

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ТРУБ И ЛИСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SH- И tH-ВОЛН

© 2023 г. Л.В. Волкова^{1,*}, О.В. Муравьева¹, К.В. Колпаков¹

¹ФГБОУ ВО ИжГТУ имени М.Т. Калашникова,
Россия 426064 Ижевск, ул. Студенческая, 7
E-mail: *ludmila396@rambler.ru

Поступила в редакцию 31.05.2023; после доработки 09.06.2023
Принята к публикации 09.06.2023

Приведены результаты сравнительных исследований акустической анизотропии tH-волн и SH-волн в листах и трубах различной толщины. Поворот направления поляризации за счет соответствующей ориентации преобразователей позволил оценить угловую индикатрису скорости волн относительно направления проката. Показаны существенные различия в акустической анизотропии tH-волн и SH-волн как для труб, так и для листов.

Ключевые слова: листы, трубы, акустическая анизотропия, индикатрису скорости, tH-волна, SH-волна, скорость волны.

DOI: 10.31857/S0130308223080092, EDN: DZHS AJ

ВВЕДЕНИЕ

Для листового проката из углеродистых сталей характерна анизотропия механических свойств, которая влияет на свойства материала при производстве изделий, технологические и эксплуатационные характеристики. Акустические методы структуроскопии по скорости ультразвуковых волн широко применяются при оценке напряженно-деформированного состояния, прочностных свойств, текстуры и анизотропии проката [1—3]. ГОСТ Р 52890—2007 регламентирует использование при оценке акустической анизотропии поперечных горизонтально поляризованных tH-волн, при этом на фактор анизотропии накладывается фактор напряженно-деформированного состояния объекта, в том числе при формировании труб из листа. Использование нормальных волн горизонтальной поляризации (SH-волна) эффективно при контроле листов и труб, в том числе методами внутритрубной диагностики [4]. При этом требуется знание скоростей акустических волн в различных направлениях.

Цель работы: сравнительные исследования акустической анизотропии tH-волн и SH-волн в листах и трубах различной толщины.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследований использованы листы из стали Ст3 и 09Г2С толщиной 8, 12 и 16 мм размерами 1000×1000 мм² и изготовленные из указанного проката методом холодного гнба вырезки труб диаметром 500 мм шириной 1000 мм с продольным сварным швом. Для исследований акустической анизотропии tH-волны использован электромагнитно-акустический (ЭМА) преобразователь и структуроскоп СЭМА. ЭМА-преобразователь формирует две tH-волны ортогональных поляризации в плоскости листа (трубы), распространяющиеся по толщине листа (рис. 1а). Вращение ЭМА-преобразователя относительно центра излучателя по угловому шаблону с шагом 10° позволяет оценить изменение скорости по углу и построить индикатрису скорости tH-волны. Скорость tH-волны C_{tH} рассчитывалась по разнице времен прихода между N донными импульсами

$$\Delta t_N: C_{tH} = \frac{h \cdot N \cdot 2}{\Delta t_N}, \text{ где } h \text{ — толщина листа (трубы).}$$

При исследовании скорости SH-волны использовали пьезопреобразователи с сухим точечным контактом в раздельном режиме, разнесенные на расстояние $l = 400$ мм и низкочастотный дефектоскоп DIO 1000 LF (рис. 1б). Перемещение пьезоизлучателя и пьезопремника по угловому шаблону с шагом 10° (рис. 1в) позволяет построить индикатрису скорости SH-волны. Скорость SH-волны C_{SH} рассчитывалась по времени прихода импульса t от излучателя к приемнику с учетом времени

задержки в преобразователе и точки отсчета времени t_3 : $C_{SH} = \frac{l}{t_{\text{общ}} - t_3}$. С целью увеличения точ-

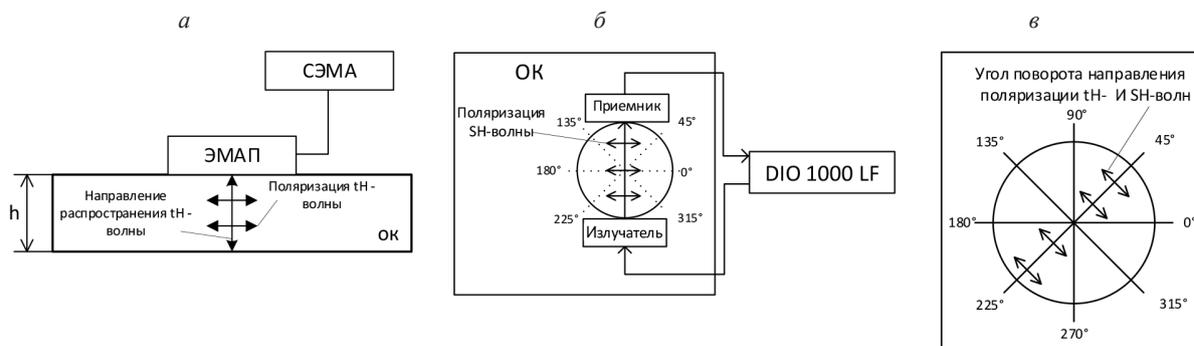


Рис. 1. Схема измерения акустической анизотропии tN-волны (а), SH-волны (б), изменение направления поляризации волн (в).

ности, время прихода в зависимости от угла определено с использованием функции автокорреляции импульсов. Погрешность измерения скоростей составила 1 м/с.

Коэффициент анизотропии a_0 определяется формулой: $a_0 = \frac{2 \cdot (C_0 - C_{90})}{C_0 + C_{90}} \cdot 100\%$, где C_0 , C_{90} — скорости распространения SH-волн или tN-волн с поляризацией под углом 0 и 90 град относительно направления проката.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментальных исследований индикатрисы скорости акустической волны в листе и трубе одной толщины (12 мм) иллюстрирует рис. 2. Значения акустической анизотропии

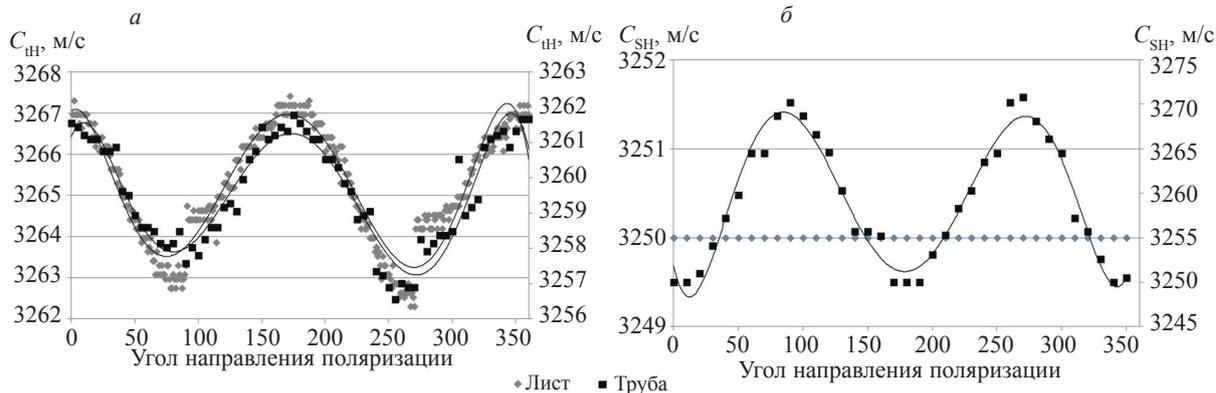


Рис. 2. Индикатрисы скоростей tN-волн (а) и SH-волн (б) в листе и трубе толщиной 12 мм.

Таблица 1

Акустическая анизотропия исследованных образцов

Тип волны	Коэффициент анизотропии, %					
	Лист			Труба		
	8 мм	12 мм	16 мм	8 мм	12 мм	16 мм
tN-волна	1,5	0,2	1,4	1,3	0,1	1,2
SH-волна	0	0	0,4	5,5	2,4	3,1

исследованных образцов представлены в табл. 1. Имеются существенные различия в характере изменения скорости и значениях анизотропии свойств SH-волн и tN-волн в листах и трубах.

В общем случае tH-волна, распространяющаяся в направлении толщины листа и в направлении толщины трубы, имеют близкую анизотропию, при этом наблюдается незначительное уменьшение анизотропии при переходе от листа к трубе. В отличие от tH-волны, анизотропия для SH-волны, распространяющейся вдоль листа (трубы) при той же поляризации, имеет существенно меньшую (нулевую) анизотропию в случае листа, при этом распространение SH-волн в трубе приводит к существенному увеличению анизотропии до 5,5 % для трубы толщиной стенки 8 мм. В общем случае акустическая анизотропия SH-волн в трубе превышает анизотропию по tH-волне, что может быть обусловлено дополнительным влиянием геометрической анизотропии, обусловленной различием в путях распространения волны с эпюрой по толщине по цилиндрической поверхности.

ВЫВОДЫ

Исследованные закономерности распространения tH-волн и SH-волн в листах и трубах могут быть использованы в задачах оценки напряженно-деформированного состояния и волноводного контроля в качестве учета влияющего фактора начальной анизотропии и геометрической дисперсии скорости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Муравьева О.В., Муравьев В.В.* Методические особенности использования SH-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 363—369.
2. *Belyaev A.K., Galyautdinova A.R., Polyanskiy V.A., Semenov A.S., Tretyakov D.A., Yakovlev Y.A.* Acoustic anisotropy and hydrogen concentrations during thermomechanical loading of single-crystal nickel-based superalloys // *Advanced Structured Materials*. 2021. V. 143. P. 19—32.
3. *Хлыбов А.А., Углов А.Л., Рябов Д.А., Аносов М.С.* Оценка поврежденности конструкционных металлических материалов акустическими методами // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2022. Т. 25. № 4. С. 18—26.
4. *Trushkevych O., Dixon S., Tabatabaeipour M., Potter M.D.G., MacLeod C., Dobie G., Edwards R.S.* Calibration-free SH guided wave analysis for screening of wall thickness in steel with varying properties // *NDT & E International*. 2023. V. 135. P. 102789.