

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

© 2018 г. Е.Г. Базулин^{1, 2, *}, М.С. Садыков³

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»
123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино»

²Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова
119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 4

³Московский энергетический институт (Национальный исследовательский университет) 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14

*E-mail: bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 11.09.2017

Предложен метод определения скорости продольной ультразвуковой волны в однородном сварном соединении, основанный на сравнении измеренных и рассчитанных эхосигналов, отраженных от дна объекта контроля, при использовании двух антенных решеток на призмах, работающих в режиме двойного сканирования. Проанализировано влияние на точность расчета скорости волны в сварном соединении ошибки задания параметров: расстояния между антенными решетками, толщины объекта контроля и прочих. Приведены результаты численных и модельных экспериментов по расчету скорости волны в сварном соединении. С помощью разработанного метода в модельном эксперименте удалось измерить скорость продольной волны в модели сварного соединения с погрешностью менее 0,7 %. Предложенный метод может быть использован для нахождения начального приближения в нелинейной обратной задаче томографической диагностики сварных соединений в волновом приближении.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, режим двойного сканирования, антенная решетка, сварное соединение, цифровая фокусировка антенной решеткой, целевая функция.

ВВЕДЕНИЕ

В ультразвуковом неразрушающем контроле (УЗК) для оценки степени надежности промышленных объектов требуется получить высококачественное изображение отражателей, по которым можно определить тип и размеры несплошностей. Эта информация позволит принять решение о степени их опасности для работы оборудования. Чтобы получить высококачественное изображение используют метод цифровой фокусировки антенной решетки (ЦФА) [1], который позволяет учитывать такие эффекты, как многократное отражение от неровных границ объекта контроля (ОК), трансформацию типа волны при преломлении и отражении ультразвукового пучка.

Для эффективного применения метода ЦФА необходимо знать акустические свойства и толщину ОК, в частном случае — геометрию и акустические свойства сварного соединения. На рис. 1 продемонстрированы два случая восстановления изображения дна ОК со сварным соединением по

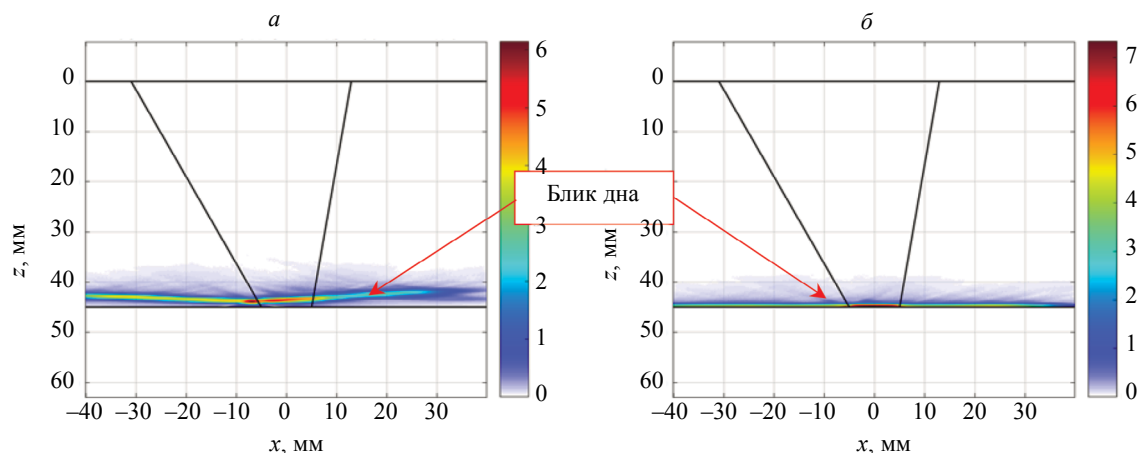


Рис.1. Пример восстановления изображения дна ОК со сварным соединением.

эхосигналам, рассчитанном в численном эксперименте (см. раздел 4). Основным металлом ОК является сталь, а акустические свойства сварного соединения соответствуют акустическим свойствам дюралюминия. Если восстанавливать изображение дна ОК в предположении, что объект контроля однородный и изотропный и его акустические свойства совпадают с акустическими свойствами стали, то блик дна не совпадает с его реальным положением (см. рис. 1а) — отличие может составлять 3 мм. Если при восстановлении изображения учитывать разные акустические свойства сварного соединения и основного металла, то блик дна ОК совпадает с его реальным положением (см. рис. 1б). Полученные результаты показывают, что для восстановления высококачественного изображения отражателей необходимо знать и учитывать акустические свойства сварного соединения (в рассмотренном случае — скорость продольной волны в сварном соединении).

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

В практике УЗК часто встречаются объекты контроля со сварным соединением, акустические свойства которого отличаются от акустических свойств ОК. Примером служат трубопроводы с композитными сварными соединениями, их ультразвуковой контроль часто проводится на продольных волнах. Безэталонный подход, упомянутый выше, можно применить для определения скорости звука в сварном соединении с известной геометрией ОК и скорости ультразвуковой волны в нем. Отметим статью [3], в которой для выявления океанических неоднородностей как рефракционного, так и кинетического типов, предложено использовать неортогональный и избыточный базис с элементами в виде множества пересекающихся полос.

В настоящей статье предлагается метод обработки эхосигналов при УЗК сварных соединений, позволяющий в рамках лучевой модели восстановить скоростной разрез, то есть значения скорости продольной волны вдоль луча. Эффективность предложенного метода объясняется простотой геометрии сварного соединения, небольшим числом неизвестных параметров конечно-параметрической модели исследуемого объекта, что приводит к относительно небольшим объемам вычислений. Восстановленный скоростной разрез может быть использован в дальнейшем в качестве начального приближения в нелинейной томографической обратной задаче диагностики сварного соединения с использованием более точного волнового приближения [4—6].

1. ПРИНЦИП ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНЫ В СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ

Антенные решетки, как показано на рис. 2, установлены на призмы. Скорости продольной, поперечной волн и плотность в призмах обозначены как $\{c_{w,l}, c_{w,s}, \rho_w\}$, скорость звука и плотность основного металла — $\{c_p, c_s, \rho\}$, а параметры сварного соединения — $\{c_{v,l}, c_{v,s}, \rho_v\}$. Элемент излучающей решетки характеризуется вектором \mathbf{r}_p , а приемной — \mathbf{r}_r . Расстояние между передними гранями призм будем называть «базой». Эхосигналы $p(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_r, t)$, измеренные в режиме двойного сканирования с помощью двух антенных решеток, сравниваются с эхосигналами $\hat{p}(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_r, t; v)$, расчет которых был получен при вариации скорости продольной волны в сварном соединении ОК $v = \{c_{v,l}\}$. Решением данного метода является то значение v , при котором достигается наименьшее отличие между $p(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_r, t)$ и $\hat{p}(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_r, t; v)$, то есть задача сводится к поиску минимума целевой функции $D(v)$, характеризующей степень близости измеренных и рассчитанных эхосигналов

$$\hat{v} = \arg \min_{v=(c_{v,l})} D(p(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_r, t), \hat{p}(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_r, t; v)). \quad (1)$$

В настоящей работе для поиска минимума выражения (1) использовали симплексный метод Нелдера — Мида [7] нулевого порядка.

Лучи от элемента антенной решетки с N-стороны до элемента антенной решетки с P-стороны могут распространяться по разным траекториям. Так, на рис. 2 линиями красного цвета схематически показаны три возможных пути распространения импульса. Для их обозначения введем понятие акустической схемы $\{as\}$ — описание траектории распространения импульса с учетом отражения его от границ объекта контроля и с учетом трансформации типа волны. Для описания

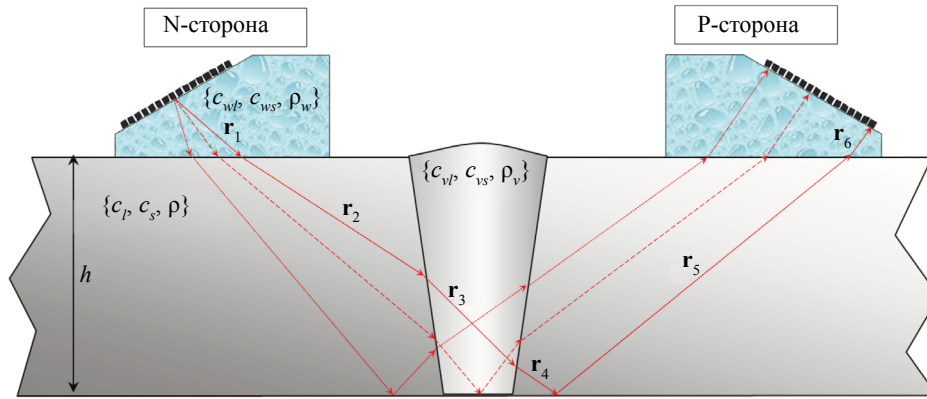


Рис. 2. Схема проведения измерений двумя антенными решетками, установленными на призмы.

акустических схем используем следующие обозначения: **rs** — отражение от поверхности; **rb** — отражение от дна; **d** — отражение от дефекта. Типы волн после события обозначим: **L** — продольная; **T** — поперечная; **R** — рэлеевская. Последовательная запись типов волн и событий будет определять акустическую схему. Такой способ обозначения акустических схем используется в программе CIV4 [8], предназначенной для моделирования результатов неразрушающего контроля, в частности, ультразвукового. Например, запись **TdL** обозначает обычный прямой луч на поперечной волне при излучении с приемом на прямом луче, но уже продольной волны. Схемы **LrbLdTrsTrbT** и **LrsTdTrbT** описывают ситуации, когда при излучении анализируются лучи, однократно отраженные на продольной волне, а при приеме — двукратно отраженные на поперечной волне, и когда при излучении вдоль поверхности распространяется головная волна, которая порождает боковую волну, а при приеме рассматривается только отраженная от дна поперечная волна соответственно. Траекторию распространения импульсов можно описать в виде последовательности векторов $\{\mathbf{r}\} = \{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_{m+1}\}$, где m — число отражений от границ ОК и пересечения границ сварного соединения. На рис. 2 показаны три возможных пути распространения импульса при $m = 5$. Для определения скорости распространения звука вдоль траектории используется список — $\{c\} = \{c_1, c_2, \dots, c_{m+1}\}$, в котором первым указывается скорость звука в призме излучающей антенной решетки, последним — принимающей антенной решеткой.

Вид эхосигналов, излученных элементом антенной решетки с Р-стороны в точке \mathbf{r}_p и принятых элементом антенной решетки N-стороны в точке \mathbf{r}_r можно оценить по формуле геометрической акустики

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

$$t_{as}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r) = \sum_{n=1}^{m+3} \frac{|\mathbf{r}_n|}{c_n}, \quad A_{as}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r) = \frac{D_{wo} \left(\prod_{j=1}^{m+1} T_j \right) D_{ow}}{R(\{\mathbf{r}\}, \{c\})}, \tag{2}$$

где 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, или коэффициент преломления, или отражения на внутренней границе ОК; $R(\{\mathbf{r}\}, \{c\})$ — функция расходимости лучей, описывающая кривизну волнового фронта и определяющая амплитуду импульса; $t_{as}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r)$ — время пробега импульса по траектории $\{\mathbf{r}\}$; D_{wo}, D_{ow} — коэффициенты прохождения из призмы в ОК и обратно из ОК в призму. Формулы для расчета коэффициентов отражения и преломления на плоской границе однородных изотропных сред приведены, например, в монографиях [9, 10].

Для определения траекторий $\{\mathbf{r}\}$, необходимых для расчета эхосигналов по формуле (2), можно воспользоваться принципом Ферма [11] или методом трассировки в приближении геометрической акустики [12]. Принцип Ферма позволяет учитывать многократное отражение от неровных границ ОК с учетом трансформации типов волн. Но при возникновении нескольких лучей между точками излучения и приема расчет траекторий с применением принципа Ферма может существенно усложниться.

На рис. 2 показана ситуация, когда импульс распространяется от элемента излучающей антенной решетки до элементов приемной решетки по трем путям. Возможна ситуация, когда число переменных минимизируемой функции может измениться в процессе расчета. Поэтому для расчета лучевых траекторий был использован метод трассировки, который позволяет рассчитать задержки и амплитуды эхосигналов для разных акустических схем в ОК, состоящего из нескольких областей с различными акустическими свойствами.

1.1. Аппроксимация времен задержек

Для расчета поля в точке \mathbf{r}_t задается направление луча, как описано в [13], затем определяется точка пересечения луча границы между двумя средами и находится новое направление луча с использованием закона Снеллиуса. Эта процедура выполняется по достижению заданного количества m касаний внешних и внутренних границ ОК или до заданного момента времени t_{end} . Отметим, что для нужд сейсмоакустики разработана теория построения лучевых трубок в неоднородных анизотропных средах [14, 15].

Для заданных моментов времени t_0 на луче номер n рассчитываются координаты опорных точек $(x_n(t_0), z_n(t_0))$. На рис. 3 кругами красного цвета схематически показаны опорные точки $(x_n(t_0), z_n(t_0))$ четырех лучей для двух моментов времени: t_0 и $t_0 + \Delta t$. Красной штриховой линией схематически изображены волновые фронты для моментов времени t_0 и $t_0 + \Delta t$. Так как координаты опорных точек $(x_n(t_0), z_n(t_0))$, как правило, не совпадают с координатами элементов приемной антенной решетки (x_r, z_r) , то для определения времен задержек t_r в точках (x_r, z_r) (одна из них показана кругом зеленого цвета) необходимо использовать процедуру аппроксимации. В данной работе использовали полиномиальную аппроксимацию, когда коэффициенты полинома определяются методом наименьших квадратов на множестве опорных точек $(x_n(t_0), z_n(t_0))$.

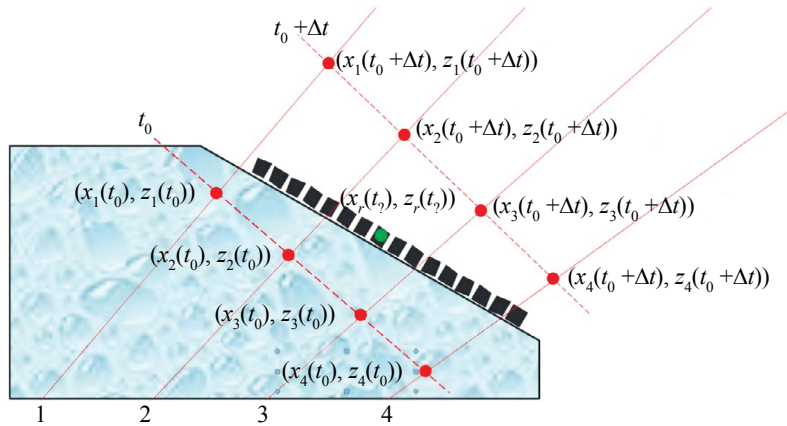


Рис. 3. Аппроксимации времен задержек с набора опорных точек $(x_n(t_0), z_n(t_0))$ и $(x_n(t_0 + \Delta t), z_n(t_0 + \Delta t))$ на точку приема (x_r, z_r) .

Важную роль при аппроксимации играет правильно подобранный порядок полинома. Так как между излучающей и приемной антенными решетками расстояние больше, чем пространственные апертуры решеток, то зависимость задержек от расстояния будет близка к квадратичной. Поэтому логично предположить, что порядок полинома аппроксимации, равный двум, даст минимальную ошибку аппроксимации. Проведенные расчеты подтвердили это предположение — погрешность аппроксимации будет возрастать, если порядок аппроксимирующего полинома будет больше, чем порядок аппроксимируемой функции.

1.2. Выбор вида целевой функции

Сильное влияние на эффективность метода оказывает вид целевой функции, по которой определяется степень близости измеренных $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$ и рассчитанных эхосигналов $\hat{p}^*(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu)$. Для оценки близости двух функций можно использовать целевую функцию $D_m(\nu; a, a_\epsilon)$ следующего вида:

$$D_m(\hat{\nu}; a, a_\epsilon) = a \cdot \|\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu) - p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)\| + a_\epsilon \cdot \|\mathfrak{E}(\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu)) - \mathfrak{E}(p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t))\|, \quad (3)$$

где \mathcal{E} — оператор расчета огибающей сигнала, $\| \cdot \|$ — евклидова норма вектора. Первый член целевой функции имеет вес a и определяет разницу между радиосигналами, а второй — вес $a_{\mathcal{E}}$ и описывает разницу между огибающими радиосигналов.

В качестве целевой функции $D_c(v)$ можно использовать обратную функцию корреляции

$$D_c(v) = \frac{1}{\left| \iint p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t) \hat{p}^*(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; v) dt d\mathbf{r}_t d\mathbf{r}_r \right|}, \quad (4)$$

где значок $*$ означает операцию комплексного сопряжения, а $v = \{c_{v,l}\}$. На вид целевой функции влияют такие параметры, как форма излучающего сигнала $s(t)$, операторный шум, то есть точность модели, используемой для расчета эхосигналов, угловая апертура антенной решетки, частота дискретизации сигнала и количество акустических схем, используемых при оценке эхосигналов.

Для выбора вида целевой функции, описываемой формулой (3) или (4), была проведена оценка следующим образом. В качестве $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$ и $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; v)$ рассматривалась гауссоподобная функция $s(t)$ с несущей частотой, равной 5 МГц, и длиной в два периода. На рис. 4а показан вид функции $D_m(v; a, a_{\mathcal{E}})$ при ($a = 1, a_{\mathcal{E}} = 0$), то есть при использовании радиосигнала. Видно, что целевая функция имеет глобальный минимум с крутыми стенками, но наличие нескольких минимумов затрудняет ее применение на практике. Рис. 4б отражает вид функции $D_m(v; a, a_{\mathcal{E}})$ при ($a = 0, a_{\mathcal{E}} = 1$), то есть когда используется только огибающая сигнала $s(t)$. В этом случае целевая функция имеет один минимум, но ее крутизна меньше, чем на рис. 4а. Вид функции $D_m(v; a, a_{\mathcal{E}})$ при ($a = 0,25; a_{\mathcal{E}} = 1$) показан на рис. 4в. Она имеет один минимум с крутизной, средней между функциями, приведенными на рис. 4а, б. Рис. 4г отражает вид функции $D_c(v)$. Она имеет один минимум, но ее крутизна при подходе к точке минимума не высокая, что при наличии шума

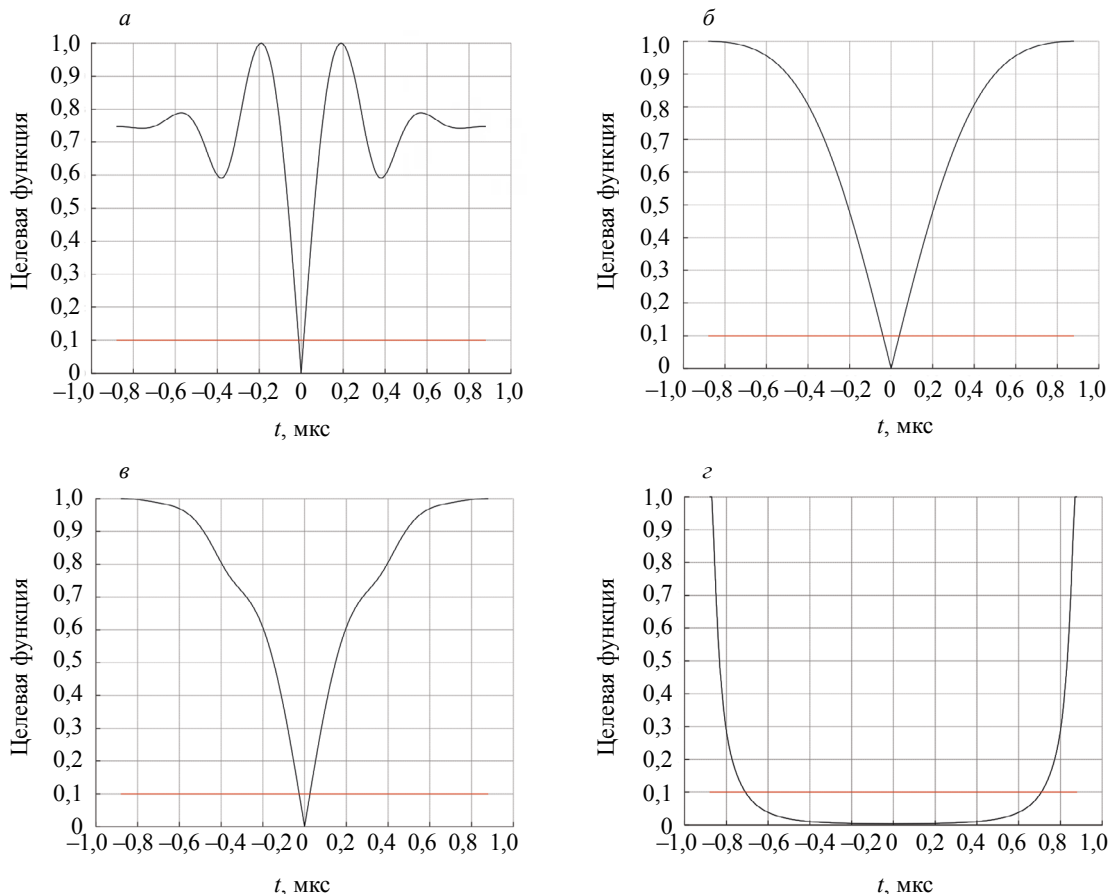


Рис. 4. Оценка вида целевых функций $D_c(v)$ и $D_m(v; a, a_{\mathcal{E}})$.

может привести к неэффективному решению (1). Поэтому в статье использовали целевую функцию $D_m(v; a, a_e)$ при ($a = 0,25$; $a_e = 1$). Минимум целевой функции D_c не равен нулю, как может показаться, глядя на рис. 4г. Отметим, что вид целевой функции для эхосигналов нескольких выстрелов по многим акустическим схемам, может существенно измениться и, возможно, предпочтительнее будет использовать функцию $D_c(v)$.

Понятно, что точность расчета скорости продольной волны в сварном соединении ОК зависит от точности расчета оценки эхосигналов — чем точнее удастся рассчитать эхосигналы $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; v)$, тем круче стенки у целевой функции и тем точнее находится максимум целевой функции. Поэтому в дальнейшем целесообразно при расчете эхосигналов использовать приближение Кирхгофа, учитывающее вторичные источники излучения ультразвуковых волн в точках, которые возникают там, где граница сварного соединения касается дна.

Как упоминалось выше, для поиска глобального минимума (при наличии локальных минимумов) в условиях зашумленных измеренных эхосигналов задача решается для множества исходных точек $\{v_0\}$. Из всех полученных решений $\{\hat{v}_0\}$ происходит их отбор по критерию наименьшего значения целевой функции и (после их усреднения) определяется скорость продольной ультразвуковой волны в сварном соединении $\hat{c}_{v,l} = \langle \{\hat{v}_0\} \rangle$.

2. ПАРАМЕТРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНЫ В СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ

Обработка эхосигналов, измеренных даже в модельных экспериментах, показывает, что неточно заданные параметры ОК и измерительной системы, приводят к ошибкам определения скорости продольной волны по формуле (1). Поэтому очень важно оценить влияние ошибки расчета эхосигналов, прошедших через сварное соединение, при неправильно заданных параметрах ОК и измерительной системы. На рис. 5 показано дерево основных геометрических и акустических параметров, влияющих на расчет скорости продольной волны в сварном соединении.

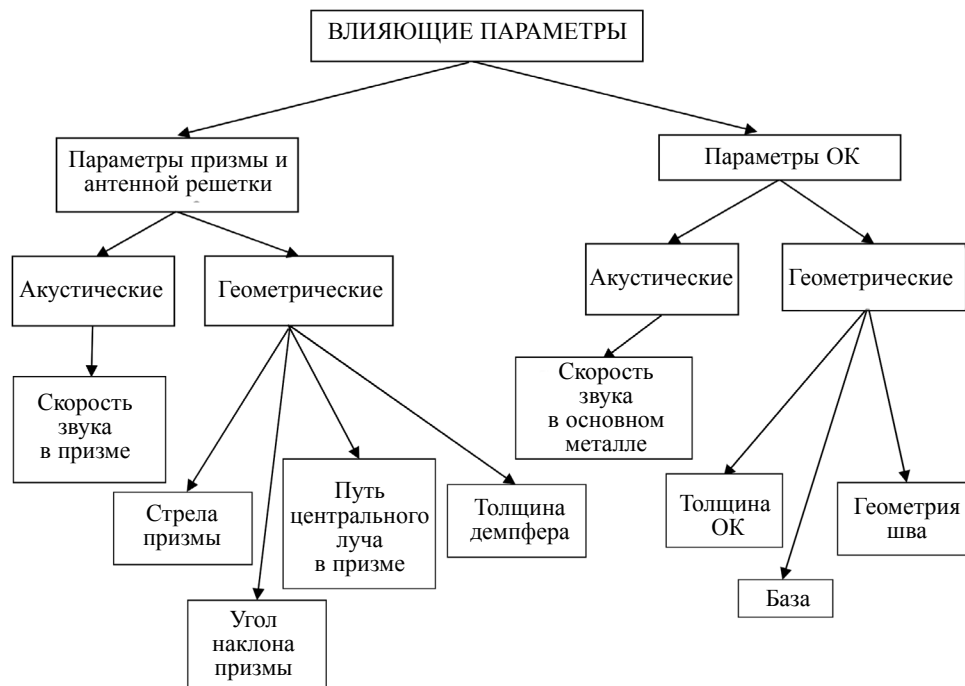


Рис. 5. Параметры, влияющие на погрешность расчета скорости продольной волны.

Для устранения влияния параметров призмы и антенной решетки в [16] была предложена процедура калибровки. Ее применение позволяет практически полностью исключить неточности задания параметров антенных решеток и призм. Для оценки влияния ошибок задания параметров

ОК на расчет скорости продольной ультразвуковой волны в сварном соединении были сделаны следующие допущения:

1. Сварное соединение имеет вид прямоугольника, шириной b_v .
2. Излучающий и приемный элементы расположены на поверхности ОК.
3. Скорости продольных волн в шве $c_{v,l}$ и в основном металле c_l отличаются друг от друга мало ($\delta c = c_{v,l} - c_l \ll c_l$), что позволяет не учитывать изменение траектории распространения волны в шве [9].

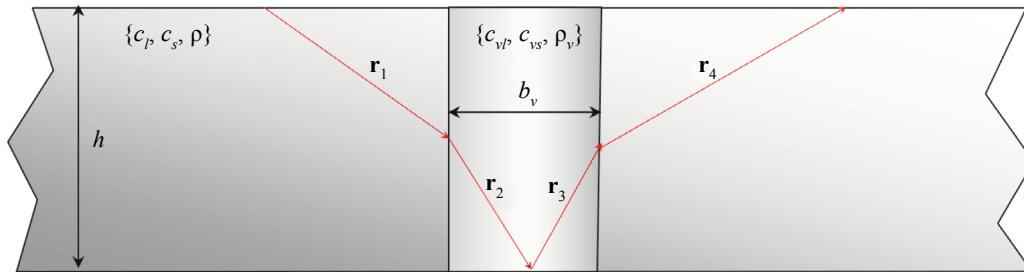


Рис. 6. Схематическое изображение расчетной модели.

На рис. 6 приведено схематическое изображение расчетной модели. Время пробега импульса по траектории $\{r\}$ можно рассчитать по формуле

$$t = \frac{s_o}{c_l} + \frac{s_v}{c_{v,l}}, \tag{5}$$

где $s_o = |\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_4|$ — путь пробега импульса вне сварного соединения, $s_v = |\mathbf{r}_2 + \mathbf{r}_3|$ — путь пробега импульса в сварном соединении. Если записать $c_{v,l}$ в виде

$$c_{v,l} = c_l + \delta c, \tag{6}$$

то формулу (5) можно представить в виде

$$t = \frac{s_o}{c_l} + \frac{s_v}{c_l + \delta c}. \tag{7}$$

Предполагая, что время прохождения луча по трассе при наличии ошибок задания параметров ОК будет равно времени прохождения при нулевых погрешностях (идеальный случай), погрешность расчета скорости звука в сварном соединении можно получить по формуле

$$\delta c = -c_l \frac{t \cdot c_l - s_o - s_v}{t \cdot c_l - s_o}. \tag{8}$$

На рис. 7 показаны графики погрешности определения скорости продольной волны в зависимости от погрешностей задания базы и толщины ОК. Линиями синего цвета показаны погрешности, рассчитанные по формуле (8), красного цвета — решения, полученные по формуле (1), когда расчет эхосигналов, согласно (2), проводился при значениях влияющих параметров, заданных с ошибкой. При абсолютной ошибке задания толщины ОК, равной 0,5 мм, и базы, равной 1 мм, относительная погрешность расчета скорости продольной волны достигает 2—3 %, что не позволит получить оценку скорости с точностью 0,5 %. Довольно заметная разница между двумя графиками (см. рис. 7) объясняется упрощениями расчетной схемы по формуле (8).

На рис. 8 показаны графики погрешности определения скорости продольной волны в зависимости от точности задания скорости волны c_l в основном металле ОК, а также координат

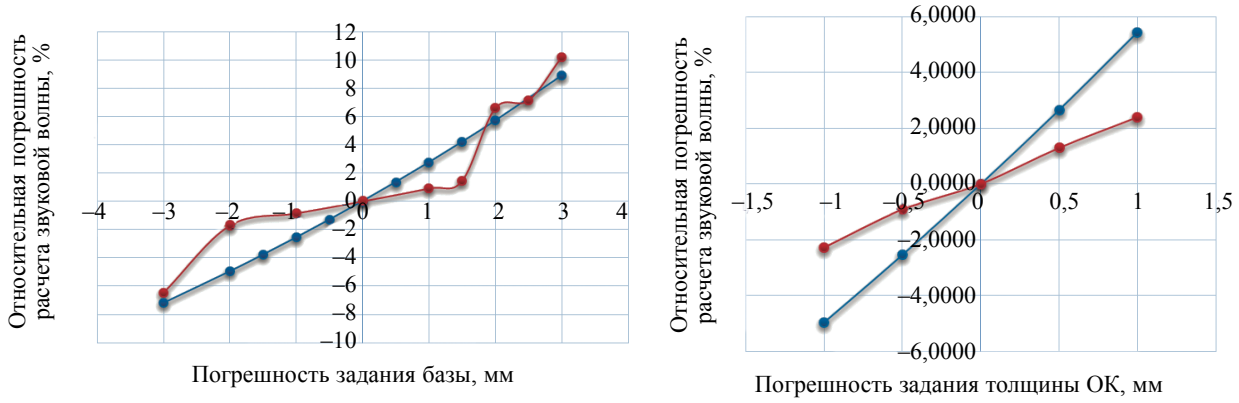


Рис. 7. Влияние погрешности задания базы и толщины ОК на точность расчета скорости продольной ультразвуковой волны в сварном соединении: — расчет по формуле (8); — расчет по формуле (1).

антенной решетки относительно сварного соединения и геометрии сварного соединения b_v . Видно, что ошибки задания упомянутых параметров не критично влияют на точность определения скорости продольной волны.

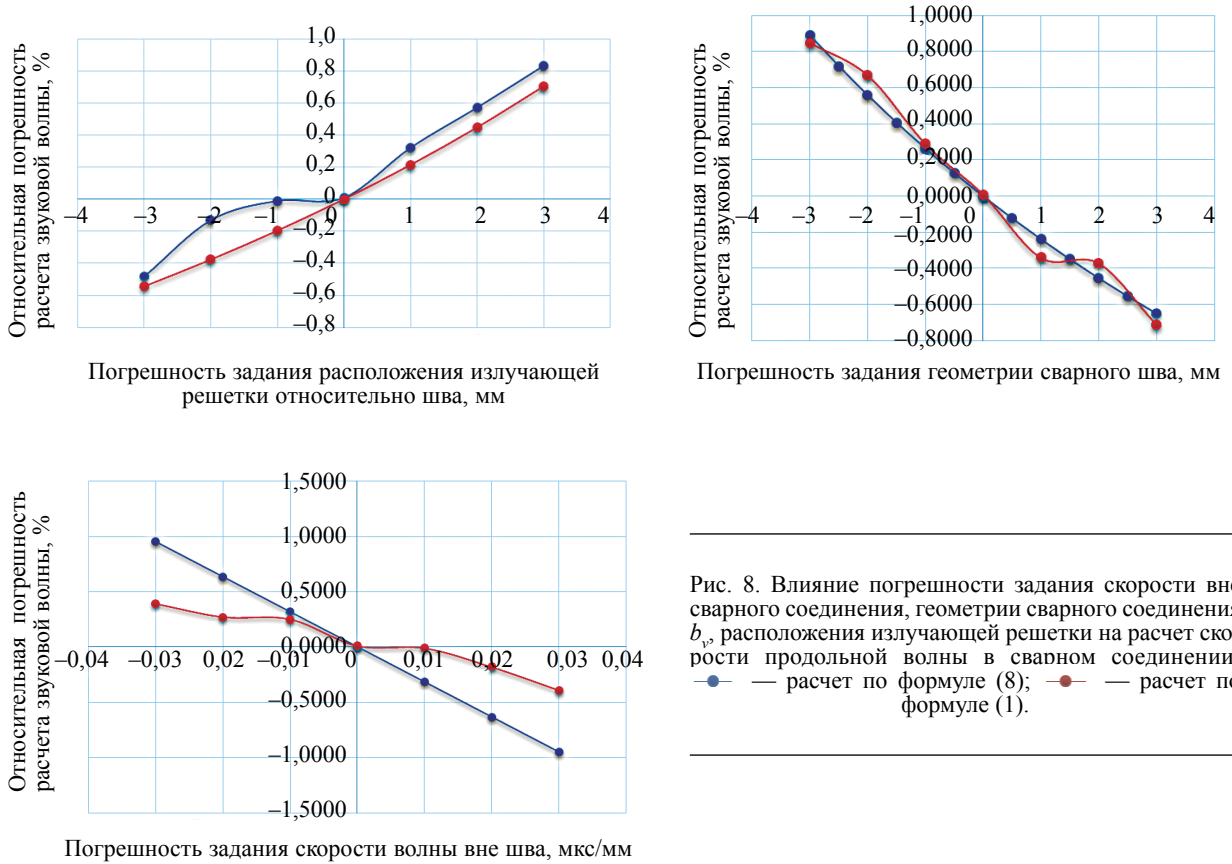


Рис. 8. Влияние погрешности задания скорости вне сварного соединения, геометрии сварного соединения b_v , расположения излучающей решетки на расчет скорости продольной волны в сварном соединении: — расчет по формуле (8); — расчет по формуле (1).

Таким образом, показано, что ошибки задания толщины ОК порядка 0,5 мм и базы порядка 1 мм, снижают точность расчета скорости продольной волны на недопустимо большую величину в 2—3 %. Если включить толщину ОК и базу в список v , как еще два дополнительных параметра, по которым производится оптимизация, то это должно привести к повышению точности определения скорости продольной волны по экспериментальным эхосигналам. Однако увеличение числа параметров приведет к увеличению времени поиска решения (1).

3. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для тестирования предлагаемого алгоритма проведены численные эксперименты. В программе CIVА создана модель со сварным соединением, свойства которого соответствуют акустическим свойствам дюралюминия ($c_{v,l} = 6,35$ мм/мкс). Пример восстановления изображения дна модели показан на рис. 1. Полученные эхосигналы считывались и сравнивались с эхосигналами, рассчитанными по формуле (2). На рис. 9 приведены эхосигналы, рассчитанные в программе CIVА (графики красного цвета) и по формуле (2) (графики черного цвета) для двух эхосигналов шестнадцатого выстрела. Погрешность расчета амплитуды меньше 30 %, фазы сигнала — менее одной восьмой периода.

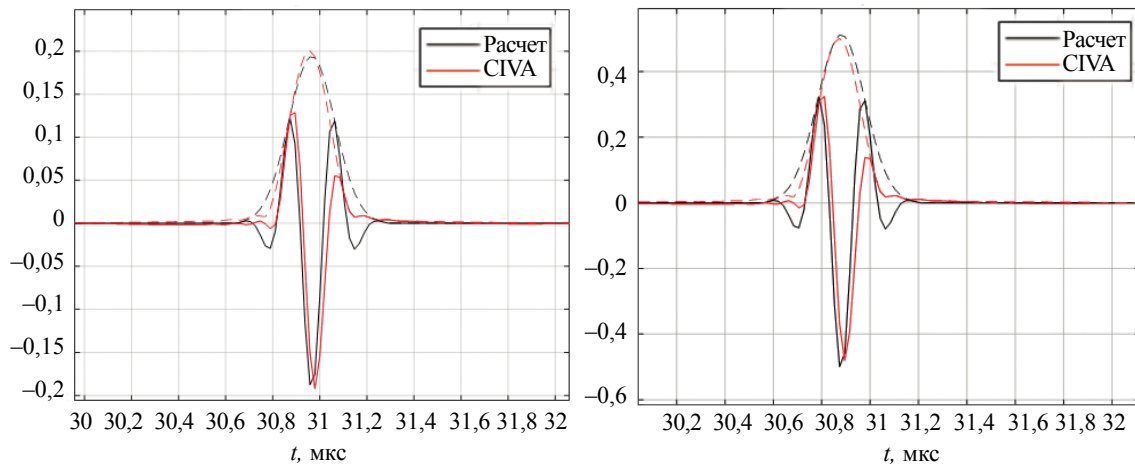


Рис. 9. Сравнение эхосигналов, рассчитанных программой трассировки по формуле (1) и программой CIVА. Штриховыми линиями показаны графики огибающих эхосигналов.

Для ускорения вычислений эхосигналы по формуле (2) рассчитывали для 10, 20 и 30 выстрелов, то есть использовали только около 10 % эхосигналов, измеренных в режиме двойного сканирования. В табл. 1 приведены результаты определения скорости продольной волны по формуле (1) при использовании целевой функции $D_c(v)$ (левая половина таблицы с фоном ячеек белого цвета) и целевой функции $D_m(v;a_e)$ (правая половина таблицы с фоном ячеек серого цвета). Расчеты проводили для шести значений скорости продольной волны $\{v_0\}$, которые использовали как начальные для алгоритма поиска минимума по формуле (1). Строки в левой и правой половинах таблицы расположены по возрастанию значений целевых функций.

Таблица 1

Результаты определения скорости продольной волны в сварном соединении по итогам численного эксперимента

Целевая функция $D_c(v)$				Целевая функция $D_m(v;a_e)$			
Начальные значения $\{v_0\}$, мм/мкс	Полученное решение $\{\hat{v}_0\}$, мм/мкс	Целевая функция	Отличие целевой функции от минимальной, %	Начальные значения $\{v_0\}$, мм/мкс	Полученное решение $\{\hat{v}_0\}$, мм/мкс	Целевая функция	Отличие целевой функции от минимальной, %
6	6,3504	5,4166	0,00	6,1	6,3484	10,7442	0,00
6,2	6,3502	5,4175	0,02	6,2	6,3477	10,7444	0,00
6,5	6,3654	5,5060	1,65	6,5	6,3483	10,7447	0,00
6,1	6,3645	5,5084	1,70	6	6,3480	10,7459	0,02
6,4	6,3825	5,5084	1,70	6,3	6,3480	10,7463	0,02
6,3	6,3788	5,5394	2,27	6,4	6,3475	10,7463	0,02

При использовании целевой функции $D_c(v)$ дисперсия всех полученных решений $\{\hat{v}_0\}$ равна $1,86 \cdot 10^{-4}$, скорость продольной волны можно оценить как $\hat{c}_{v,l} = \langle \{\hat{v}_0\} \rangle = 6,3653$ мм/мкс (относительная погрешность 0,241 %). Если оценить $\hat{c}_{v,l}$ только по тем решениям $\{\hat{v}_0\}$, целевая функция $D_c(v)$ которых отличается от минимальной меньше чем на 1 % (первые две строчки левой половины таблицы), то $\hat{c}_{v,l} = 6,3503$ мм/мкс (относительная погрешность 0,004 %). Значения целевой функции $D_c(v)$ говорят о том, что она имеет не меньше трех минимумов.

При использовании целевой функции $D_m(v; a, a_{\epsilon})$ дисперсия всех полученных решений $\{\hat{v}_0\}$ равна $1,17 \cdot 10^{-7}$, что на три порядка меньше, чем для целевой функции $D_c(v)$, и скорость продольной волны можно оценить как $\hat{c}_{v,l} = \langle \{\hat{v}_0\} \rangle = 6,3480$ мм/мкс (относительная погрешность — 0,03 %). Значения всех целевых функций отличаются от минимального значения меньше, чем на 0,2 %, что свидетельствует об одном минимуме целевой функции $D_m(v; a, a_{\epsilon})$.

Таким образом, численный эксперимент подтвердил вывод, сделанный в разделе 1.1. относительно того, что использование целевой функции $D_m(v; a, a_{\epsilon})$ предпочтительнее, чем использование $D_c(v)$. Полученная в численном эксперименте относительная погрешность определения скорости продольной волны меньше, чем 0,1 %, что указывает на работоспособность предложенного алгоритма (1) и отсутствие принципиальных ошибок программы.

4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения модельных экспериментов был изготовлен стенд, состоящий из двух стальных частей, имитирующих основной металл ОК и нескольких сменных частей, имитирующих сварные соединения с акустическими свойствами дюралюминия, аустенитной стали и латуни. Акустический контакт между сменными частями и частями стенда, имитирующими основной металл ОК, обеспечивался с помощью глицерина. С целью повышения качества контакта все части стенда поджимались друг к другу специальными винтами. Для всех сменных частей были измерены скорости продольной волны с помощью обычного толщиномера.

Модельные измерения выполняли на установке, показанной на рис. 10. Она состояла из сканирующего устройства, установленного на трек, которое управлялось системой «Авгур 5.2». В прижимы сканирующего устройства были вставлены антенные решетки на призмах для перемещения вдоль стрелки желтого цвета. Это позволило провести измерения эхосигналов в 25-ти положениях относительно сварного соединения с шагом 2,5 мм.

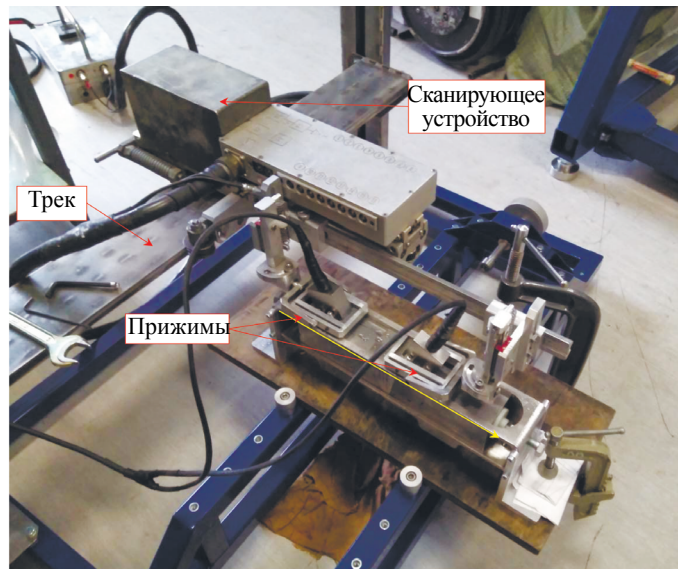


Рис. 10. Установка для проведения измерений.

На рис. 11 показан стенд с моделью сварного соединения, которое имитируется сменной частью из аустенитной стали.

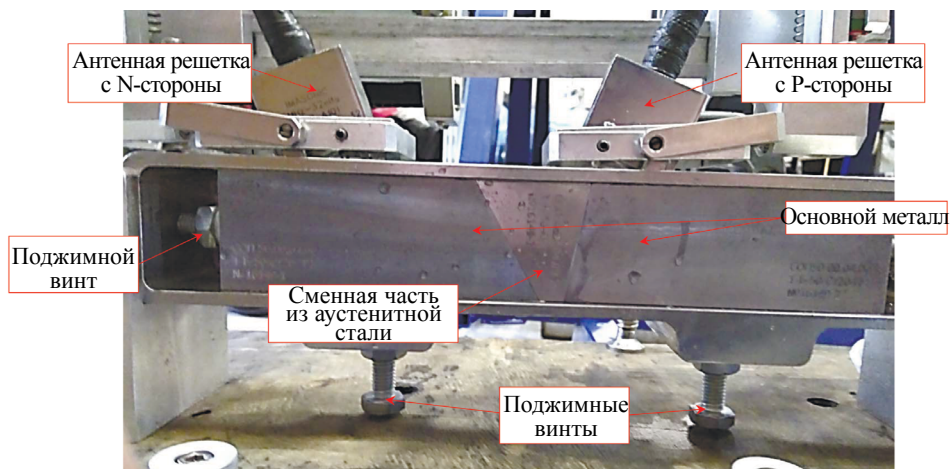


Рис. 11. Стенд со сменной частью из аустенитной стали, имитирующей сварное соединение.

Эхосигналы восьми выстрелов при однократном отражении от дна, измеренные в модельном эксперименте со сменной частью из аустенитной стали, представлены на рис. 12а, на рис. 12б показаны эхосигналы, рассчитанные по формуле (2). Из-за недостаточного хорошего акустического контакта на границах «сменная часть — основной металл», амплитуда измеренного сигнала соизмерима с уровнем шума. Но даже по таким зашумленным эхосигналам удалось сделать приемлемую оценку скорости продольной волны (см. далее табл. 2).

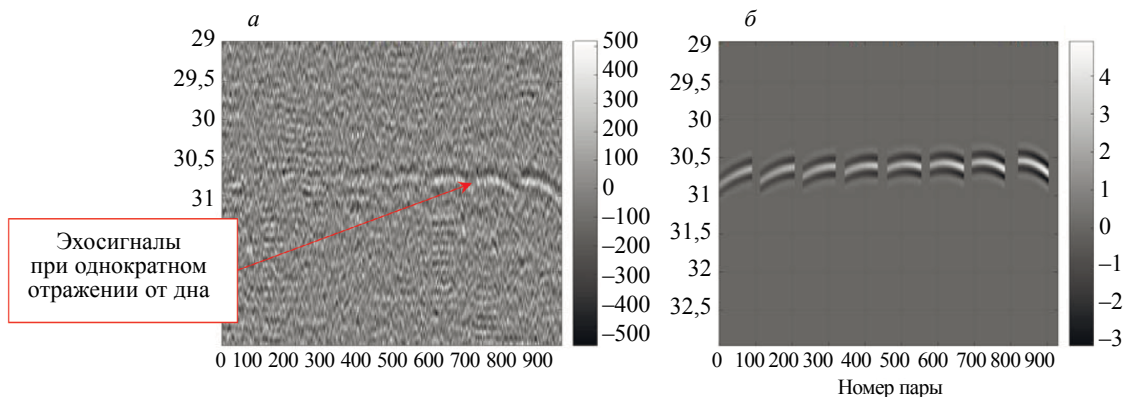


Рис. 12. Эхосигналы, измеренные (а) и рассчитанные (б) со сменной частью из аустенитной стали.

Эхосигналы восьми выстрелов при однократном отражении от дна, измеренные в модельном эксперименте со сменной частью из дюралюминия, представлены на рис.13а. На рис. 13б показаны

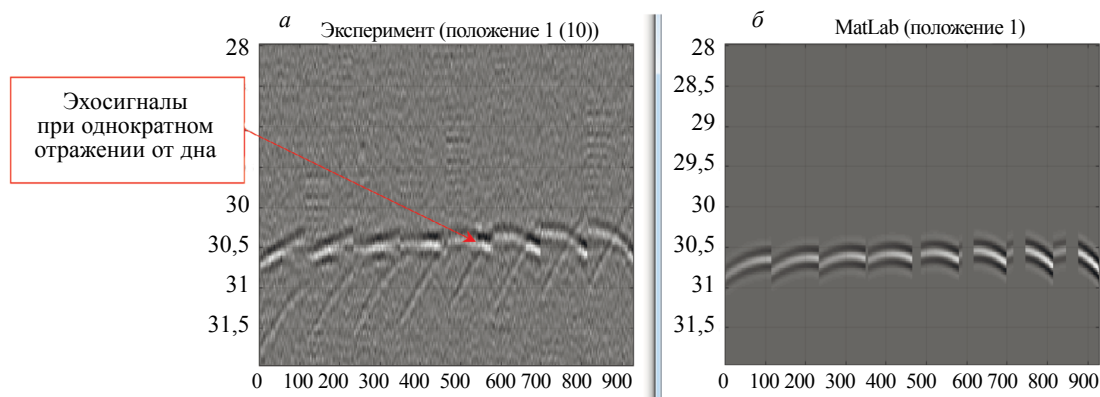


Рис. 13. Эхосигналы, измеренные (а) и рассчитанные (б) со сменной частью из дюралюминия.

ны экосигналы, рассчитанные по формуле (2). Сравнив экосигналы, измеренные при разных сменных частях стенда (рис. 12 и 13) можно заметить, что отношение сигнал/шум сильно зависит из-за качества контакта разных частей стенда.

Таблица 2

Результаты определения скорости продольной волны в сварном соединении по итогам модельного эксперимента

Материал сменной части, имитирующей сварное соединение	Скорость волны, измеренная толщиномером, мм/мкс	Скорость волны, рассчитанная по алгоритму, мм/мкс	Относительные отклонения результатов расчета, %
Алюминий	6,38±0,032	6,36	-0,32
Аустенитная сталь	5,70±0,029	5,66	-0,63
Латунь	4,20±0,021	4,22	0,48

В табл. 2 приведены значения скорости продольной волны в сменных частях стенда, имитирующих сварное соединение, измеренные ультразвуковым толщиномером с погрешностью $\pm 0,5$ % и рассчитанные по предложенному алгоритму (1). Относительные отклонения результатов расчета скорости продольной волны оказались менее 0,7 %.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Предложен метод определения скорости продольной ультразвуковой волны в сварном соединении, основанный на сравнении реальных и рассчитанных по формуле (2) экосигналов. Его работоспособность была проверена в численном эксперименте на экосигналах, полученных программой CIVA.

2. Выполнены численный и аналитический расчеты погрешностей определения скорости продольной волны в зависимости от ошибок в задании параметров ОК. Было показано, что ошибки задания толщины ОК около 0,5 мм и базы порядка 1 мм, снижают точность определения скорости продольной волны на недопустимо большую величину в 2—3 %.

3. Проведены модельные эксперименты для разных однородных сварных соединений на специально изготовленном стенде. Погрешность расчета по предложенному алгоритму (1) составляет менее 0,7 %.

4. В список определяемых параметров v могут быть включены дополнительные параметры, например, скорость поперечных волн, толщина объекта контроля, расстояние между призмами.

5. Предложенный в настоящей статье алгоритм обработки экспериментальных экосигналов при УЗК сварного соединения для восстановления скоростного разреза в рамках лучевой модели использует метод трассировки траекторий лучей. Полученный скоростной разрез может быть использован в дальнейшем в качестве начального приближения в нелинейной томографической обратной задаче диагностики сварного соединения с применением более точного волнового приближения.

Автор благодарен ведущему научному сотруднику НИВЦ МГУ имени М.В. Ломоносова С.Ю. Романову за замечания и предложения, высказанные в процессе подготовки статьи.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-11-01065).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1 (51). С. 64—70.

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

3. Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Роль выбора базисных функций в задачах акустической томографии океана // Акустический журнал. 2007. Т. 53, № 6. С. 791—808.

4. Goncharovsky A.V., Romanov S.Y. Iterative methods for solving coefficient inverse problems of wave tomography in models with attenuation // Inverse Problems. 2017. Т. 33, No. 2. P. 025003. URL: <https://doi.org/10.1088>

5. *Goncharky A.V., Romanov S.Y., Seryozhnikov S.Y.* Inverse problems of 3D ultrasonic tomography with complete and incomplete range data // *Wave motion*. 2014. Т. 51. P. 389–404. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2013.10.001>
6. *Гончарский А.В., Романов С.Ю., Серёжников С.Ю.* Суперкомпьютерные технологии в задачах проектирования томографических диагностических комплексов. Серия «Суперкомпьютерное образование». Изд-во СПбПУ, 2016. 230 с. ISBN: 978-5-7422-5213-9. [Goncharky A.V, Romanov S.Y, Seryozhnikov S.Y. Supercomputer technologies in development of diagnostic tomography facilities (in Russian). SPb.: Politechnical University publishing, 2016. 230 p.]
7. *Мэтьюз Д. Г., Финк К. Д.* Численные методы. Использование MATLAB. 3-е изд. М.: Изд. дом «Вильямс», 2001. 720 с.
8. Официальный сайт фирмы EXTENDE. URL: <http://www.extende.com/> (дата обращения: 24.10.2016).
9. *Бреховских Л.М., Годин О.А.* Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 416 с.
10. *Schmerr L.W. Jr.* Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation. A Modeling Approach. Second Edition. Springer, 2016. 492 p. DOI 10.1007/978-3-319-30463-2.
11. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. Пер. с англ. Изд. 2. М.: Наука, 1973. 720 с.
12. *Кравцев Ю.А., Орлов Ю.И.* Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с. DOI: 10.1007/978-3-642-84031-9.
13. *Базулин Е.Г.* Учет анизотропных свойств сварного соединения при восстановлении изображения отражателей по эхосигналам, измеренным ультразвуковой антенной решеткой // *Дефектоскопия*. 2017. № 1. С. 11—25.
14. *Červený V.* Seismic ray theory. New York: Cambridge University Press, 2001. 713 p.
15. *Бабич В.М., Киселев А.П.* Упругие волны. Высокочастотная теория. СПб.: БХВ-Петербург, 2014. 320 с.
16. *Базулин Е.Г.* Калибровка ультразвуковой антенной решетки, установленной на призму // *Дефектоскопия*. 2014. № 4. С. 50—63.