

УДК 621.385

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПРОДОЛЬНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В ИЗОТРОПНОМ ОДНОРОДНОМ СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ ПО ЭХОСИГНАЛАМ, ИЗМЕРЕННЫМ ДВУМЯ АНТЕННЫМИ РЕШЁТКАМИ

Е. Г. БАЗУЛИН, М. С. САДЫКОВ

ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

UDC 621.385

DETERMINATION OF LONGITUDINAL ULTRASOUND WAVE'S SPEED IN ISOTROPIC HOMOGENEOUS WELDED CONNECTION POINT USING ECHO SIGNALS MEASURED BY TWO ANTENNA GRIDS

E. G. BAZULIN, M. S. SADYKOV

Аннотация

Предложен метод определения скорости продольной ультразвуковой волны в однородном сварном соединении, основанный на сравнении измеренных и рассчитанных эхосигналов при использовании двух антенных решёток на призмах, работающих в режиме двойного сканирования. Перечислены основные параметры, влияющие на точность расчёта скорости волны в сварном соединении. Приведены результаты численных и модельных экспериментов по расчёту скорости волны в сварном соединении. С помощью разработанного алгоритма в модельном эксперименте удалось измерить скорость продольной волны с погрешностью менее 0,7 %.

Ключевые слова:

ультразвуковой контроль, определение скорости звука, антенная решетка, сварное соединение, целевая функция.

Abstract

We proposed a method for determining the longitudinal ultrasonic wave's speed in homogeneous welded connection point based on comparison of measured and calculated echo signals using two antenna grids on prisms, operating in dual-scanning mode. The main parameters affecting the accuracy of calculating the wave speed in welded connection point are listed. The results of numerical and model experiments for calculating the wave speed in a welded connection point are presented. Using proposed algorithm in a model experiment it was possible to measure the longitudinal wave's speed with error of less than 0,7 %.

Key words:

ultrasound control, sound speed calculation, antenna grid, welded connection, objective function.



Один из способов решения задачи ультразвуковой дефектометрии заключается в получении высококачественного изображения отражателей, по которому можно определить тип несплошности и её размеры. Информация о типе отражателя и его размерах позволит принять решение о степени опасности для работы оборудования. Для восстановления изображения применяют метод цифровой фокусировки антенной решеткой (ЦФА) [2], который позволяет учитывать такие эффекты, как многократное отражение от неровных границ объекта контроля (ОК), трансформация типа волны при преломлении и отражении ультразвукового пучка. Но для эффективного применения метода ЦФА необходимо знать такие свойства ОК, как его толщина и скорость продольной или поперечной волны. В общем случае для эффективного применения метода ЦФА нужно знать акустические свойства и геометрию сварного соединения ОК.

В статье [2] для безэталонного определения скорости звука и толщины ОК предложен метод, который заключается в сравнении эхосигналов, измеренных двумя антенными решётками (АР), с оценкой эхосигналов, расчёт которых проводится при заданных значениях скорости продольной или поперечной волны и толщины объекта контроля. Решением задачи являются значения скорости звука и толщины, которые обеспечивают минимальную разницу между рассчитанными и измеренными эхосигналами. Использование двух АР на призмах обусловлено тем, что сварное соединение реального ОК может иметь валик усиления, что не позволит провести измерения только одной АР.

В практике УЗК часто встречаются ОК со сварным соединением, акустические свойства которого отличаются от акустических свойств основного металла ОК. Примером служат трубопроводы с композитными сварными соединениями, ультразвуковой контроль которых часто проводится на продольных волнах. Упомянутый выше безэталонный подход к определению толщины и скорости звука можно использовать для определения скорости звука в сварном соединении с известной геометрией.

На первом этапе процедуры измерения скорости звука в сварном соединении происходит регистрация эхосигналов. На рис. 1 показана схема измерения эхосигналов неоднородного ОК толщиной h . Скорость продольной, поперечной волны и плотность в призме обозначим как $\{c_{w,l}, c_{w,s}, \rho_w\}$, угол наклона β , скорость звука и плотность основного металла ОК обозначим как $\{c_l, c_s, \rho\}$, а в сварном соединении как $\{c_{v,l}, c_{v,s}, \rho_v\}$. Первый пьезоэлемент АР с N-стороны излучает импульс, а все пьезоэлементы АР с Р-стороны регистрируют эхосигналы. После чего, излучает второй пьезоэлемент, а все пьезоэлементы АР с Р-стороны измеряют эхосигналы и т.д. Такой режим регистрации эхосигналов с применением АР называется двойным сканированием.

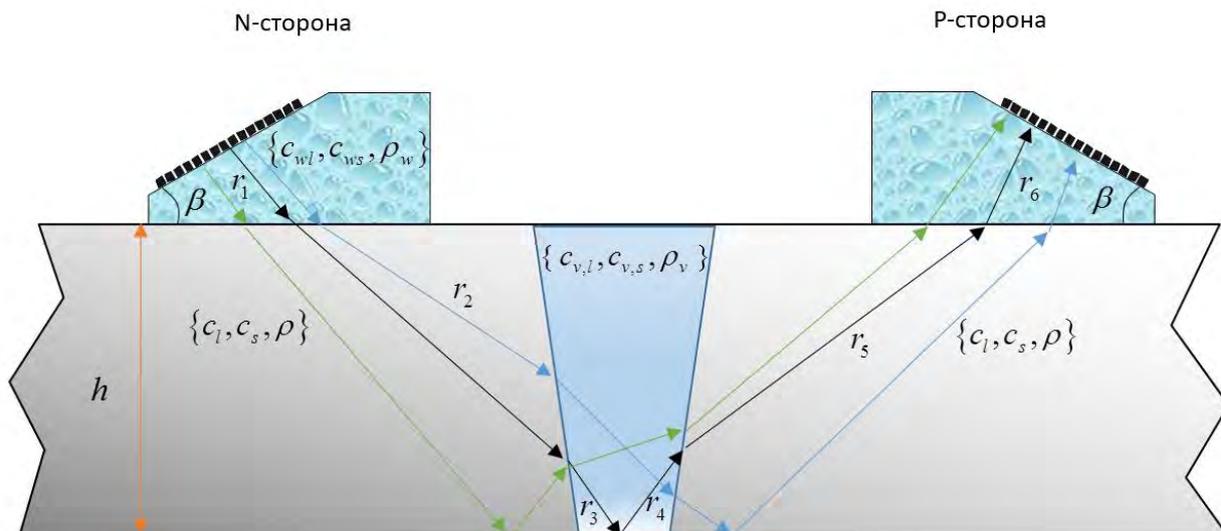


Рис. 1. Схематическое изображение системы измерений эхосигналов неоднородного ОК

На втором этапе проводится расчёт эхосигналов $\hat{p}^*(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; c_{v,l})$ при излучении из точки \mathbf{r}_t и приёме в точке \mathbf{r}_r , в котором скорость продольной волны $c_{v,l}$ учитывается как один из аргументов, для его сравнения с измеренными эхосигналами $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$. То значение скорости $c_{v,l}$, при котором отличие между измеренными и рассчитанными эхосигналами минимально, и будет являться решением задачи по определению скорости звука. Сильное влияние на эффективность метода оказывает вид целевой функции, по которой определяется степень близости $\hat{p}^*(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; c_{v,l})$ к $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$. В данной работе целевая функция имела вид величины обратной функции корреляции:

$$D_c(\nu) = \frac{1}{\left| \iint p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t) \hat{p}^*(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu) dt d\mathbf{r}_t d\mathbf{r}_r \right|}, \quad (2)$$

где значок * означает операцию комплексного сопряжения, а $\nu = c_{v,l}$. В свою очередь, на вид целевой функции влияют такие параметры, как форма излучающего сигнала, операторный шум, угловая апертура антенной решетки, частота дискретизации сигнала и количество акустических схем, используемых при оценке набора эхосигналов. Под акустической схемой понимается описание траектории (список отрезков $\{r\}$ и скоростей звука $\{c\}$ на каждом отрезке) распространения луча в ОК.

Расчёт эхосигналов можно выполнить в приближении геометрической акустики [3] по следующей формуле

$$\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu) = \sum_{\{as\}} A_{as}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r) s(t - t_{as}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r)),$$

$$\text{где } t_{as}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r) = \sum_{n=1}^{m+3} \frac{|\mathbf{r}_n|}{c_n}, A_{as}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r) = \frac{D_{wo} \left(\prod_{j=1}^{m+1} T_j \right) D_{ow}}{R(\{r\}, \{c\})}. \quad (3)$$

ν – список параметров, которые влияют на расчет оценки эхосигналов $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu)$; $s(t)$ – вид излученного сигнала; $\{as\}$ – список используемых при оценке акустических схем; T_j – коэффициент отражения от границ ОК; $R(\{r\}, \{c\})$ – функция расходимости лучей, определяющая амплитуду импульса; $t_{as}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r)$ – время пробега импульса по траектории $\{r\}$; D_{wo} , D_{ow} – коэффициенты прохождения из призмы в ОК, и обратно из ОК в призму.

Для определения траектории $\{r\}$, необходимой для расчета поля на приёмнике по формуле (3), использовался метод трассировки. Для более точного расчета скорости звука в сварном соединении, необходимо, кроме зеркально отражённых от дна ОК лучей, учитывать источники излучения волн, возникающие в точках касания дна границы сварного соединения. В данной работе оптимизация происходит по скорости продольной волны $\nu = \{c_{v,l}\}$, но можно проводить оптимизацию и по поперечной волне $\nu = \{c_{v,s}\}$ или, например, по их комбинации $\nu = \{c_{v,l}, c_{v,s}\}$.

При работе с неоднородным ОК или с ОК с неровными границами нужно принимать во внимание эффект многолучевого распространения звука, который учитывается в формуле (2). На рис. 1 схематически показаны три возможных варианта распространения луча в ОК.

Для тестирования разработанного алгоритма использовались эхосигналы, рассчитанные в программе моделирования результатов ультразвукового контроля CIVIA [4]. Расчётная модель представляла собой стальной параллелепипед толщиной 45 мм со сварным соединением, акустические свойства которого совпадают с акустическими свойствами алюминия (рис. 2).

Параметры модели были следующие: скорость продольной волны вне сварного соединения (справа и слева от сварного соединения) – 5,9 мм/мкс, скорость продольной волны в сварном соединении – 6,35 мм/мкс, расстояние между передними гранями призм – 70 мм. AP состоит из 32 элементов размерами 0,75 мм с зазором 0,25 мм; материал призмы оргстекло (скорость продольной и поперечной волн 2,68 и 1,32 мм/мкс, плотность 1,18 г/см³).

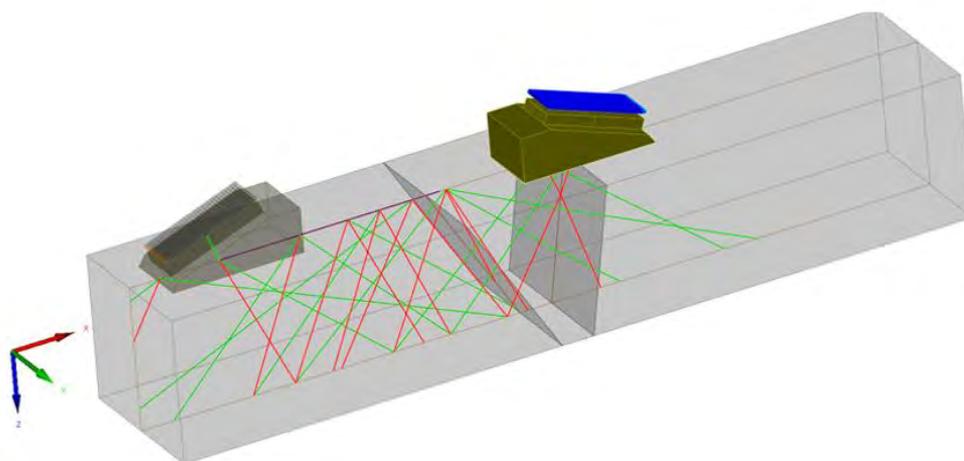


Рис. 2. Расчётная модель в программе CIVIA

На рис. 3 показаны эхосигналы, рассчитанные в программе CIVIA и по формуле (3) для двух комбинаций излучающего и принимающего элемента АР. Фазы эхосигналов совпадают с точностью менее одной десятой периода, а амплитуда с точностью менее 0,1 дБ. Следует отметить, что расчёт по формуле (3) не учитывает такого эффекта, как изменение формы эхосигнала $s(t)$, при смещении от центральной оси призмы.

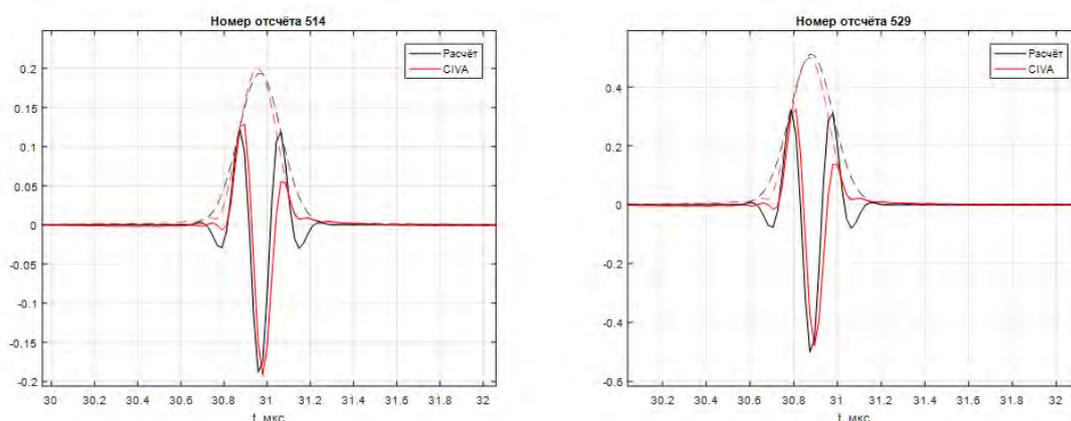


Рис. 3. Эхосигналы, рассчитанные программой CIVIA (линии красного цвета) и по формуле (3) (линии чёрного цвета)

Так как целевая функция имеет локальные минимумы, а из-за эффектов дискретизации возникает цифровой шум, то задача поиска минимума целевой функции решалась для множества исходных точек. Из полученного набора решений выбирались, отстоящие от минимального значения целевой функции менее чем на один процент, и выбранные значения скоростей усреднялись. Относительная погрешность проведённого таким образом расчёта равна 0,08 %, что позволяет сделать вывод об отсутствии в программе, реализующей данный метод, принципиальных ошибок.

Для проведения модельных экспериментов был изготовлен стенд, состоящий из двух стальных частей, имитирующих основной металл ОК, и

сменных частей, имитирующих сварное соединение с акустическими свойствами дюралюминия, аустенитной стали и латуни (рис. 4). Для всех сменных частей были проведены эксперименты по определению скорости продольной волны в сварном соединении.



Рис. 4. Измерение эхосигналов для латунного имитатора сварного соединения

В табл. 1 приведены значения скорости продольной волны в имитаторе сварного соединения, рассчитанные по предложенному алгоритму и измеренные ультразвуковым толщиномером с точностью $\pm 0,5\%$. Достигнутая погрешность измерений оказалась менее $0,7\%$.

Табл. 1. Расчет погрешности работы предложенного алгоритма

Имитатор сварного соединения	Скорость волны, измеренная толщиномером, мм/мкс	Скорость волны, рассчитанная по алгоритму, мм/мкс	Относительная погрешность расчёта, %
Алюминий	$6,38 \pm 0,032$	6,36	-0,32
Аустенитная сталь	$5,70 \pm 0,029$	5,66	-0,63
Латунь	$4,20 \pm 0,021$	4,22	0,48

На результат работы алгоритма определения скорости звука влияют такие параметры эксперимента, как толщина ОК, скорость звука основного металла, расстояние между призмами, расположение излучающей решетки относительно сварного соединения, геометрия сварного соединения. Эти параметры на практике могут оказаться известными с недостаточной точностью, что приведёт к ошибкам определения скорости продольной волны.

Подводя итоги, можно сказать, что предложенный алгоритм определения скорости продольной волны в сварном соединении ОК показал свою работоспособность в численных и модельных экспериментах. Погрешность измерения скорости звука в модельном эксперименте менее

0,7 %. В список параметров ν , по которым происходит поиск минимума целевой функции (2), могут быть включены дополнительные параметры, например, скорость поперечных волн, толщина объекта контроля, расстояние между призмами и пр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов / В. А. Воронков [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2011. – № 1 (51) – С. 64–70.

2. **Базулин, Е. Г.** Измерение скорости звука и толщины в плоскопараллельных объектах контроля с использованием двух антенных решёток / Е. Г. Базулин, Г. М. Исмаилов // Дефектоскопия. – 2013. – № 8. – С. 20–34.

3. **Кравцев, Ю. А.** Геометрическая оптика неоднородных сред / Ю. А. Кравцев, Ю. И. Орлов. – М. : Наука, 1980. – 304 с.

4. Официальный сайт фирмы EXTENDE. URL: <http://www.extende.com/> (дата обращения: 30.05.17)

E-mail: bazulin@echoplus.ru
magomedrasul.sadykov@yandex.ru