

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

© 2019 г. В.М. Ушаков^{1,*}, В.Н. Данилов¹

¹Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (АО «НПО «ЦНИИТМАШ»),
Россия 115088 Москва, ул. Шарикоподшипниковская, 4
*E-mail: VMUshakov@cniitmash.com

Поступила в редакцию 16.04.2019; после доработки 03.07.2019
Принята к публикации 09.07.2019

Описаны нормы оценки по результатам неразрушающего ультразвукового контроля сварных соединений. Представлены результаты расчета оптимальной чувствительности ультразвукового контроля, реализующей заданные нормы оценки. Проведены исследования образцов сварных соединений, основанные на неразрушающих испытаниях ультразвуковым эхометодом, и дано сравнение результатов этих испытаний с данными металлографического анализа образцов, в которых выявлены дефекты типа свищей, корневых непроваров, язвенной коррозии. Даны рекомендации по оптимизации чувствительности ультразвукового контроля с целью объективной оценки обнаруженных несплошностей сварных соединений с учетом существующих норм оценки качества по результатам контроля.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, сварное соединение, дефект, корневой непровар, ультразвуковой контроль, чувствительность, пьезоэлектрический преобразователь.

DOI: 10.1134/S0130308219100014

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос обоснования оптимальных параметров ультразвукового контроля является важным, т.к. он связан с перебраковкой (необоснованный ремонт) или с недобраковкой (пропуск недопустимых дефектов), а это потенциальное разрушение сварного соединения (СС). Размеры реальных дефектов при ультразвуковом (УЗ) контроле не определяют.

В нормативных документах задается максимально допустимая эквивалентная площадь дефектов, определяемая площадью плоскодонных отражателей, значения которой принимаются в качестве норм оценки сварных соединений по результатам УЗ контроля. Например, в тепловой энергетике нормы для сварных соединений оборудования и трубопроводов в процессе монтажа и ремонта заданы в [1]. При изготовлении оборудования УЗ контроль проводят по [10] с учетом норм [1], но чувствительность принимается на 3 дБ выше, чем при ремонтном или монтажном контроле. В атомной энергетике нормы оценки качества распространяются на оборудование и трубопроводы в процессе эксплуатации [2], при изготовлении и монтаже соответствующие нормы приведены в [3], а в [1, 3] (см. табл.1 и 2) указаны (в зависимости от толщины и категории сварных соединений) максимально допустимая и минимально фиксируемая площади обнаруженных несплошностей. В [3] представлены нормы в зависимости от толщины для I, II и III категорий сварных соединений. Для эксплуатации [2] используются (в зависимости от толщины нормы) соответствующие III категории сварных соединений [3].

Согласно [4], эквивалентная площадь несплошности есть площадь плоскодонного отражателя (ПО), расположенного на той же глубине, что и несплошность, при равенстве амплитуды сигналов от несплошности и ПО, при этом акустическая ось преобразователя ориентирована перпендикулярно площади ПО. Следует отметить, что документ [4] введен вместо ГОСТ 14782—86, хотя в [4] нет прямой ссылки об отмене этого ГОСТ, но такая информация имеется на сайте Федерального Агентства «Росстандарт».

В некоторых случаях при УЗ контроле сварных соединений толщиной от 2,0 мм в тепловой энергетике и от 5,5 мм в атомной допускается пересчитывать площадь ПО в площадь углового отражателя (зарубки).

Нормы оценки качества напрямую определяют уровни чувствительности УЗ контроля, а именно: максимально допустимая эквивалентная площадь несплошности определяет браковочный уровень, минимально фиксируемая эквивалентная площадь — контрольный уровень чувствительности. При превышении амплитуды эхосигнала браковочного уровня обнаруженная несплошность считается недопустимой (дефектом и, как правило, СС подлежат ремонту), при

превышении контрольного уровня протяженные несплошности недопустимы, а точечные (непротяженные) несплошности оставляют в СС, но в процессе эксплуатации СС наблюдают за их ростом.

Как получают нормы оценки? Это не вопрос ультразвукового контроля. Кратко надо лишь отметить, что данные по нормам получают на основании прочностных расчетов, статистического анализа разрушенных элементов оборудования, трубопроводов или разрушения образцов с дефектами (искусственными — надрезами, рисками, также — трещинами, непроварами и т.п.) при статистической и/или динамической нагрузке.

Если же указанное обоснование норм невозможно или затруднительно, то исходят из возможностей и опыта УЗК. Такой подход принят с самого начала развития УЗ контроля (60-х годов прошлого столетия) и изложен, например, в [6—8]. Хотя они отменены, но опыт их применения использован в других документах (см., например, [10]). В частности, для труб поверхностей нагрева обоснование норм по результатам УЗ контроля предложено проводить на основе оценки состояния металла по вырезкам из труб с повреждениями и без повреждений. С учетом результатов вскрытия и исследования сварных соединений и на основе анализа данных вскрытия определяют уровень чувствительности УЗ контроля.

В [9] использован метод с применением теории статистических решений. Предложены нормы оценки качества сварных швов, в которых «разбраковка ведется по характеристикам дефектов, доступных измерению в процессе УЗ контроля (амплитуде эхосигнала, условной высоте, протяженности, количеству дефектов)».

При этом не исключаются прочностные расчеты, анализ разрушения элементов трубопроводов и др. Но возникает вопрос, насколько нормы документа [1] соответствуют выявляемости дефектов сварных соединений? В данной работе сделана попытка ответить на этот вопрос. И еще необходимо отметить следующее. Современный уровень УЗ дефектоскопии характеризуется бурным развитием исследований по оценке чувствительности УЗ контроля с применением фазированных решеток [17, 18, 23—27]. Однако нормы оценки в настоящее время не разработаны. Обобщение опыта УЗ контроля по [1—5] будет весьма полезен для обоснования эффективности применения фазированных решеток.

Особое внимание в данной работе уделено УЗ контролю СС толщиной от 2,0 до 5,5 мм. Сварные соединения указанной толщины в атомной энергетике контролируют согласно вновь введенным документам с 2015 г. — в эксплуатации [2] и с 2018 г. — при изготовлении и монтаже [3]. В атомной энергетике нормы оценки качества для указанных толщин введены впервые. Представляет интерес, насколько введенные нормы позволяют достоверно оценивать качество сварных соединений. В тепловой энергетике накоплен огромный опыт УЗ контроля таких сварных соединений, именно поэтому в данной статье учтен этот опыт.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗЦЫ

Исследования проводили в следующей последовательности.

Анализировали нормы оценки качества по результатам УЗ контроля в тепловой (табл. 1) и атомной энергетике (табл. 2).

Таблица 1

Браковочный уровень чувствительности УЗК по документу [1] тепловой энергетике

Толщина СС, мм	Площадь зарубки, мм ² (ПО, мм ²)	Рабочая частота контроля, МГц	Угол ввода, град	
			прямой луч	однократно отраженный луч
2,0	1,0×0,8 (0,8)	4—10	70 ⁺⁵	70 ⁺⁵
4,0	1,2×1,0 (0,9)	4—10	70 ⁺⁵	70 ⁺⁵
5,5	1,4×1,2 (1,2)	4—10	70 ⁺⁵	70 ⁺⁵
12,0	2,5×2,0 (2,5)	2,5—5,0	65 ⁺⁵	65 ⁺⁵
18,0	3,5×2,0 (3,5)	2,5—5,0	65 ⁺⁵	60 ⁺¹⁰

Примечание: ПО — плоскодонный отражатель. Контрольный уровень чувствительности получают повышением усиления дефектоскопа на 6 дБ.

Таблица 2

Браковочный уровень чувствительности УЗК по документу [3] атомной энергетики

Толщина СС, мм	Площадь зарубки, мм ² (ПО, мм ²)	Рабочая частота контроля, МГц	Угол ввода, град	
			прямой луч	однократно отраженный луч
2,0	1,0×0,4	10,0—12,0	73 ⁺⁴	73 ⁺²
4,0	1,0×0,8	8,0—11,0	71 ⁺²	71 ⁺²
5,5	1,2×1,0	5,0—7,0	70 ⁺²	70 ⁺²
12,0	2,5×2,3 (4,0)	4,0—6,0	65 ⁺⁵	65 ⁺⁵
18,0	2,5×2,3 (4,0)	2,5—5,0	65 ⁺⁵	45 ⁺⁵

Примечание: Для сварных соединений толщиной 2,0—5,5 мм. вкл. заданы размеры зарубки, для толщин 12 и 18 мм — площадь ПО (4,0 мм²) для сварных соединений I категории. Контрольный уровень чувствительности получают повышением усиления дефектоскопа на 6 дБ. Площадь зарубки 2,5×2,3 мм² пересчитана, исходя из площади ПО по документу [4] с выполнением условия, что ширина и высота зарубки более 1,5 длины поперечной волны на рабочей частоте.

С целью повышения выявляемости несплошностей (особенно для сварных соединений толщиной от 2,0 до 5,5 мм) особое внимание уделено выбору оптимальной чувствительности и параметрам пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП). Для этого были проведены расчеты чувствительности и оптимальных параметров ПЭП (частоты, угла ввода и др.).

Для проверки расчетных параметров преобразователей и оценки выявляемости дефектов СС использовали образцы (20 шт.) СС, вырезанные из труб диаметром 32×4 мм поверхностей нагрева котлов тепловых электростанций. Указанные образцы подвергали УЗ контролю, для этого использовали преобразователи с расчетной чувствительностью и углом ввода, настройку чувствительности дефектоскопа проводили в соответствии с руководством по эксплуатации, нормы оценки качества — в соответствии с табл. 1 [1]. В указанном документе задана площадь плоскодонного отражателя (в табл. 1 приведена площадь зарубки, полученная на основании расчета, исходя из площади ПО согласно [4]).

В данной работе использовали совмещенные и раздельно-совмещенные ПЭП и, для сравнения выявляемости несплошностей, ПЭП хордового типа. Недостатки серийных совмещенных преобразователей (ложная браковка по корневым отражателям: грат, провисание корня шва и др.) устранены в ПЭП разработки ЦНИИТМАШ за счет применения новых типов пьезокерамики, материала призмы и др. Эти ПЭП использовали при УЗ контроле образцов сварных соединений.

Для сварного соединения толщиной 4 мм площадь плоскодонного отражателя 0,9 мм² при угле ввода 73° соответствует площади зарубки 1,2×1,0 мм². В процессе контроля проводили анализ соответствия амплитуд эхосигналов от несплошностей и заданного браковочного уровня по табл. 1, измеряли глубину залегания несплошностей и условную протяженность согласно требований [5]. Образцы с обнаруженными несплошностями подвергались металлографическим исследованиям.

ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прежде всего сравним нормы оценки качества СС в тепловой и атомной энергетике (см. табл. 1 и 2). Из таблиц следует, что для толщин СС от 2,0 до 5,5 мм нормы атомной энергетики более «жесткие», то есть оценку допустимости несплошностей по амплитуде на браковочном уровне чувствительности проводят при более высоком (на 3-6 дБ) усилении дефектоскопа.

Для толщин СС от 6,0 до 18 мм нормы существенно не отличаются (примерно 2-3 дБ). Анализ норм тепловой [1] и атомной [3] для II и III категорий (для упрощения в табл. 1 и 2 не приводятся) дает результат в пользу «жесткости» норм уже в тепловой энергетике.

Параметры УЗ контроля (частота и угол ввода ультразвука) согласно [10] примерно одинаковые (см. также табл. 1 и 2). Это дает возможность оптимизации частот и углов ввода для УЗ контроля СС объектов как тепловой, так и атомной энергетики путем компьютерного моделирования акустического тракта наклонного преобразователя для отражателя типа зарубки (см., например, работы [11—16]). Подобный подход оптимизации параметров УЗК с использованием преобразователей с фазированными решетками предложен в [17, 18].

В данной статье приведены результаты расчета амплитуды эхосигнала по формуле (1) работы [19], достаточно полно для практических оценок учитывающей основные факторы, влияющие на амплитуду (среднюю величину зерна, затухание упругих волн в призме и металле сварных соединений и др.). Результаты расчетов по этой формуле были подтверждены экспериментально [19].

Схема расчета акустического тракта совмещенного наклонного преобразователя (ПЭП) для углового отражателя (зарубки) приведена на рис.1, где H — толщина контролируемой области с параллельными границами; h_d — глубина (высота) зарубки площадью $S_d = h_d \times b_d$; b_d — ширина зарубки; O_2 — точка выхода отражателя на нижнюю границу изделия в основной плоскости падения — отражения (XOZ), удаленная от начала координат O (точки ввода центрального луча) на расстояние x_d по оси OX ; l_0 — расстояние от центра круглой пьезопластины диаметром $2a$ (точки O_1) до точки ввода центрального луча O (задержка в призме). Углы β_0 и α_0 на рис.1 — углы падения и преломления (ввода поперечной волны) продольной волны в преобразователе для направления распространения вдоль акустической оси (центрального луча).

Расчеты нормированного на максимум значения амплитуды эхосигнала ($|\delta P_{\text{отр}}|^N$) от отражателя-зарубки проводили с использованием формулы (1) [19]:

$$|\delta P_{\text{отр}}| = \frac{S_{\text{пл}} S_d \cos \varepsilon G(\alpha)}{\lambda_{\tau}^2 (lm+r)(lm \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} + r)} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} |\Phi_{\text{н}}(k_{l1} a \sin \varepsilon)|^2 \times |D_{l\tau}(\alpha) D_{\tau l}(\alpha)| \times \exp(-2\delta_{\tau} r) \exp(-2\delta_{l1} l), \quad (1)$$

$$\cos \varepsilon = \cos(\beta - \beta_0), \quad \sin \varepsilon = \sin(\beta - \beta_0), \quad S_{\text{пл}} = \pi a^2.$$

В формуле (1) $S_{\text{пл}}$ — площадь пьезопластины радиусом a с диаграммой направленности в основной плоскости $|\Phi_{\text{н}}(k_{l1} a \sin \varepsilon)|$; $m = \frac{c_{l1}}{c_{\tau}}$, где c_{τ} — скорость поперечной волны в контролируемой среде, c_{l1} — скорость продольной волны в призме; λ_{τ} — длина поперечной волны в среде; k_{l1} — волновое число продольной волны в призме преобразователя; δ_{τ} — коэффициент затухания поперечных волн в среде; δ_{l1} — коэффициент затухания продольных волн в призме; a — текущий угол ввода луча поперечной волны в среду; β — угол падения этого луча, распространяющегося в призме ПЭП; $D_{l\tau}(\alpha)$, $D_{\tau l}(\alpha)$ — коэффициенты трансформации продольной волны в поперечную (в среде) для излучаемой волны и поперечной в продольную (в призме преобразователя) для принимаемой [20]. Угол ввода луча α определялся из численного решения трансцендентного уравнения (5) в [19], а угол β — из соотношения $\sin \beta = m \sin \alpha$. Коэффициент $G(\alpha)$ (по И.Н. Ермолову [15, 21]) учитывает геометрию отражения, явления не зеркального отражения и трансформации волн и зависит от угла ввода α . Пути ультразвукового луча в среде r и в призме преобразователя l в (1) вычисляются по формулам:

$$r = \frac{H}{\cos \alpha}, \quad l = l_0 \frac{\cos \beta_0}{\cos \beta}.$$

Формулы для определения коэффициентов δ_{τ} и δ_{l1} приведены в [19].

Расчеты проводили в зависимости от нормированного на толщину H смещения $\delta x = x/H$ точки ввода ПЭП O' от точки O (ввода центрального луча в направлении OO_2) по оси OX (рис.1), при

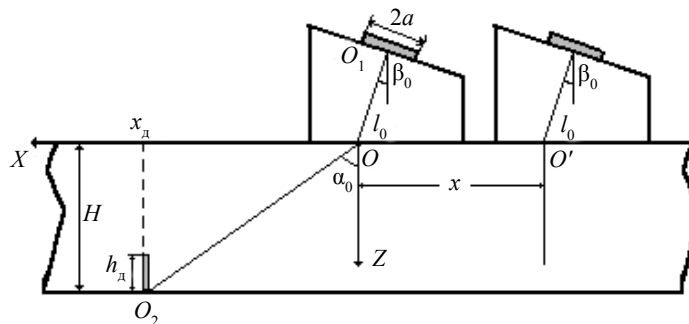


Рис. 1. Схема расчета акустического тракта совмещенного наклонного преобразователя для углового отражателя (зарубки).

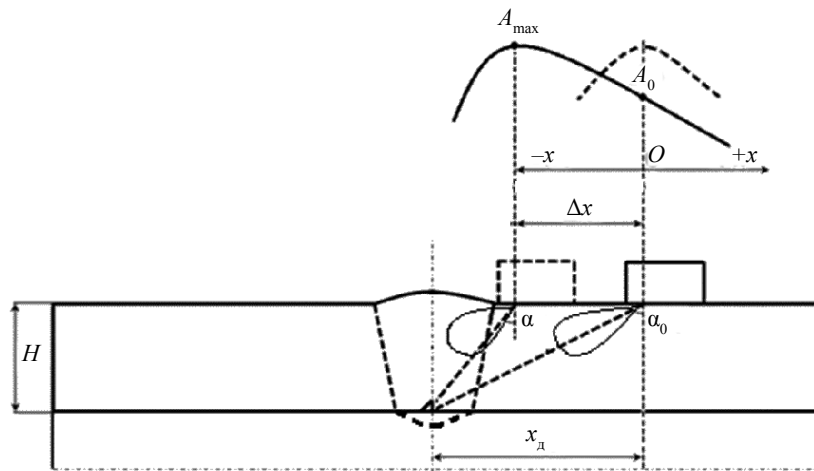


Рис. 2. Схема проведения эксперимента на образце с угловым отражателем в сварном шве с использованием совмещенного наклонного преобразователя.

этом отрицательное значение δx соответствовало уменьшению расстояния x_d до отражателя, а положительное — увеличению (рис. 2).

Соответствующая схема проведения эксперимента приведена на рис. 2. Наклонный ПЭП перемещался по поверхности образца вправо (+x) и влево (-x) от положения, соответствующего направлению центрального луча (под номинальным углом ввода α_0) на отражатель. Расстояние Δx соответствует смещению преобразователя при получении максимума эхосигнала A_{max} и фактическом угле ввода α .

Результаты расчета показаны на рис. 3—10. Для толщины 2 мм на рис. 3, 4 изменение амплитуды эхосигнала $|\delta P_{отр}|^N$ (в дБ) в зависимости от параметра δx представлено для двух значений среднего размера зерна и нескольких значений рабочей частоты f_p .

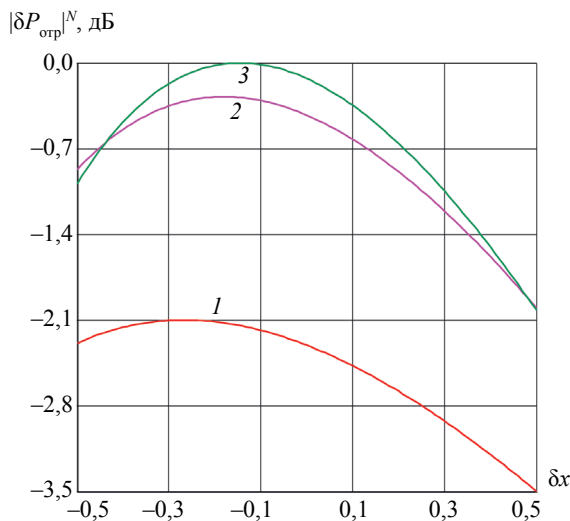


Рис. 3. Нормированные зависимости $|\delta P_{отр}|^N$ от относительного смещения δx для номинального угла ввода $\alpha_0 = 75^\circ$, толщины $H = 2$ мм, размера зерна $\bar{D} = 0,01$ мм, радиуса пьезопластины $a = 2,5$ мм, пути в призме $l_0 = 8$ мм, отражателя-зарубки площадью $S_d = 1,0 \times 0,4$ мм²:
 1 — рабочая частота $f_p = 7$ МГц; 2 — $f_p = 10$ МГц;
 3 — $f_p = 12$ МГц.

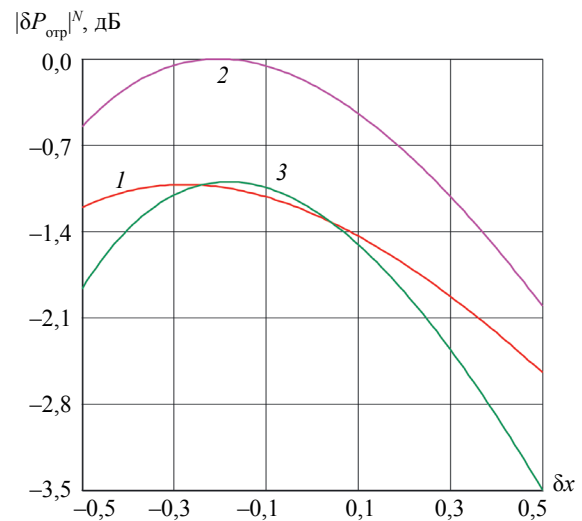


Рис. 4. Нормированные зависимости $|\delta P_{отр}|^N$ от относительного смещения δx для номинального угла ввода $\alpha_0 = 75^\circ$, толщины $H = 2$ мм, размера зерна $\bar{D} = 0,03$ мм, радиуса пьезопластины $a = 2,5$ мм, пути в призме $l_0 = 8$ мм, отражателя-зарубки площадью $S_d = 1,0 \times 0,4$ мм²:
 1 — рабочая частота $f_p = 7$ МГц; 2 — $f_p = 10$ МГц;
 3 — $f_p = 12$ МГц.

Перемещение преобразователя осуществлялось в основной плоскости падения — отражения (XOZ) (см. рис. 1), что в эксперименте соответствовало перемещению ПЭП перпендикулярно свар-

ному шву (см. рис. 2), поэтому кривые на рис. 3—10 — это зависимости максимумов эхосигналов при таком перемещении.

Из рис. 3, 4 следует, что оптимальная частота контроля зависит от среднего размера зерна металла (\bar{D}), но, в любом случае, предпочтительнее 10 МГц, чем 7 или 12 МГц: чувствительность выше, смещение максимума относительно положения «0» преобразователя (см. рис. 2) минимально.

В документах атомной энергетики (см. табл. 2) обоснованно задан более узкий диапазон частот (10—12 МГц), для тепловой энергетики при выборе оптимальной частоты из широкого диапазона (4—10 МГц) необходимо учитывать вышеуказанные на рисунках зависимости.

Для сварных соединений толщиной 5,5 мм (рис. 5, 6) результаты расчета по существу идентичны расчетам для $H = 2,0$ мм: частота $f_p = 10$ МГц также предпочтительнее, чем, например, 5 МГц. Преимущество этой частоты имеет место как по чувствительности, так и по возможности определения максимума эхосигнала, поскольку для рабочих частот 5 и 7 МГц огибающая эхосигналов более пологая, что дает неопределенность нахождения максимума сигнала, при этом увеличивается погрешность измерения координат несплошностей и ухудшается лучевая разрешающая способность.

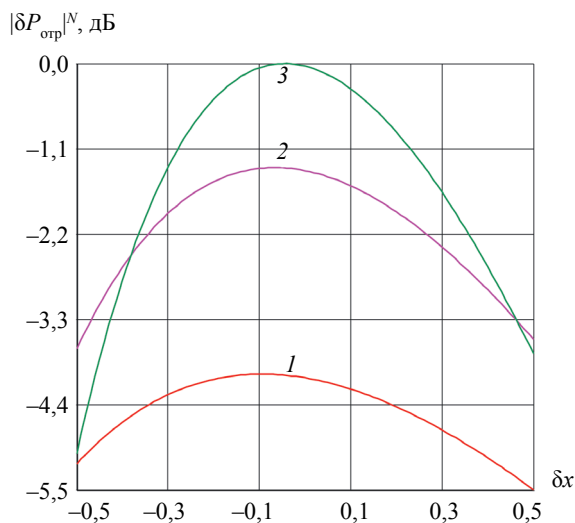


Рис. 5. Нормированные зависимости $|\delta P_{отр}|^N$ от относительного смещения δx для номинального угла ввода $\alpha_0 = 72^\circ$, толщины $H = 5,5$ мм, размера зерна $\bar{D} = 0,01$ мм, радиуса пьезопластины $a = 3,0$ мм, пути в призме $l_0 = 9$ мм, отражателя-зарубки площадью $S_d = 1,4 \times 1,2$ мм²:

1 — рабочая частота $f_p = 5$ МГц; 2 — $f_p = 7$ МГц;
3 — $f_p = 10$ МГц.

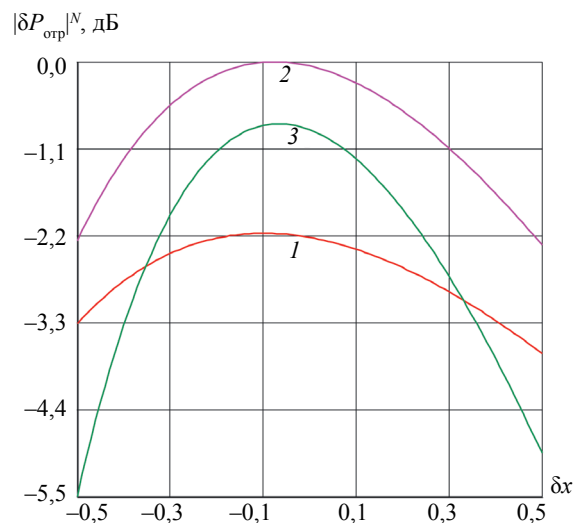


Рис. 6. Нормированные зависимости $|\delta P_{отр}|^N$ от относительного смещения δx для номинального угла ввода $\alpha_0 = 72^\circ$, толщины $H = 5,5$ мм, размера зерна $\bar{D} = 0,03$ мм, радиуса пьезопластины $a = 3,0$ мм, пути в призме $l_0 = 9$ мм, отражателя-зарубки площадью $S_d = 1,4 \times 1,2$ мм²:

1 — рабочая частота $f_p = 5$ МГц; 2 — $f_p = 7$ МГц; 3 — $f_p = 10$ МГц.

На рис. 7, 8 представлены кривые изменения амплитуды для толщины 12 мм: диапазон частот (2,5—5 МГц) для тепловой энергетики (см. табл. 1) и 4—6 МГц для сварных соединений I категории атомной энергетики (см. табл. 2), для более низких частот актуальны расчеты, начиная со среднего значения зерна $\bar{D} = 0,03$ мм и более.

Тенденция преимущества более высоких частот еще более выражена, например, чувствительность контроля на частоте 5—7 МГц выше на 7—9 дБ, чем на частоте 2,5 МГц (тепловая энергетика, рис. 7) и примерно 4 дБ (атомная энергетика, рис. 8). Смещение максимума эхосигналов согласно рис. 7, 8 практически не наблюдается.

Из рис. 9 (для толщины СС 18 мм) следует, что вполне приемлемы частоты 4—6 МГц (уж тем более — 2,5 МГц). Для каждой из этих частот амплитуда эхосигнала прямо пропорциональна площади отражателя (при равенстве прочих условий, см. рис. 10).

Для всех кривых рис. 10 соблюдается условие $h \geq 1,2 \lambda_\tau$, где h — высота «зарубки», λ_τ — длина поперечной волны (см. ГОСТ 14782—86).

Рис. 10 подтверждает допустимость настройки чувствительности дефектоскопа по отражателю заданной площади, например, «зарубке» — $2,5 \times 1,5$ (мм²) и проведения контроля с корректировкой чувствительности с учетом площади зарубки, например, указанной в табл. 1.

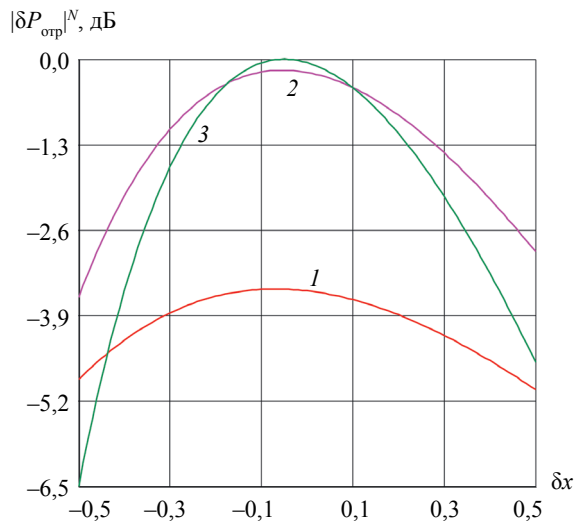


Рис. 7. Нормированные зависимости $|\delta P_{отп}|^N$ от относительного смещения δx для номинального угла ввода $\alpha_0 = 70^\circ$, толщины $H = 12$ мм, размера зерна $\bar{D} = 0,03$ мм, радиуса пьезопластины $a = 3,0$ мм, пути в призме $l_0 = 9$ мм, отражателя-зарубки площадью $S_d = 2,5 \times 2,3$ мм²:
 1 — рабочая частота $f_p = 4$ МГц; 2 — $f_p = 6$ МГц;
 3 — $f_p = 8$ МГц.

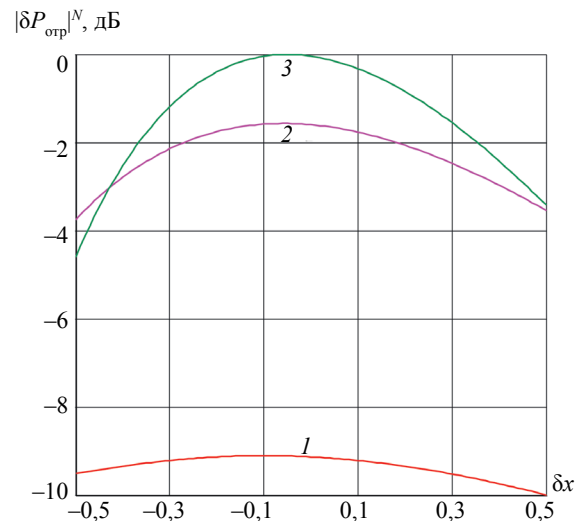


Рис. 8. Нормированные зависимости $|\delta P_{отп}|^N$ от относительного смещения δx для номинального угла ввода $\alpha_0 = 70^\circ$, толщины $H = 12$ мм, размера зерна $\bar{D} = 0,03$ мм, радиуса пьезопластины $a = 3,0$ мм, пути в призме $l_0 = 9$ мм, отражателя-зарубки площадью $S_d = 2,5 \times 2,0$ мм²:
 1 — рабочая частота $f_p = 2,5$ МГц; 2 — $f_p = 5$ МГц;
 3 — $f_p = 7$ МГц.

Теперь возникает вопрос, насколько эффективен контроль при выбранных параметрах (частоте, угле ввода и заданных норм оценки качества СС, табл. 1 и 2). Оценка эффективности УЗ контроля проведена на образцах реальных сварных соединений труб поверхностей нагрева тепловых электростанций.

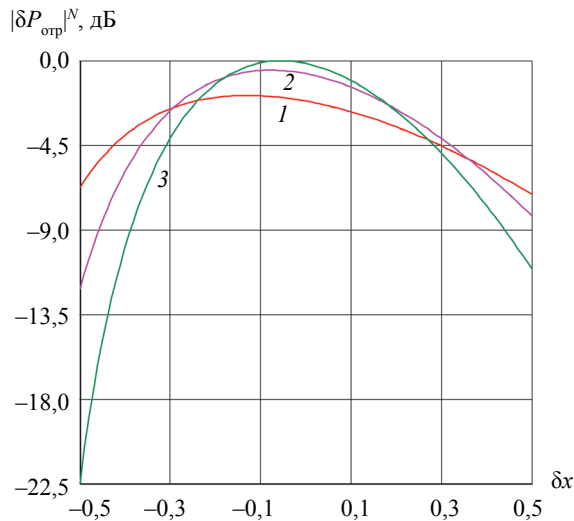


Рис. 9. Нормированные зависимости $|\delta P_{отп}|^N$ от относительного смещения δx для номинального угла ввода $\alpha_0 = 65^\circ$, толщины $H = 18$ мм, размера зерна $\bar{D} = 0,03$ мм, радиуса пьезопластины $a = 4,0$ мм, пути в призме $l_0 = 12$ мм, отражателя-зарубки площадью $S_d = 2,5 \times 2,0$ мм²:
 1 — рабочая частота $f_p = 4$ МГц; 2 — $f_p = 5$ МГц;
 3 — $f_p = 6$ МГц.

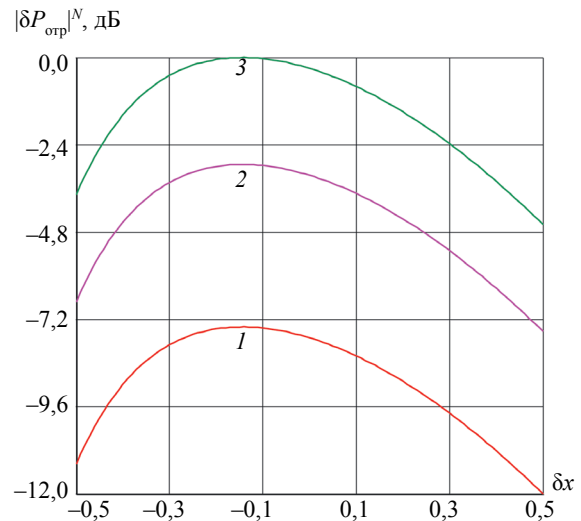


Рис. 10. Нормированные зависимости $|\delta P_{отп}|^N$ от относительного смещения δx для номинального угла ввода $\alpha_0 = 65^\circ$, толщины $H = 18$ мм, размера зерна $\bar{D} = 0,03$ мм, радиуса пьезопластины $a = 6,0$ мм, пути в призме $l_0 = 12$ мм, рабочей частоты $f_p = 2,5$ МГц:
 1 — отражатель-зарубка площадью $S_d = 2,0 \times 1,5$ мм²;
 2 — $S_d = 2,5 \times 2,0$ мм²; 3 — $S_d = 3,5 \times 2,0$ мм².

Исследования проводили в два этапа. Результаты исследования первой партии образцов (всего 21 шт.) представлены в [22], в которой подробно дано описание УЗ контроля каждого образца с применением стандартных (серийных совмещенных наклонных), хордовых и разработанных авторами [22] преобразователей.

На втором этапе работы была получена с ТЭС партия вырезанных сварных соединений поверхностей нагрева котлов. Основанием для вырезки образцов явились результаты штатного визуального измерительного и УЗ контроля СС труб поверхностей нагрева. Эти образцы (20 шт.) подвергали УЗ контролю разработанными ПЭП, обоснование параметров которых приведено в данной статье. При УЗ контроле фиксировались эхосигналы с амплитудой выше поискового уровня (согласно [10], при эксплуатационном контроле фиксируют эхосигналы с амплитудой выше контрольного уровня), то есть на более высокой чувствительности. При настройке на браковочный уровень («зарубка» $1,2 \times 1,0$ мм², см. табл.1) переход на контрольный уровень достигается повышением усиления дефектоскопа на 6 дБ, на поисковый — 12 дБ [10]. Участки образцов СС, в которых обнаружены отражатели с амплитудой выше поискового уровня, подвергали металлографическому анализу. Результаты УЗ контроля и металлографического анализа сравнивали. Проведем качественное описание образцов с дефектами (всего 7 образцов из 20 шт., см. рис. 11—13). Рис. 11а — обнаружена пора с острым краем размером $1,5 \times 0,7$ мм («острие» поры примерно 0,6 мм) на контрольном уровне чувствительности, как точечная (непротяженная) несплошность с амплитудой сигнала выше контрольного, но ниже браковочного уровня чувствительности, то есть согласно [1] это допустимая несплошность. Но в соответствии с требованиями [3] такие несплошности недопустимы (дефекты).

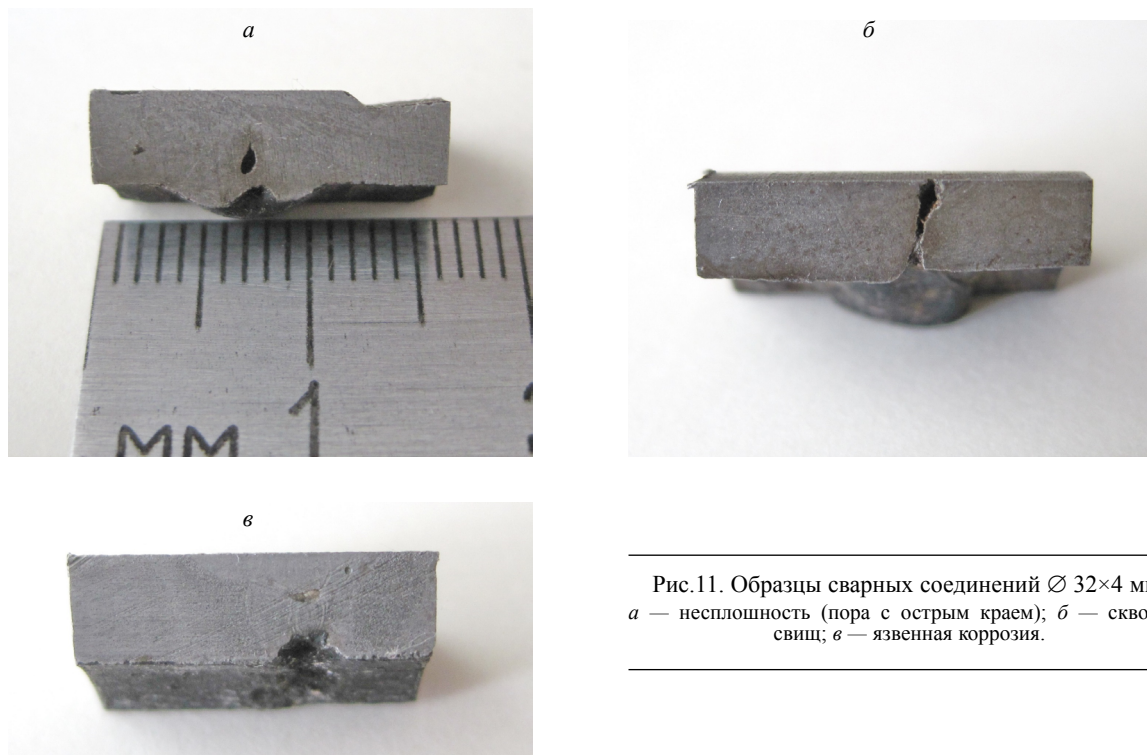


Рис.11. Образцы сварных соединений $\varnothing 32 \times 4$ мм:
 а — несплошность (пора с острым краем); б — сквозной свищ; в — язвенная коррозия.

Казалось бы, недобраковка по результатам УЗ контроля на основе норм [1]. Но! Выявленная внутренняя пора не привела к разрушению СС, хотя имеется концентратор напряжения (острый кончик поры). Непровары на внутренней поверхности СС, подверженные воздействию агрессивного теплоносителя (вода+пар), приводят к образованию свищей: сквозных (рис.11б) или несквозных (рис.11в). Такие свищи легко выявляются на браковочном уровне чувствительности. Можно лишь предположить, что произойдет, если внутренний валик усиления (рис.11а) подвергнется коррозии и агрессивный теплоноситель достигнет поры. Тогда коррозионное разрушение продолжится на острие поры и пора с острым краем будет источником разрушения сварного соединения. Разрушенным следует считать СС, в котором есть сквозной свищ, то есть выход теплоносителя наружу (см. рис. 11б).

На рис.11в показано СС с язвенной коррозией в корне. Коррозия оценена как недопустимая несплошность (протяженная корневая несплошность с амплитудой выше контрольного уровня). Этот пример наряду с другими подтверждает обоснованность норм [1] (см. табл. 1) для толщины 4,0 мм. Характерным дефектом сварного соединения (см. рис. 11а) является свищ, развивающийся от непровара высотой примерно 1,0 мм.

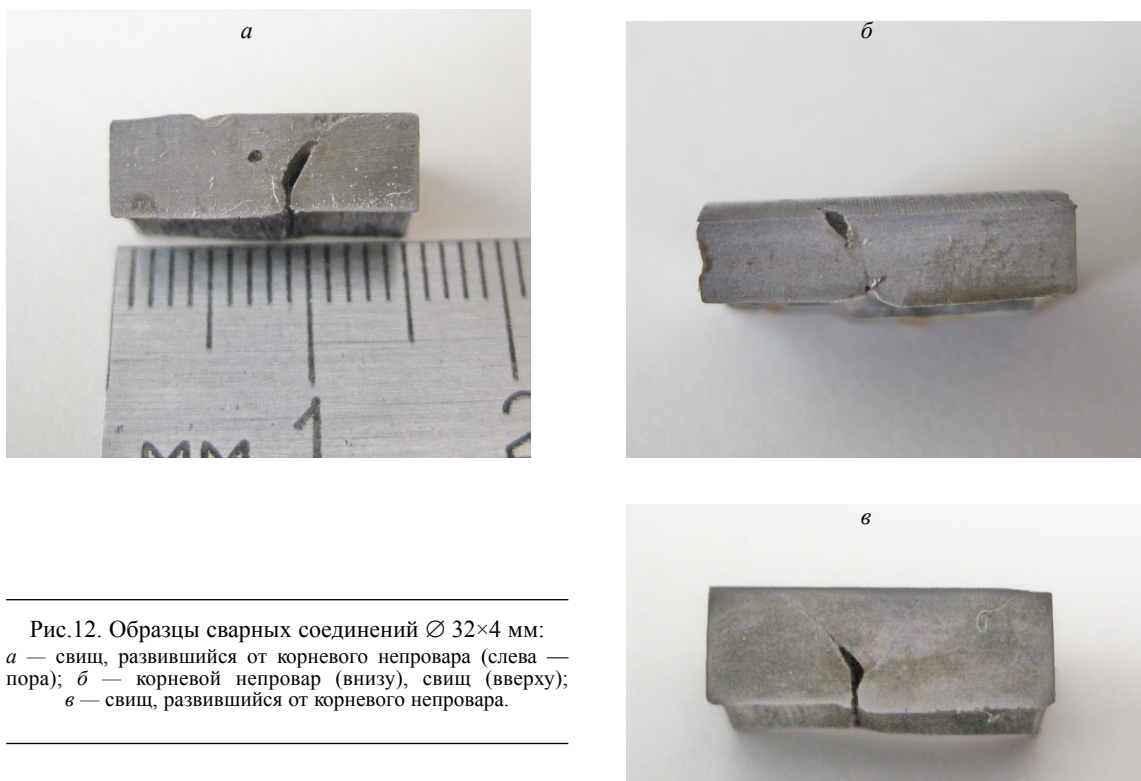


Рис.12. Образцы сварных соединений $\varnothing 32 \times 4$ мм:
a — свищ, развившийся от корневого непровара (слева —
 пора); *б* — корневой непровар (внизу), свищ (вверху);
в — свищ, развившийся от корневого непровара.

Свищ уверенно выявляется на браковочном уровне чувствительности, пора (слева на рис.12*a*) размером 0,8 мм выявляется лишь на поисковом уровне чувствительности. Несплошности сварного соединения, показанные на рис. 12*б*, также выявляются на браковочном уровне: непровар в корне шва — прямым лучом, полость в верхней части СС (свищ) — однократно отраженным лучом (валик усиления СС удален). Свищ СС (рис. 12*в*) развился от непровара высотой примерно 0,9 мм и рост свища проходил по линии сплавления «сварной шов — основной металл».



Рис.13. Образец сварного соединения $\varnothing 32 \times 4$ мм: свищ, заполненный отложениями.

Таким образом, с учетом ранее исследованных 21 шт. образцов СС [22] анализу был подвергнут 41 образец, в которых обнаружены недопустимые несплошности — свищи (всего 15 шт.) развивающиеся от корневых непроваров. Это дефекты уверенно выявляются на браковочном уровне чувствительности, который задается нормами документа [1]. Реализация этих норм позволяет браковать СС по результатам УЗК, в которых обнаружены корневые непровары высотой примерно 0,5—1,0 мм, язвенная коррозия на внутренней поверхности на браковочном уровне чувствительности или на контрольном, если несплошности протяженные.

Совершенно очевидно, что корневые непровары высотой от 0,5 мм и язвенная коррозия, контактирующие с теплоносителем, — источники образования свищей и причина потенциального разрушения СС. Итак, заведомо знаем, что корневые непровары высотой в десятые доли миллиметра (до 0,5 мм) также могут быть в процессе эксплуатации сварного соединения источником образования свищей, но они не выявляются на браковочном уровне чувствительности. В лучшем случае, они могут быть зафиксированы как точечные допустимые несплошности на контрольном уровне чувствительности.

Отсюда следует, что для объективной оценки корневых несплошностей на внутренней поверхности СС необходимо увеличивать чувствительность дефектоскопа как минимум на 6 дБ и оценивать допустимость несплошностей по амплитуде эхосигнала при превышении контрольного уровня (вместо браковочного) и по протяженности — при превышении поискового уровня.

Результаты исследований образцов сварных соединений с толщиной 12 и 18 мм будут опубликованы дополнительно.

ВЫВОДЫ

1. Проведено сравнение норм оценки качества объектов тепловой и атомной энергетики: при одинаковой толщине сварных соединений (рассматривались толщины от 2,0 до 18 мм) нормы в атомной энергетике (сварные соединения I категории) более «жесткие», чем в тепловой.

2. Для объективной оценки норм в документах атомной и тепловой энергетики (в смысле деления дефектов на допустимые и не допустимые) предложено обоснование оптимальной частоты контроля и угла ввода преобразователя проводить расчетным путем. В ходе расчетов необходимо учитывать скорость распространения поперечных волн в металле, средний размер зерна металла, параметры наклонных ПЭП (размер пьезоэлемента, рабочую частоту, номинальный угол ввода, путь ультразвука и его затухание в призме) и др.

3. Рассчитанные параметры контроля (чувствительность и угол ввода ультразвука) подтверждены тем, что при УЗ контроле образцов сварных соединений труб поверхностей нагрева котлов тепловых электростанций в них реально обнаружены недопустимые дефекты. Выявленные дефекты (свищи, язвенная коррозия, поры) подтверждены металлографическим анализом.

4. В статье приведены примеры, показывающие, что дефекты типа корневых непроваров, контактирующие с агрессивным теплоносителем (вода+пар), развиваются и разрушают сварное соединение. На основании данного факта предлагается оценивать несплошности в зависимости от их расположения в сварном соединении: корневые несплошности — на более высоком уровне чувствительности при ее увеличении не менее чем на 6 дБ относительно браковочного уровня, остальные несплошности — по действующим Правилам и нормам.

5. При УЗ контроле сварных соединений дефектоскопами с фазированными решетками предлагается увеличение чувствительности для обнаружения и оценки несплошностей на внутренней поверхности объектов контроля, контактирующей с агрессивным теплоносителем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководящий документ РД 153-34.1-003-01 Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте энергетического оборудования (РТМ-1с). М.: ПИО ОБТ, 2001. 399 с.

2. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-084-15 Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций. М.: Росэнергоатом, 2015. 103 с.

3. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-105-18 Правила контроля металла оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок при изготовлении и монтаже. М.: Росэнергоатом, 2018. 118 с.

4. ГОСТ Р 55724—2013 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. М.: Стандартинформ, 2014. 24 с.

5. ГОСТ Р 50.05.02—2018 Система соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Ультразвуковой контроль сварных соединений и наплавленных покрытий. М.: Стандартинформ, 2018. 135 с.

6. И 34-70-013-84 Инструкция по контролю за металлом котлов, трубы и трубопроводов. М.: Союзтехэнерго, 1985. 40 с.

7. Инструкция по ультразвуковому контролю качества сварных соединений труб поверхностей нагрева котлов тепловых электростанций. М.: Информэнерго, 1969. 28 с.

8. Временная инструкция по ультразвуковому контролю качества сварных соединений трубопроводов среднего и низкого давления с толщиной стенки 4-15 мм. М.: Оргэнергострой, 1972. 17 с.
9. Райхман А.З., Ермолов И.Н. Определение оптимальной чувствительности ультразвукового дефектоскопа и норм оценки качества сварных соединений // Дефектоскопия. 1965. № 4. С. 65—77.
10. РД 34.17.302-07 Руководящий документ. Котлы паровые и водогрейные. Трубопроводы пара и горячей воды, сосуды. Сварные соединения. Контроль качества. Ультразвуковой контроль. Основные положения (ОП 501 ЦД-97). М.: Норма, 1997. 134 с.
11. Ермолов И.Н., Гребенник В.С., Райхман А.З. Отражение ультразвука от углового дефекта // Заводская лаборатория. 1964. № 11. С. 1351—1355.
12. Гребенник В.С. Уточнение характера зависимости амплитуды эхосигнала от величины отражателя углового типа // Дефектоскопия. 1976. № 6. С. 122—124.
13. Перевалов С.П., Райхман А.З. Акустический тракт наклонного искателя для отражателей углового типа. I // Дефектоскопия. 1979. № 11. С. 5—15.
14. Перевалов С.П., Райхман А.З. Акустический тракт наклонного искателя для отражателей углового типа. II // Дефектоскопия. 1979. № 12. С. 28—36.
15. Ермолов И.Н. Амплитуда эхосигнала от угловых отражателей // Дефектоскопия. 1997. № 1. С. 3—11.
16. Ермолов И.Н. О выборе способа настройки чувствительности при контроле тонких сварных соединений // Дефектоскопия. 2002. № 1. С. 60—70.
17. Данилов В.Н., Воронкова Л.В. Просто о физических основах работы преобразователей с фазированными решетками. Ч.4 Сравнение теоретических и экспериментальных результатов исследования работы преобразователей с фазированными решетками и некоторые особенности и возможности их практического применения при ультразвуковом контроле // Контроль. Диагностика. 2018. № 10. С. 20—31.
18. Данилов В.Н., Воронкова Л.В. Просто о преобразователях с фазированными решетками в ультразвуковом контроле. М.: Изд. Дом «Спектр», 2019. 136 с.
19. Данилов В.Н., Ушаков В.М., Михалев В.В. К вопросу о моделировании акустического тракта наклонного преобразователя при ультразвуковом контроле сварных соединений малой толщины // Дефектоскопия. 2012. № 10. С. 28—39.
20. Данилов В.Н. Формулы акустического тракта совмещенного наклонного преобразователя для дальней зоны // Контроль. Диагностика. 2015. № 2. С. 43—50.
21. Данилов В.Н. Формулы акустического тракта дальней зоны совмещенного наклонного преобразователя для угловых отражателей типа вертикального цилиндрического отверстия и засверловки // Контроль. Диагностика. 2015. № 10. С. 9—16.
22. Ушаков В.М., Михалев В.В. Некоторые аспекты применения пьезопреобразователей для ультразвукового контроля сварных соединений малой толщины // Дефектоскопия. 2007. № 3. С. 87—94.
23. Латидус А., Нурматов И., Пасси Г. Эталонирование чувствительности и обеспечение ее равномерности в прозвучиваемом сечении при ультразвуковом контроле сварных соединений с применением ФР-преобразователей // В мире НК. 2016. Т. 19. № 3. С. 17—27.
24. Хильманн С., Шуберт Ф., Бросиус Д.М., Бор Ц. Валидация методики ультразвукового контроля кольцевых сварных швов тонкостенных труб с использованием преобразователей на фазированных решетках // В мире НК. 2016. Т. 19. № 3. С. 30—33.
25. Гребенников Д.В., Гребенников В.В., Тумов В.Ю. Исследование акустического тракта ультразвукового дефектоскопа на фазированных решетках. Диаграммы направленности пьезопреобразователей ультразвукового дефектоскопа типа OmniScan // Контроль. Диагностика. 2017. № 2. С. 34—40.
26. Nanekar P., Jothilakshmi V., Kumar A., Jayakumar T. Sound beam focusing using phased array — SAFT technique // Insight. 2017. V. 59. No. 3. P. 129—137.
27. Metwally K., Lubeigt E., Rakotonarivo S., Chaix JF., Baque F., Gobillot G., Mensah S. Weld inspection by focused adjoint method // Ultrasonics. 2018. February. V. 83. P. 80—87.