

УДК 620.179.162

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-1-81-88

Влияние способа настройки чувствительности ультразвукового контроля на ее распределение по толщине сварных соединений строительных конструкций

С. А. Бехер, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

С. П. Шляхтенков, аспирант, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

Е. В. Бояркин, кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

К. В. Канифадин, кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

К. В. Власов, кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

Сварка является одним из наиболее часто применяемых способов изготовления ответственных стальных конструкций: балок и опор зданий и мостов, рам и кузовов подвижного состава. При этом качество изготовления сварных соединений напрямую влияет на прочность и долговечность конструкций. Используемые в настоящее время технологии изготовления сварных швов включают в себя ультразвуковой контроль в целях повышения надежности и безотказности свариваемых конструкций. Методики проведения ультразвукового контроля регламентируются несколькими стандартами: ГОСТ Р ИСО 17640, СТО-ГК «Трансстрой»-005–2007 и ГОСТ Р 55724, каждый из которых определяет разные способы настройки чувствительности. В этих условиях актуальным является вопрос анализа результатов ультразвукового контроля, выполненного в соответствии с разными нормативными документами.

Проведен сравнительный анализ распределения чувствительности ультразвукового контроля по толщине сварного шва с использованием двух цилиндрических контрольных отражателей и настроечных образцов с отражателями типа бокового цилиндрического отверстия и зарубки. Разработан и изготовлен образец с цилиндрическими отражателями диаметрами 2 и 3 мм для настройки чувствительности ультразвукового контроля сварных соединений способом DAC по ISO 17640 и двухзонного контроля прямым и однократно отраженным лучами по СТО-ГК «Трансстрой»-005–2007. Экспериментально установлены закономерности изменения амплитуды и коэффициента выявляемости сигналов от отражателей, расположенных на разной глубине, при различных способах настройки чувствительности на частоте 5 МГц. Экспериментально показано, что использование для выравнивания чувствительности по глубине сварного соединения цилиндрических отражателей и зарубок при толщине изделия до 15 мм эквивалентно с неравномерностью не более 1,5 дБ. Для обеспечения равномерной чувствительности с неопределенностью не более 2 дБ может быть использован метод двухпараметрической временной регулировки чувствительности (ВРЧ), настраиваемый по трем отражателям, расположенным на границах зоны контроля и в средней точке.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, сварные соединения, выравнивание чувствительности по глубине, вероятность обнаружения дефекта.

Введение

Сварка является наиболее распространенным способом изготовления ответственных стальных конструкций: балок и опор искусственных сооружений, несущих элементов всех видов транспорта. При этом прочность и долговечность конструкций в значительной степени определяется качеством сварных соединений [1–3]. Для повышения их надежности и безотказности во всех существующих технологиях изготовления на завер-

шающем этапе предусмотрен ультразвуковой контроль (УЗК) сварных швов [4–8].

Современное развитие УЗК направлено на повышение эффективности и достоверности его результатов. Широко используются, но все еще находятся в стадии развития такие технологии как бесконтактные преобразователи, использующие электромагнитоакустический эффект [9], матричные преобразователи для управления акустическим лучом [10, 11], программное обеспечение на основе нейронных сетей для

анализа результатов контроля [12], методики на основе эффекта акустоупругости для оценки механических напряжений в материале [13, 14].

В области УЗК конструкций действуют несколько нормативных документов: ГОСРТ Р ИСО 17640, СТО-ГК «Трансстрой»-005–2007 и ГОСТ Р 55724, каждый из которых регламентирует разные способы настройки чувствительности [15]. В ISO 11666 для эхометода предусмотрено четыре техники: по боковым цилиндрическим отверстиям диаметром 3 мм, расположенным на различной глубине; с использованием диаграммы [16] «расстояние – коэффициент усиления – размер дефекта» (DGS) по плоскодонному отражателю, ориентированному перпендикулярно акустической оси, или диаграммы «расстояние – амплитуда – поправка» (DAC) по уголкового отражателю; четвертый способ предполагает методику-тандем (прозвучивание шва двумя ПЭП) и плоскодонное отверстие (как по второму способу), однако в данной статье 4-й способ не рассматривается. В национальных стандартах допускается использование любых способов настройки чувствительности, которые должны быть пересчитаны к предельной чувствительности, определяемой площадью идеального отражателя. При этом на регистрируемые сигналы оказывают влияние достаточно большое количество случайных факторов [17], которые могут как повышать, так и снижать вероятности обнаружения дефектов. Ответственность за выбор способа и проведения настройки возложена на специалистов ультразвукового контроля.

Отличительной особенностью УЗК является изначально неравномерная чувствительность к расположенным на различной глубине дефектам [18]. Для ее выравнивания используются специальные функции дефектоскопа, реализующие изменение усиления в зависимости от времени распространения эхоимпульса (глуби-

ны залегания или расстояния до отражателя). Наиболее часто используются: временная регулировка чувствительности (ВРЧ), DGS- и DAC-диаграммы. При этом актуальным остается вопрос сравнительного анализа закономерностей распределения чувствительности по толщине сварного соединения и, следовательно, сопоставимости результатов ультразвукового контроля, выполненного в соответствии с различными нормативными документами.

Цель исследования – сравнительный анализ распределения чувствительности ультразвукового контроля для различных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) по толщине сварного шва с использованием двух цилиндрических контрольных отражателей, DAC-кривых, построенных с помощью многоточечного ВРЧ, настроенных образцов с отражателями типа зарубки.

Методы и средства испытаний

Экспериментальные исследования проводились с использованием дефектоскопов УД2-102 и УД3-204. Дефектоскоп первого типа обеспечивает возможность контроля в двух временных зонах с разной чувствительностью или выравнивание чувствительности с помощью двухпараметрического ВРЧ (амплитуда ВРЧ и форма кривой ВРЧ). Дефектоскоп второго типа реализует в том числе более «тонкую» настройку чувствительности с помощью многоточечного ВРЧ. Измерения проводились дефектоскопом УД3-204, дефектоскоп УД2-102 использовался только для проверки возможности выравнивания чувствительности с помощью двухпараметрического ВРЧ. Предварительно глубиномер дефектоскопа настраивался на стандартном образце СО-3Р.

В испытаниях использовались совмещенные наклонные пьезоэлектрические преобразователи с частотой 5 МГц и номинальным углом ввода 65 град с прямоугольными и круглыми пьезопластинами, защитными керамическими протекторами и без них (табл. 1).

Таблица 1. Параметры пьезоэлектрических преобразователей

Table 1. Parameters of the piezoelectric transducers

№	Маркировка преобразователя	Протектор керамический	Угол ввода на образце, град	Размеры или диаметр пьезопластины, мм	Точка выхода луча, мм
1	121-5-65-АМ-001	Нет	65	5×10	7
2	121-5,0-65-К8	Да	65	∅ 8	7
3	121-5-65-003	Нет	64	5×10	7

Для настройки и исследования акустического поля ПЭП использовались два типа настроечных образцов (рис. 1, а, б): образец с цилиндрическими боковыми параллельными поверхности ввода отверстиями диаметром 3 мм на глубине

3, 6, 8, 12, 18, 24, 30 мм; три образца с толщиной 4, 6 и 8 мм с уголковыми отражателями, изготовленными в форме зарубки с перпендикулярной поверхности ввода прямоугольной отражающей поверхностью протяженностью 2 мм

и глубиной 1 мм. На образцах с угловыми отражателями настройка проводилась прямым лучом и двухкратно отраженным лучом. Однократно отраженный луч не использовался в работе из-за сложности разделения эхоимпульсов от поверхностной и поперечной волн. Двухкратно от-

раженный луч обеспечивал определения амплитуды эхоимпульсов на глубине 12, 18 и 24 мм. Площадь зарубки по ГОСТ Р 55724–2013 соответствует предельной площади 1,3 мм², равной площади плоскодонного отражателя, перпендикулярного акустической оси ПЭП.

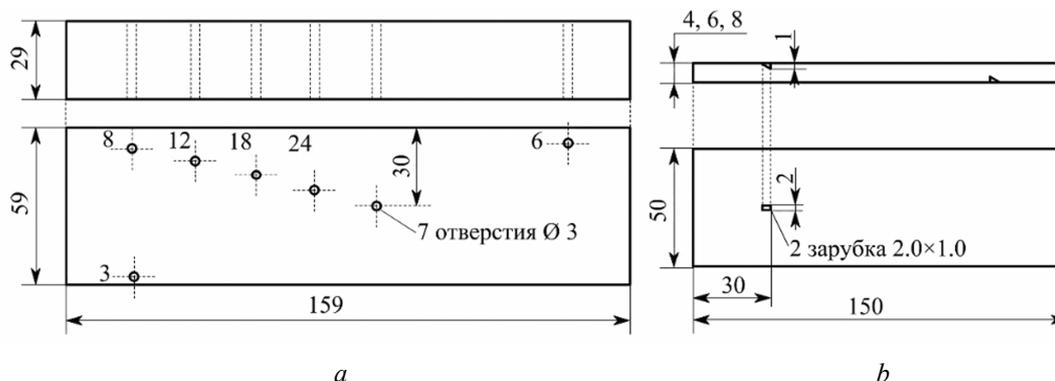


Рис. 1. Образцы для настройки чувствительности с цилиндрическими отражателями (а) и угловыми отражателями типа зарубки (b)

Fig. 1. Samples for sensitivity adjustment with cylindrical reflectors (a) and corner reflectors of the notch type (b)

Используемые преобразователи с резонансной частотой 5 МГц возбуждают в стали акустические волны длиной 0,63 мм. Грубая оценка размера ближней зоны ПЭП без учета акустической задержки и импульсного характера излучения дает расстояние 25 мм или 10 мм по глубине для угла ввода 65 град. Известные теоретические зависимости, описывающие закономерности распределения акустической волны в дальней зоне, справедливы при глубине расположения отражателя более или приблизительно равной 10 мм.

Экспериментальные результаты и их анализ

Огибающие эхосигналов (рис. 2) построены для цилиндрических отражателей, расположенных на глубине 3, 6, 12, 18, 24, 30 мм. Амплитуды всех сигналов приведены к порогу фиксации дефектоскопа (уровню строга). Одновременно с формой сигналов на рисунке 2 указаны усиления дефектоскопа по отношению к эхосигналу от отражателя, залегающего на минимальной глубине 3 мм. При увеличении глубины залегания, очевидно, уменьшается амплитуда сигналов и увеличивается ширина ультразвукового пучка, обусловленная раскрытием диаграммы направленности ПЭП. Амплитуда эхосигналов от отражателей на глубине 3 и 30 мм отличается более чем в 10 раз (на 23 дБ), а проекция ширины пучка на ось, перпендикулярную поверхности ввода, изменяется в диапазоне 2...11 мм.

Разница необходимых усиления дефектоскопа для выравнивания амплитуд эхосигналов, полученных разными ПЭП, составляет около 20 дБ. Наименьший коэффициент преобразования наблюдается у ПЭП с керамическим протектором и круглой пьезопластиной. При этом коэффициенты аппроксимации двух ПЭП с одинаковыми протекторами и пьезопластинами также отличаются в пять раз. В диапазоне 15...24 мм (рис. 3, а) наблюдается характерный излом зависимости коэффициента усиления от глубины отражателя у всех исследуемых ПЭП.

Зависимость амплитуды эхоимпульсов от глубины залегания отражателя (рис. 3, б) аппроксимировалась методом наименьших квадратов с коэффициентом корреляции 0,95...0,99 степенной функцией вида

$$A = a \left(\frac{h}{h_0} \right)^b, \tag{1}$$

где A – амплитуда эхоимпульса, относительные единицы; h – глубина залегания отражателя, мм; $h_0 = 1$ мм – нормировочный коэффициент; a и b – постоянные коэффициенты аппроксимации, значения которых приведены в таблице 2.

Полученные значения коэффициента b указывают на обратную пропорциональность амплитуды эхоимпульса и глубины залегания, что не соответствует теоретически предсказываемой для цилиндрических отражателей в дальней зо-

не зависимости вида $A \propto h^{-1,5}$ и связано с влиянием ближней зоны ПЭП. Построение одной ВРЧ для выравнивания амплитуд эхоимпульсов сразу для трех преобразователей с использованием средних значений коэффициентов недопустимо, так как отклонение амплитуд отражателей от порога фиксации дефектоскопа превышает 3 дБ. Использование коэффициентов аппроксимации для построения ВРЧ конкретного ПЭП обеспечивает равенство амплитуд с не-

определенностью не более 1,5 дБ в диапазоне 3...24 мм. Полученные зависимости полностью характеризуются только двумя параметрами – коэффициентами аппроксимации a (коэффициент пропорциональности) и b (показатель степени). Таким образом, даже простейшее двухпараметрическое ВРЧ дефектоскопа УД2-102 позволяет реализовать необходимое выравнивание амплитуды сигналов по глубине с неопределенностью не более 1,5 дБ.

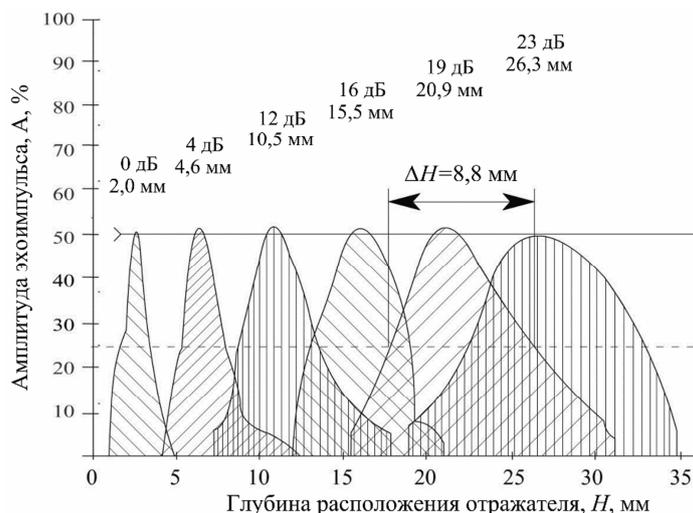


Рис. 2. Огибающие эхосигналов цилиндрического отражателя, коэффициенты усиления и глубина

Fig. 2. Envelopes of echoes of a cylindrical reflector, gain coefficients and depth

Таблица 2. Значения коэффициентов аппроксимации зависимости амплитуды эхоимпульсов цилиндрических отражателей от глубины залегания по формуле (1)

Table 2. Values of the approximation coefficients of the dependence of the amplitude of the echo pulses of cylindrical reflectors on the depth of occurrence according to the formula (1)

Коэффициент	ПЭП 1	ПЭП 2	ПЭП 3	Среднее значение
a	2,6	1,8	2,2	2,2
b	-1,0	-0,8	-0,98	-0,93

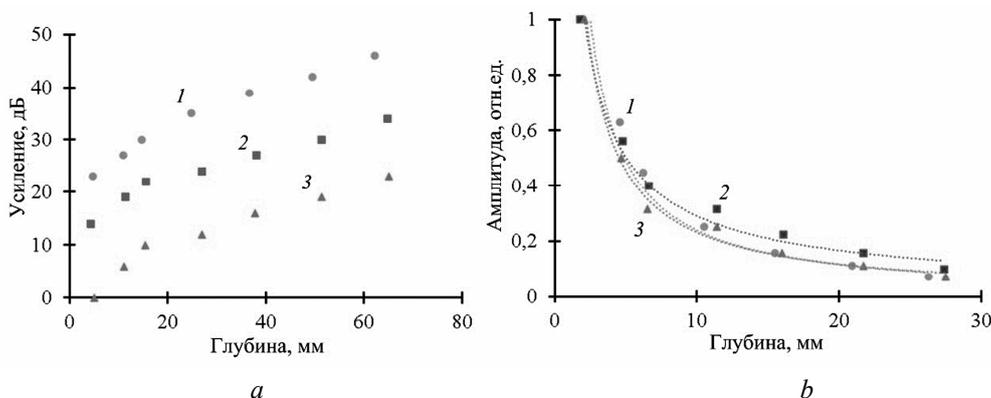


Рис. 3. Зависимость коэффициентов усиления (a), при которых эхосигнал цилиндрического отражателя достигает порогового уровня дефектоскопа, и относительной амплитуды (b) эхосигналов от глубины: 1, 2, 3 – номера ПЭП в соответствии с таблицей 1; линии – аппроксимация степенной функцией

Fig. 3. The dependence of the gain coefficients (a) at which the echo signal of the cylindrical reflector reaches the threshold level of the flaw detector and the relative amplitude (b) of the echo signals on the depth: 1, 2, 3 - the numbers of the piezoelectric transducer in accordance with Table 1; the lines are approximated by a power function

Регистрация огибающих сигналов уголкового отражателем (рис. 4) является значительно более трудоемким процессом по сравнению с цилиндрическими отражателями. При этом необходимо контролировать две координаты, характеризующие положение ПЭП, дополнительно: направленность излучения и приема волн и качество акустического контакта. Данная процедура требует навыков работы с преобразователем. Амплитуда эхосигнала при перемещении ПЭП изменяется немонотонно, что связано с интерференцией волн и близостью третьего критического угла, равного 34 град. На огибающих эхоимпульсов наблюдаются локальные максимумы, которые при неблагоприятном наложении друг на друга могут увеличить амплитуду эхоимпульса бокового луча по сравнению с амплитудой эхоимпульса центрального луча. Неопределенность коэффициента усиления по каждому отражателю достигает 2...3 дБ.

Для одной глубины залегания амплитуды эхоимпульсов цилиндрических отражателей диаметром 3 мм в 135 раз (на 43 дБ) больше амплитуды эхоимпульсов зарубок размерами 2×1 мм. Однако зависимость амплитуды от глубины расположения зарубок описывается зависимостью близкой к зависимости, полученной для цилиндрических отражателей (рис. 5). Показатель степени по результатам аппроксимации составил $b = 0,84$, коэффициент $a = 2,2$, что сопоставимо с полученными ранее значениями в таблице 2 для боковых отверстий. Рассчитанные максимальные неопределенности результатов измерений на рисунке 5 составляют от 1,0 до 1,5 дБ и обусловлены вариациями акустического контакта ПЭП. Разница аппроксимирующих зависимостей (см. рис. 5) для глубины 3...40 мм достигает максимального значения при наибольшей глубине и не превышает 1,5 дБ.

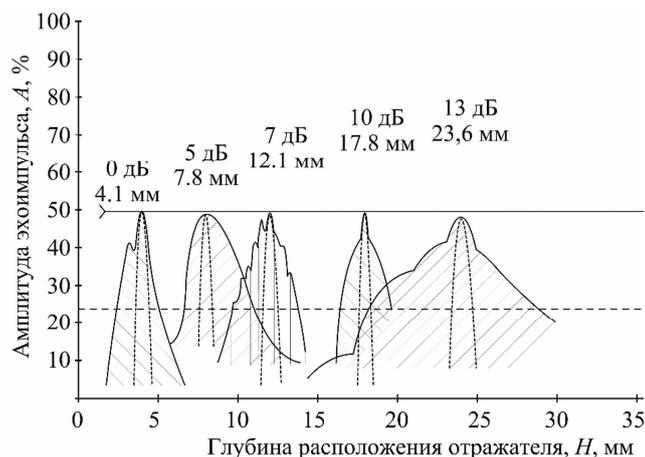


Рис. 4. Огибающие эхосигналов уголковых отражателей 2,0×1,0 мм, коэффициенты усиления и глубина

Fig. 4. Envelopes of the echo signals of corner reflectors 2.0×1.0 mm, gain coefficients and depth

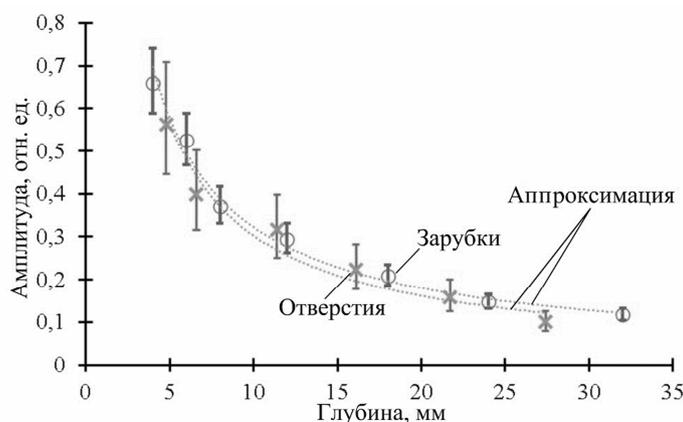


Рис. 5. Зависимость амплитуды эхоимпульсов боковых отверстий и зарубок от глубины расположения отражателя для ПЭП № 2 (см. табл. 1)

Fig. 5. Dependence of the amplitude of the echo pulses of the side holes and notches on the depth of the reflector location for piezoelectric transducer No. 2 (see Table 1)

Выводы

В зависимости от конструкции ПЭП (формы и размеров пьезопластины, наличия износостойкого протектора, встроенного электрического согласования) абсолютное значение коэффициента преобразования даже серийно выпускаемых ПЭП отличается в 10 раз и более (на 20 дБ). Зависимости амплитуды эхоимпульсов боковых цилиндрических отверстий и уголкового отражателей (зарубок) от глубины в диапазоне 3...24 мм сопоставимы и представляют собой степенную функцию с показателем близким к $b = -1$. В зависимости от используемого ПЭП и вида отражателя показатель степени изменяется в диапазоне $-1,0 \dots -0,8$.

Использование двух исследованных видов отражателей для выравнивания амплитуд является равнозначным. Неравномерность амплитуд по глубине после настройки дефектоскопа не превышает 1,5 дБ, что сопоставимо с неопределенностью, вызванной непостоянством акустического контакта ПЭП с объектом контроля. Для УЗК сварных швов толщиной 8...15 мм прямым и однократно отраженным лучом использование простейшего двухпараметрического ВРЧ вместо многоточечного ВРЧ и ДАС-кривых позволяет обеспечить равенство амплитуд эхосигналов отражателей, залегающих на разной глубине, с неопределенностью не более 1,5 дБ.

Библиографические ссылки

1. Deepak J.R., Bupesh Raja V.K., Srikanth D., Surendran H., Nickolas M.M. (2021) Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study: *Materials Today: Proc.*, vol. 44, no. 5, pp. 3732-3737. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.578
2. Nadimpalli V.K., Karthik G., Janakiram G., Nagu P.B. (2020) Monitoring and repair of defects in ultrasonic additive manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 108, pp. 1793-1810. DOI: 10.1007/s00170-020-05457-w
3. Bhat M.R., Ragupathy V.D. (2019) Characterisation of Friction Stir Weld Discontinuities by Non-destructive Evaluation. *Trans Indian Inst Met*, vol. 72, pp. 2971-2979. DOI: 10.1007/s12666-019-01813-x
4. Qiuyue F., Guocheng X., Xiaopeng G. (2020) Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Porosity Size and Location of Spot Welding Based on Wavelet Packet Analysis. *J NondestructEval*, vol. 39, no. 7. DOI: 10.1007/s10921-019-0650-1
5. Ravindra Kumar P., Vijay Kumar G., Naga Murali K., Kishore R.B.S.S., Xiaoliang Jin. (2020) Experimental Investigation of Ultrasonic Flaw Defects in Weld Clad Materials Using NDT Technique: *Advances in Applied Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, p. 1205. DOI: 10.1007/978-981-15-1201-8_111
6. Zhe Wang, Hai-Ming Pu, Yi-Hua Kang, Bao-Qiang Wang (2020) Nondestructive testing method and application for internal defect of metal balls. *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 35, no. 2, pp. 177-189. DOI: 10.1080/10589759.2019.1652296
7. Nan Ding (2020) Multi-angle phased array ultrasonic line-scan method for steel reinforced polyethylene electro-fusion welded joint. *IOP Conf. Ser.: Proc. Sci. Eng.*, vol. 677. DOI: 10.1088/1757-899X/677/2/022049
8. Xinpei Liu, Brian Uy., Abhijit Mukherjee (2019) Transmission of ultrasonic guided wave for damage detection in welded steel plate structures. *Steel and Composite Structures*, vol. 33, no. 3, pp. 445-461. DOI: 10.12989/scs.2019.33.3.445
9. Yan Y., Liu D., Gao B., Tian G.Y., Cai Z.C. (2020) A deep learning-based ultrasonic pattern recognition method for inspecting girth weld cracking of gas pipeline. *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 14, pp. 7997-8006. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2982680
10. Qiang Wang, Kai Zhua, Linlin Wua, Haihang Lia, Xiaomeng Xua, Sifan Gongga (2020) Performance evaluation of austenitic stainless steel weld by ultrasonic phased array inspection based on probability of detection. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 56, pp. 566-573. DOI: 10.1134/s1061830920070086
11. Пилюгин С. О., Лунин В. П. Определение вероятности обнаружения дефектов в сварных швах при ультразвуковом контроле фазированной решеткой // *Дефектоскопия*. 2016. № 6. С. 35–41 = Pilyugin S.O., Lunin V.P. (2016) [Determining the probability of detecting flaws in weld joints by phased-array ultrasonic testing]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 52, no. 6, pp. 332-338. DOI: 10.1134/S1061830916060085
12. Lucas C. Silva, Eduardo F. Simas Filho, Maria C.S. Albuquerque, Ivan C. Silva, Claudia T.T. Farias (2020) Segmented analysis of time-of-flight diffraction ultrasound for flaw detection in welded steel plates using extreme learning machines. *Ultrasonics*, vol. 102.
13. Муравьев В. В., Волкова Л. В., Лапченко М. А. Ультразвуковой контроль остаточных напряжений в бандажах локомотивных колес при производстве // *Дефектоскопия*. 2015. № 5. С. 3–16 = Murav'yev V.V., Volkova L.V., Lapchenko M.A. (2015) [Ultrasonic in process control of residual stresses in locomotive tires]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 51, no 5, pp. 259-271. DOI: 10.1134/S1061830915050046
14. Муравьев В. В., Тапков К. А., Ленков С. В. К вопросу контроля остаточных напряжений в дифференцированно термоупрочненных рельсах // *Дефектоскопия*. 2018. № 10. С. 3–9 = Murav'yev V.V., Tapkov K.A., Len'kov S.V. (2018) [On the question of monitoring residual stresses in selectively heat-strengthened rails]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 54, no 10, pp. 675-681. DOI 10.1134/S0130308218100019
15. Ушаков В. М., Данилов В. Н. К вопросу оценки чувствительности ультразвукового контроля сварных соединений объектов энергетики // *Дефектоскопия*.

2019. № 10. С. 3–13 = Ushakov V.M., Danilov V.N. (2019) [To the question of assessing the sensitivity of ultrasonic testing of welded joints of energy industry objects]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 55, no. 10, pp. 701-712. DOI: 10.1134/S0130308219100014

16. Базулин А. Е., Базулин Е. Г., Исмаилов Г. М. Расчет АРД-диаграмм для систем ультразвукового контроля с применением фазированных решеток // Дефектоскопия. 2014. № 1. С. 37–46 = Bazulin A.E., Bazulin E.G., Ismailov G.M. (2014) [The calculation of DGS diagrams for ultrasound testing systems with the use of phased arrays]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 50, no. 1, pp. 29-37. DOI: 10.1134/S1061830914010033

17. Муравьева О. В., Муравьев В. В., Габбасова М. А. Вероятностно-статистические параметры сигнала при контроле цилиндрических объектов зеркально-теневым методом многократных отражений // Дефектоскопия. 2015. № 12. С. 11–19 = Murav'yeva O.V., Murav'yev V.V., Gabbasova M.A. (2015) [The probability and statistical parameters of a signal during the testing of cylindrical objects by the multiple-reflection echo-shadow method]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 51, no. 12, pp. 720-726. DOI: 10.1134/s1061830915120074

18. Некоторые особенности применения АРД-(AVG)-диаграмм при ультразвуковом контроле сварных соединений / В. М. Ушаков, Д. М. Давыдов, В. В. Михалев, И. И. Муравская // Дефектоскопия. 2009. № 7. С. 3–7 = Ushakov V.M., Davydov D.M., Mikhalev V.V. (2009) [Some special features of using DGS (AVG) diagrams during ultrasonic testing of welded joints]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 45, no. 7, pp. 445-448. DOI: 10.1134/S1061830909070018

References

1. Deepak J.R., Bupesh Raja V.K., Srikanth D., Surendran H., Nickolas M.M. (2021) Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study: *Materials Today: Proc.*, vol. 44, no. 5, pp. 3732-3737. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.578

2. Nadimpalli V.K., Karthik G., Janakiram G., Naga P.B. (2020) Monitoring and repair of defects in ultrasonic additive manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 108, pp. 1793-1810. DOI: 10.1007/s00170-020-05457-w

3. Bhat M.R., Ragupathy V.D. (2019) Characterisation of Friction Stir Weld Discontinuities by Non-destructive Evaluation. *Trans Indian Inst Met*, vol. 72, pp. 2971-2979. DOI: 10.1007/s12666-019-01813-x

4. Qiuyue F., Guocheng X., Xiaopeng G. (2020) Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Porosity Size and Location of Spot Welding Based on Wavelet Packet Analysis. *J NondestructEval*, vol. 39, no. 7. DOI: 10.1007/s10921-019-0650-1

5. Ravindra Kumar P., Vijay Kumar G., Naga Murali K., Kishore R.B.S.S., Xiaoliang Jin. (2020) Experimental Investigation of Ultrasonic Flaw Defects in Weld

Clad Materials Using NDT Technique: *Advances in Applied Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, p. 1205. DOI: 10.1007/978-981-15-1201-8_111

6. Zhe Wang, Hai-Ming Pu, Yi-Hua Kang, Bao-Qiang Wang (2020) Nondestructive testing method and application for internal defect of metal balls. *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 35, no. 2, pp. 177-189. DOI: 10.1080/10589759.2019.1652296

7. Nan Ding (2020) Multi-angle phased array ultrasonic line-scan method for steel reinforced polyethylene electro-fusion welded joint. *IOP Conf. Ser.: Proc. Sci. Eng.*, vol. 677. DOI: 10.1088/1757-899X/677/2/022049

8. Xinpei Liu, Brian Uy., Abhijit Mukherjee (2019) Transmission of ultrasonic guided wave for damage detection in welded steel plate structures. *Steel and Composite Structures*, vol. 33, no. 3, pp. 445-461. DOI: 10.12989/scs.2019.33.3.445

9. Yan Y., Liu D., Gao B., Tian G.Y., Cai Z.C. (2020) A deep learning-based ultrasonic pattern recognition method for inspecting girth weld cracking of gas pipeline. *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 14, pp. 7997-8006. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2982680

10. Qiang Wang, Kai Zhua, Linlin Wua, Haihang Lia, Xiaomeng Xua, Sifan Gongga (2020) Performance evaluation of austenitic stainless steel weld by ultrasonic phased array inspection based on probability of detection. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 56, pp. 566-573. DOI: 10.1134/s1061830920070086

11. Pilyugin S.O., Lunin V.P. (2016) [Determining the probability of detecting flaws in weld joints by phased-array ultrasonic testing]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 52, no. 6, pp. 332-338. DOI: 10.1134/S1061830916060085

12. Lucas C. Silva, Eduardo F. Simas Filho, Maria C.S. Albuquerque, Ivan C. Silva, Claudia T.T. Farias (2020) Segmented analysis of time-of-flight diffraction ultrasound for flaw detection in welded steel plates using extreme learning machines. *Ultrasonics*, vol. 102.

13. Murav'yev V.V., Volkova L.V., Lapchenko M.A. (2015) [Ultrasonic in process control of residual stresses in locomotive tires]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 51, no 5, pp. 259-271. DOI: 10.1134/S1061830915050046

14. Murav'yev V.V., Tapkov K.A., Len'kov S.V. (2018) [On the question of monitoring residual stresses in selectively heat-strengthened rails]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 54, no 10, pp. 675-681. DOI 10.1134/S0130308218100019

15. Ushakov V.M., Danilov V.N. (2019) [To the question of assessing the sensitivity of ultrasonic testing of welded joints of energy industry objects]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 55, no. 10, pp. 701-712. DOI: 10.1134/S0130308219100014

16. Bazulin A.E., Bazulin E.G., Ismailov G.M. (2014) [The calculation of DGS diagrams for ultrasound testing systems with the use of phased arrays]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 50, no. 1, pp. 29-37. DOI: 10.1134/S1061830914010033

17. Murav'yeva O.V., Murav'yev V.V., Gabbasova M.A. (2015) [The probability and statistical parame-

ters of a signal during the testing of cylindrical objects by the multiple-reflection echo-shadow method]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 51, no. 12, pp. 720-726. DOI: 10.1134/s1061830915120074

18. Ushakov V.M., Davydov D.M., Mikhalev V.V. (2009) [Some special features of using DGS (AVG) diagrams during ultrasonic testing of welded joints]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 45, no. 7, pp. 445-448. DOI: 10.1134/S1061830909070018

Influence of Ultrasonic Testing Sensitivity Adjusting Method on Its Distribution over the Welded Joints Thickness of Building Structures

S.A. Becher, DSc in Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

S.P. Shlyakhtenkov, Post-graduate, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

E.V. Boyarkin, PhD in Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

K.V. Kanifadin, PhD in Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

K.V. Vlasov, PhD in Engineering, Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Welding is one of the most commonly used methods of manufacturing critical steel structures: beams and supports of buildings and bridges, frames and bodies of rolling stock. At the same time, the manufacturing quality of welded joints directly affects the strength and durability of structures. Currently used weld manufacturing technologies include ultrasonic testing in order to increase the reliability and failure-free operation of welded structures. The methods of ultrasound control are regulated by several standards: GOST R ISO 17640, STO-GC Transstroy-005-2007 and GOST R 55724, each of which defines different ways to adjust sensitivity. In these conditions, the issue of analyzing the ultrasound control results performed in accordance with various regulatory documents is relevant.

A comparative analysis of the ultrasonic inspection sensitivity distribution over the weld thickness was carried out using two cylindrical control reflectors and tuning samples with reflectors of the lateral cylindrical hole and notch types. A sample with cylindrical reflectors with diameters of 2 mm and 3 mm was developed and manufactured to adjust the sensitivity of welded joint ultrasonic inspection by the DAC method according to ISO 17640 and two-zone control by direct and single-reflected beams according to STO-GC "Transstroy"-005-2007. The regularities of amplitude changes and detection coefficient of reflector signals located at different depths with different methods of sensitivity adjustment at a frequency of 5 MHz have been experimentally established. It has been experimentally shown that the use of cylindrical reflectors and notches for leveling sensitivity in the depth of the welded joint with a product thickness of up to 15 mm is equivalent with an unevenness of no more than 1.5 dB. To ensure uniform sensitivity with an uncertainty of no more than 2 dB, a two-parameter RF can be used, adjusted by three reflectors located at the boundaries of the control zone and at the midpoint.

Keywords: ultrasonic inspection, welded joints, depth sensitivity alignment, probability of defect detection.

Получено 22.02.2024

Образец цитирования

Влияние способа настройки чувствительности ультразвукового контроля на ее распределение по толщине сварных соединений строительных конструкций / С. А. Бехер, С. П. Шляхтенков, Е. В. Бояркин, К. В. Канифадин, К. В. Власов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 1. С. 81–88. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-1-81-88

For Citation

Becher S.A., Shlyakhtenkov S.P., Boyarkin E.V., Kanifadin K.V., Vlasov K.V. (2024) [Influence of Ultrasonic Testing Sensitivity Adjusting Method on Its Distribution over the Welded Joints Thickness of Building Structures]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2024, vol. 27, no. 1, pp. 81-88 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-1-81-88