

УДК 620.179.16

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗИРОВАННОЙ РЕШЕТКИ

© Александр Викторович Гончар, Василий Васильевич Мишакин,  
Ольга Александровна Сергеева

*Институт проблем машиностроения РАН - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» ИПМ РАН, Нижний Новгород, Россия*  
[imndt31@mts-nn.ru](mailto:imndt31@mts-nn.ru)

**Аннотация.** Проведены экспериментальные исследования влияния температуры объекта контроля и датчика на фазированных решетках на результаты ультразвукового контроля. Получено, что при повышении температуры амплитуда сигнала от дефекта на А-скане существенно увеличивается, что оказывает значительное влияние на измеряемые размеры дефекта на S-скане. Установлено, что зависимость амплитуды сигнала от температуры является линейной, зависимость размера дефекта на S-скане от температуры описывается гиперболой. Предлагается использовать полученные результаты при ультразвуковом контроле элементов конструкций с использованием фазированной решетки для корректировки размеров выявленных дефектов с учетом температуры.

**Ключевые слова:** фазированные решетки, ультразвуковой контроль, секторное сканирование, температура, сварное соединение, дефект.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-6069.2018.8).

## INFLUENCE OF THE TEMPERATURE ON THE PHASED ARRAY ULTRASONIC TESTING RESULTS

© A.V. Gonchar, V.V. Mishakin, O.A. Sergeeva

*Mechanical Engineering Research Institute of RAS - branch of the "Federal Research Center The Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod, Russia*  
[imndt31@mts-nn.ru](mailto:imndt31@mts-nn.ru)

**Abstract.** Experimental studies of the temperature influence of the test object and the phased array sensor on the results of ultrasonic testing are carried out. It was found that with increasing temperature, the signal amplitude from the defect on the A-scan increases, which has a significant effect on the measured dimensions of the defect on the S-scan. It was established that the dependence of the signal amplitude on temperature is linear, the temperature dependence of the defect size on the S-scan is described by a hyperbola. It is proposed to use the results obtained in ultrasonic testing of structural elements using a phased array to adjust the size of the detected defects with regard to temperature.

**Key words:** phased arrays, ultrasonic testing, sector scanning, temperature, welded joint, defect.

*Acknowledgements. This work was supported by grant of the President of the Russian Federation (МК-6069.2018.8).*

**Введение.** В настоящее время ультразвуковая томография с применением фазированных решеток получила широкое распространение в области неразрушающего контроля, что обусловлено наглядностью результатов и скоростью проведения работ. Несмотря на то что в настоящее время многие производители из разных стран изготавливают ультразвуковые томографы с фазированными решетками (“OmniScan” Канада, “Phasor XS” Германия, “Starmans” Чехия, “IntroVisor” Россия, “SIUI” и др.) существенным сдерживающим фактором их использования является стоимость самих приборов и, соответственно, стоимость оказания услуг неразрушающего контроля. Тем не менее, очевидно, за данными технологиями будущее.

Датчик на фазированных решетках представляет собой несколько пьезоэлектрических элементов, конструктивно объединенных в одном корпусе. Принцип работы фазированных решеток заключается в возбуждении всеми элементами ультразвуковых волн, которые за счет интерференции формируют ультразвуковой пучок. В режиме реального времени, используя электронное управление углом ввода ультразвукового пучка, можно формировать на экране дефектоскопа S-скан в виде двумерного изображения сечения. S-скан предоставляет наглядную информацию о координатах и размерах дефектов. Ультразвуковой пучок от фазированной решетки можно направить под различными углами и сфокусировать на любую глубину, что существенно повышает достоверность обнаружения различных дефектов. Более подробно о принципах работы ультразвуковых томографов на фазированных решетках написано в работах [1-3].

Нередко при проведении ультразвукового контроля ответственных объектов в рамках экспертизы промышленной безопасности приходится выполнять измерения на элементах конструкций, температура которых существенно отличается от нормальной +20°C. Например, температура паропровода первой категории с перегретым паром может достигать 580°C [4]. Как правило остывание такого объекта происходит несколько десятков часов. Долгое ожидание уменьшения температуры металла до нормальных условий нецелесообразно, а зачастую и невозможно, что вынуждает специалистов проводить контроль при повышенных температурах металла, достигающих +90°C. Возникает закономерный вопрос о достоверности таких измерений.

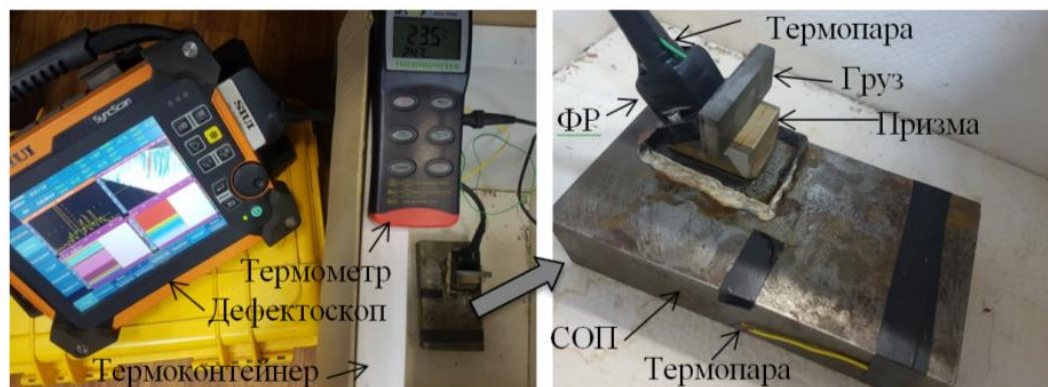
Большое число работ отечественных и зарубежных авторов посвящено усовершенствованию технологии ультразвукового контроля с использованием фазированной решетки, адаптации методик и датчиков к сложным объектам, разработке методов анализа и интерпретации сигналов от дефектов различного типа и созданию более совершенных приборов [5-11]. Исследования влияния температуры на результаты ультразвуковой томографии с использованием фазированной решетки ранее не публиковались.

Целью данной работы является исследование влияния температуры сварного соединения и датчика на фазированной решетке на результаты ультразвукового контроля, а именно на амплитуду сигнала и условные размеры дефекта.

**Методика.** В термоконтейнер помещался стандартный образец предприятия (СОП), имеющий по середине сварной шов. Образец представляет собой сварное стыковое соединение двух листов стали СтЗсп. Толщина листов составляла 40 мм. Разделка кромок и форма сварного шва – V образные. На глубине 26 мм от поверхности сварного соединения

вдоль оси сварного шва был изготовлен искусственный отражатель – просверлено отверстие диаметром 3мм.

Сканирование проводилось ультразвуковым томографом с датчиком на фазированной решетке SIUI SyncScan, рис. 1.



**Рис. 1.** Фотография экспериментальной установки.

На поверхность образца устанавливался датчик с фазированной матрицей и угловой призмой. Модель датчика 5.0L32-0.5-10. Характеристики: частота 5 МГц, количество элементов в фазированной матрице 32, ширина одного элемента 0.5 мм, активная апертура 16 мм, размеры датчика 28×31×33 мм. Использовалась призма 16N55S позволяющая вводить сигналы в диапазоне углов 30-70°. Габариты призмы 40×31×22,5 мм. Использовался режим секторное сканирование. Скорость ультразвуковой волны 3230 м/с.

СОП вместе с датчиком медленно нагревался от +22°C до +50°C. Контроль температуры проводился с помощью бесконтактного инфракрасного термометра Gm320 и двух термопар К-типа, подсоединенных к цифровому термометру AZ-8855. Одна термопара была помещена в отверстие СОПа для регистрации температуры в объеме материала, вторая термопара была установлена непосредственно на металлический корпус датчика с фазированной матрицей.

Для обеспечения непрерывного ввода ультразвука и плотного контакта призмы с поверхностью СОПа вокруг датчика на поверхности материала была организована ванночка с водой. Для обеспечения неизменной силы прижатия призмы к поверхности материала на призму был установлен груз.

На приборе регистрировались А, S, С, и D – сканы, рис. 2. Обработка данных проводилась в специализированной программе SupogUp. Для измерения амплитуды сигнала от дефекта на S-скане варьировался угол линии А-скана до достижения максимальной амплитуды отраженного сигнала. Регистрировался угол  $\alpha$  и амплитуда отраженного от дефекта сигнала. На S и D сканах измерялись размеры дефектов. Усиление в приборе было подобрано таким образом, чтобы при комнатной температуре +22°C по градиентному изображению дефекта границы перехода от красного к желтому соответствовали 3 мм.

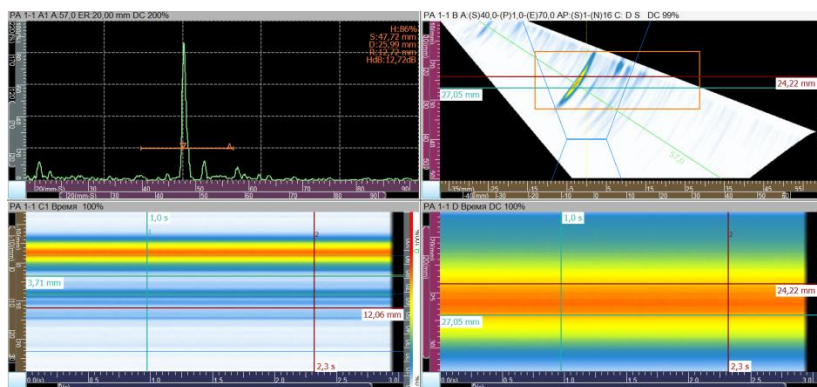


Рис. 2. Результаты контроля дефекта на SIUI SyncScan (слева направо: A, S сканы верхний ряд, C, D сканы нижний ряд).

**Результаты и обсуждение.** В результате экспериментальных исследований получили набор S-сканов, соответствующих акустическому образу искусственного цилиндрического отражателя диаметром 3 мм при разных температурах, рис. 3. Ожидалось, что с ростом температуры коэффициент электромеханической связи пьезокерамики уменьшится и амплитуда сигнала от дефекта станет меньше. Так происходит в классических дефектоскопах с обычными пьезоэлектрическими преобразователями. Как показали исследования с применением фазированной решетки, с ростом температуры амплитуда сигнала от дефекта *На* увеличивается, -рис. 3. При повышении температуры на 28°C условный размер дефекта *D* увеличивается на 80% с 2.8 до 5 мм. Расстояние до дефекта *L* с ростом температуры уменьшается незначительно на 3%, угол *A* увеличивается на 2°. Результаты измерений приведены в табл. 1.

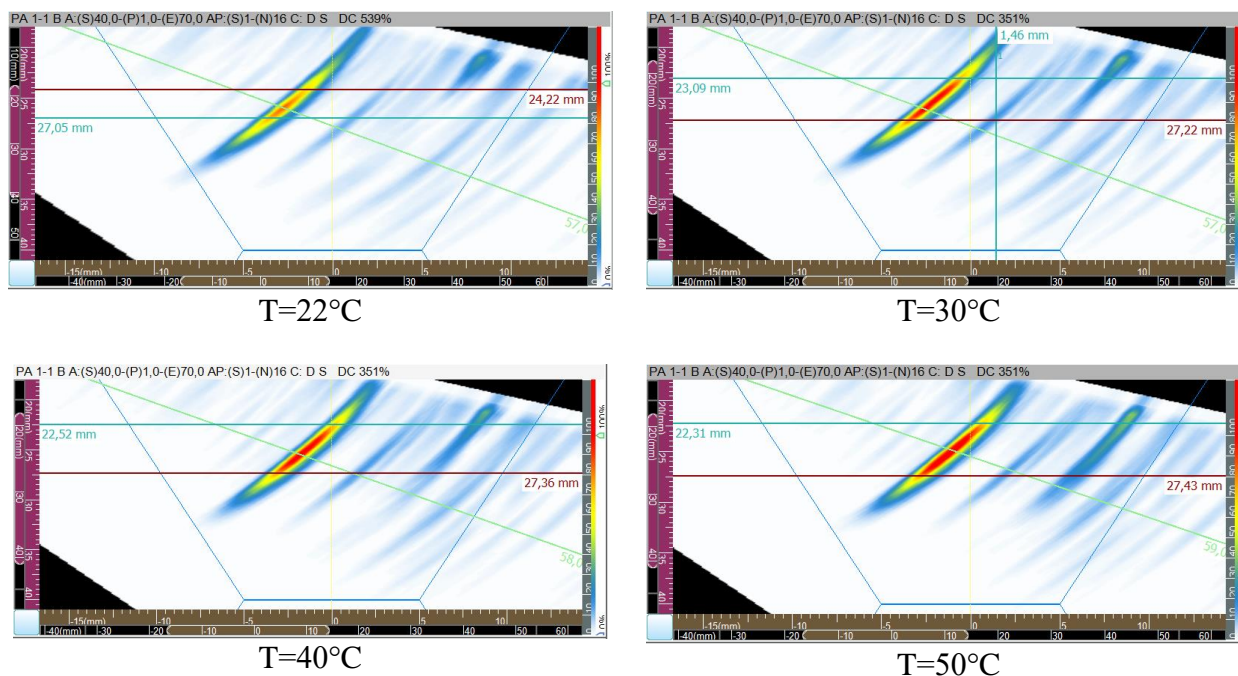


Рис. 3. Результаты сканирования с применением фазированной решетки при разных температурах (S-сканы).

Амплитуда сигнала от температуры меняется по линейному закону (рис. 3):

$$Ha = \alpha \cdot T + b, \quad (1)$$

где  $\alpha = 0,085 \text{ dB}/^\circ\text{C}$  или  $\alpha = 1 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ ;  $b = 11 \text{ dB}$  или  $b = 68 \text{ \%}$ .

Табл.1

Результаты ультразвуковой томографии.

$T, ^\circ\text{C}$	$Ha, \%$	$Ha, \text{dB}$	$D, \text{mm}$	$L, \text{mm}$	$A, ^\circ$
22	86	12.7	2.8	25.6	57
30	104	14.3	4.1	25.2	57
40	108	14.7	4.8	24.9	58
50	117	15.3	5.1	24.9	59

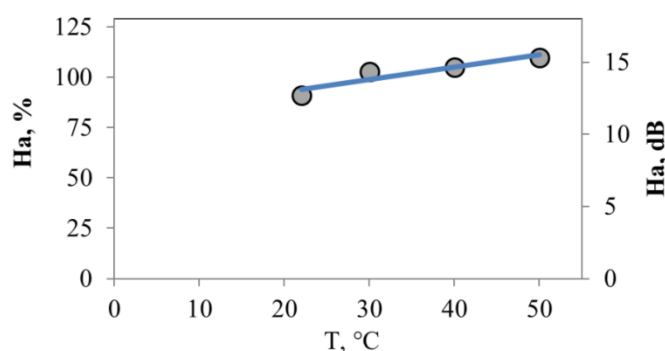


Рис. 3. Зависимость амплитуды сигнала от температуры.

Зависимость расстояния до дефекта  $L$  и его размер  $D$  хорошо описываются гиперболой, рис. 4:

$$L, D = \alpha_{L,D} / T + b_{L,D}, \quad (2)$$

где  $\alpha_L = 30 \text{ мм } ^\circ\text{C}$ ,  $b_L = 24 \text{ мм}$ ;  $\alpha_D = -91 \text{ мм } ^\circ\text{C}$ ,  $b_D = 7 \text{ мм}$ .

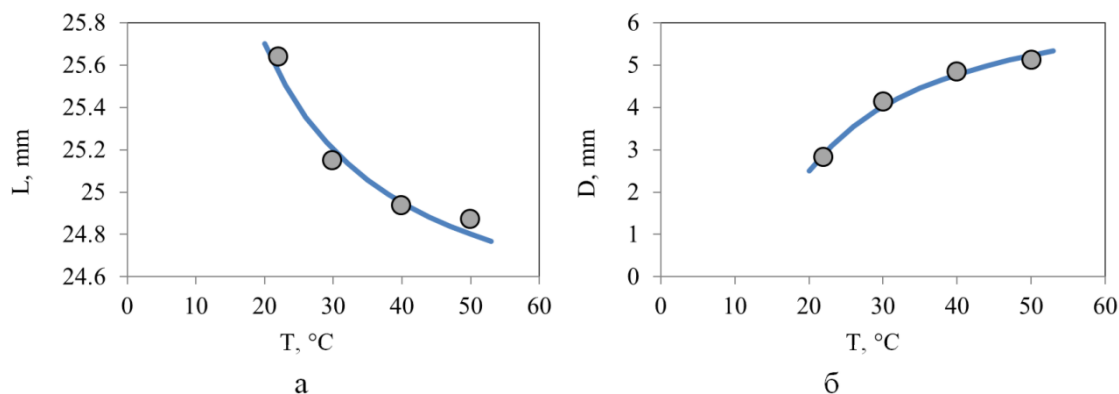


Рис. 4. Зависимость расстояния до дефекта (а) и размера дефекта (б) от температуры.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что игнорировать температуру объекта контроля и датчика нельзя. Ошибка в измерении размеров дефектов

существенна и может достигать 100%, что может привести к ошибочному толкованию результатов контроля и перебраковке. Один из вариантов решения данной проблемы – это предварительная калибровка датчика по СОП такой же температуры, что и объект контроля с подстройкой амплитуды сигнала. Такой вариант не всегда реализуем. Используя результаты данной работы можно скорректировать полученные данные ультразвуковой томографии и оценить реальные размеры дефектов в элементах конструкций.

**Выводы.** В результате проведенных исследований установлено, что при ультразвуковом контроле с применением фазированной решетки амплитуда сигнала от дефекта увеличивается с ростом температуры. Данный эффект является неожиданным, так как при контроле с помощью обычного пьезоэлектрического преобразователя наблюдается обратный эффект. Получено, что при увеличении температуры на 28°C амплитуда сигнала от отверстия диаметром три миллиметра увеличивается на 2.6 dB или 31%, измеряемый размер дефекта при этом возрастает до 5 мм. Расстояние до дефекта уменьшается не существенно. Полученные корреляционные связи амплитуды сигнала и измеряемого размера дефекта предлагается использовать для корректировки данных ультразвуковой томографии с учетом температуры.

### Список литературы

1. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Application: R/D Tech Guideline.
2. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications: Olympus NDT.
3. Данилов В.Н., Воронкова Л.В. Просто о преобразователях с фазированными решетками в ультразвуковом контроле. - М.: Изд. Дом «Спектр», 2019. - 136 с.
4. Калютник А. А. Трубопроводы теплоэнергетических установок. - СПб.: Изд. СПбГПУ, 2011. - 193 с.
5. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решетки//Дефектоскопия. - 2011. - № 1. - С. 21-38.
6. Данилов В. Н. О некоторых особенностях сигнала прямого линейного преобразователя с фазированной решеткой в режиме излучения//Дефектоскопия. - 2010. - № 10. - С. 59-74.
7. Бойчук А. С., Генералов А. С., Диков И. А. Создание акустического контакта между фазированной решеткой и выпуклой поверхностью объекта контроля при ультразвуковом контроле ПКМ //Авиационные материалы и технологии. - 2016. - № 4. - С. 68-73.
8. Ohara Y., Takahashi K., Ino Y., Yamanaka K., Tsuji T., Mihara T. High-selectivity imaging of closed cracks in a coarse-grained stainless steel by nonlinear ultrasonic phased array//NDT & E International. - 2017. - V. 91. - P. 139-147.
9. Cheng, J., Potter J. N., Croxford A. J., Drinkwater B. W. Monitoring fatigue crack growth using nonlinear ultrasonic phased array imaging//Smart Materials and Structures. - 2017. - V. 27. No. 5. - P. 055006.
10. Yuan C., Xie C., Li L., Zhang F., Gubanski S. M. Ultrasonic phased array detection of internal defects in composite insulators//IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 2016. February. - V. 23. - P. 525-531.
11. Holmes C., Drinkwater B. W., Wilcox P. D. Advanced post-processing for scanned ultrasonic arrays: Application to defect detection and classification in non-destructive evaluation //Ultrasonics. - 2008. - V. 48, №. 6. - P. 636-642.

*Дата поступления: 11 октября 2019 г.*