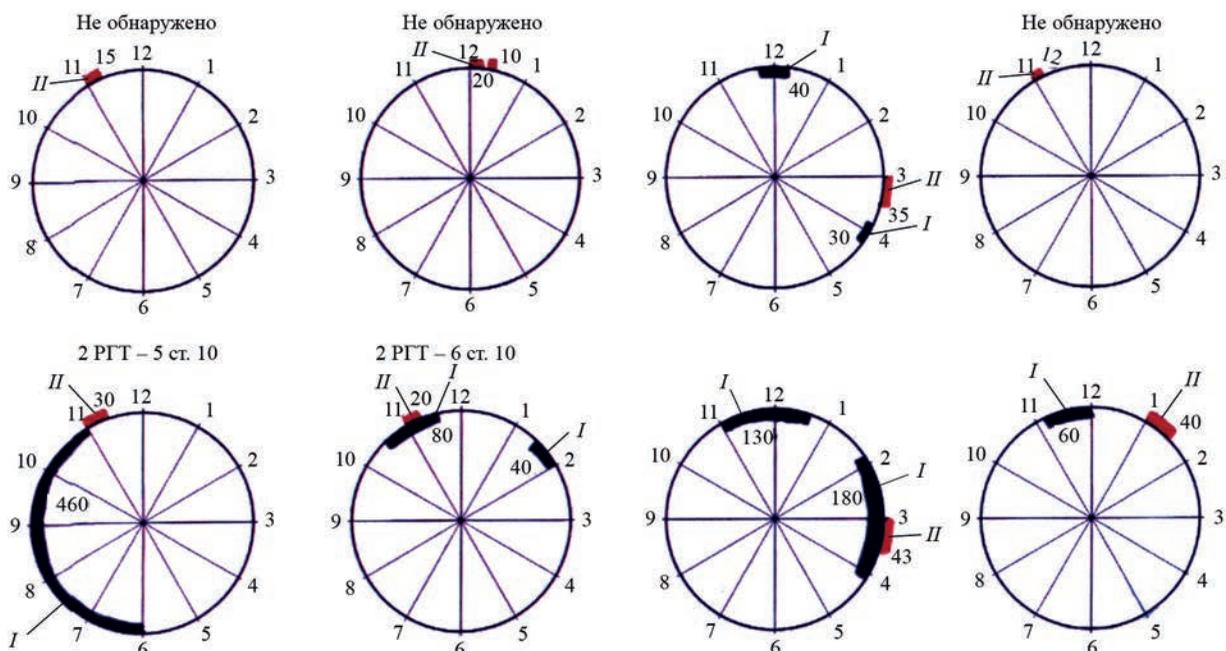


Рис. 14. Диаграммы расположения и протяженность дефектов в сварных соединениях напорного трубопровода по результатам УЗК по МЦУ-7-97 и РГК: I – УЗК, II – РГК

ционной комиссии, требования к тест-образцам, требования к персоналу, этапы аттестации, оценку результатов аттестации. Такая аттестация впервые проводилась в Украине и процедура аттестации предусматривала:

- аттестацию специалистов УЗК, прошедших теоретическое и практическое обучение по методике МЦУ-7-97;

- наличие метрологически поверенного оборудования, в данном случае приборов УД-2-12 (или аналогичных им) совместно со специально разработанными искателями;

- разработку и изготовление специальных тест-образцов с искусственными дефектами для открытых испытаний и выбор тест-образцов для закрытых («слепых») испытаний;

- аттестацию собственно методики.

Этапы аттестации включали:

- анализ методики, выдачу экспертного заключения;

- анализ ранее полученных результатов контроля на АЭС РФ и на Чернобыльской АЭС (экспертных) с применением МЦУ-7-97;

- подготовку тест-образцов с искусственными отражателями (имитаторами трещин);

- выбор двух катушек с реальными трещинами по результатам экспертного УЗК на Чернобыльской АЭС;

- проведение УЗК по МЦУ-7-97 двумя независимыми звеньями на:

- тест-образцах с заранее известными отражателями (открытые испытания);

- двух катушках с эксплуатационными отражателями (слепые испытания);

- подтверждение результатов испытаний методами радиографии и металлографии «слепых» образцов;

- рассмотрение результатов и подготовка Протокола аттестации.

Все этапы работы были выполнены. В частности предприятием «ЭАКС» (Украина) в результате анализа методики было выдано экспертное заключение о том, что «Методика УЗК аустенитных сварных соединений трубопроводов 325×15 АЭС с реакторами РБМК» МЦУ-7-97 может быть рекомендована для использования на Чернобыльской АЭС. Эта методика была введена в перечень НТД, действующей на Чернобыльской АЭС.

Итогом всей работы явилось принятие «Решения о допуске в эксплуатацию трубопроводов из аустенитной стали Ду-300», согласованного в установленном порядке и отвечающего требованиям нормативно-технической документации.

В период 1997–2001 гг. по методике МЦУ-7-97 было проконтролировано ~ 20000

сварных соединений (многие неоднократно) трубопроводов и коллекторов Ду-300. При этом сквозных трещин не обнаружено и не пропущено, что свидетельствует о надежности УЗК по методике МЦУ-7-97. Следует отметить, что есть еще много перспективных вопросов применения этой методики. В частности, методика УЗК ГВ имеет значительный резерв на пути использования сопровождающих импульсов для повышения качества и достоверности контроля, оценки высоты трещин.

Список литературы

1. (1974) *Методика контроля изделий головными ультразвуковыми волнами*. Москва, ЦНИИТМАШ.
2. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. (1981) О выявлении подповерхностных дефектов искателями головных волн ИЦ-61, ИЦ-70. *Дефектоскопия*, 3, 97–105.
3. Разыграев Н.П. (2020) Головные волны в ультразвуковой дефектоскопии металлов. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 2, 58–70.
4. ПНАЭГ-7-30-91. *Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Ультразвуковой контроль. Ч. 2. Контроль сварных соединений и наплавки*. Москва, ЦНИИАтоминформ.
5. Зубченко А.С., Харина И.Л., Маханов В.О., Рунов А.Е. (2003) Некоторые аспекты коррозионно-механического повреждения сварных трубопроводов из стали 0Х18Н10Т реакторов типа РБМК. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2, 69, 50–55.
6. Electric Power Research Institute. (1982) *The Growth and Stability of Stress-Corrosion Cracks in Large Diameter BWR Piping*. EPRI-NP-2472-SY. Vol.1, Summary.
7. Wachter, O. (1996) *Experience with austenitic steels type 321 and type 347 in German boiling water reactors*. VGB Kraftwerktechnik 76, 10.
8. Spiedel, M.O., Magdowski R. (1994) Stress corrosion cracking of Ti- and Nb-stabilized austenitic steels in 288 °C water. *Corrosion-94*, 132.
9. Angeliu, T.M., Andresen, P.L., Sutliff, J.A., Horn, R.M. (1999) Intergranular Stress Corrosion Cracking of Unsensitized Stainless Steel in BWR Environments. *Proc. Ninth Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water reactors*, AIME.
10. Разыграев Н.П. (1984) Ультразвуковой контроль трещинообразования под антикоррозионной аустенитной наплавкой. *Дефектоскопия*, 2, 60–66.
11. Зубченко А.С., Разыграев Н.П., Кретов Е.Ф. и др. (1988) *Актуальные вопросы ультразвукового контроля наплавленных антикоррозионных покрытий*. Москва, Энергомашиностроение, Ч. 1., 10, Ч. 2., 11.
12. Зубченко А.С., Разыграев Н.П., Кретов Е.Ф. и др. (1988) Оценка технологии изготовления и норм качества при ультразвуковом контроле наплавленных антикоррозионных покрытий. Москва, Энергомашиностроение, 12.
13. 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*. Москва, ЦНИИАтоминформ.
14. Разыграев Н.П. и др. (1978) Исследование процесса формирования акустического поля головной волны в контролируемой среде. *Дефектоскопия*, 11, 5.
15. Разыграев Н.П. (2006) УЗК аустенитных сварных соединений трубопроводов Ду-300. *Там же*, 10, 59–71.
16. (1997) *«Европейская методология по аттестации (второе издание)» ENIQ. Отчет № 2, EUR 17229 Ru, Генеральный директорат, Объединенный исследовательский центр. ECSC-EEC-EAEC, Brussels-Luxemburg.*

Поступила в редакцию 29.01.2021