

ОПИСАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ПРЯМЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН СЕРИИ SHR



ВЕЧЁРА Михаил Сергеевич

Инженер, ООО «Константа УЗК», Санкт-Петербург, аспирант кафедры электроакустики и ультразвуковой техники (ЭУТ), Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

Теория применения поперечных волн

В настоящее время акустический неразрушающий контроль выходит далеко за рамки поиска несплошностей в различных материалах. Зачастую анализ распространяющихся и возникающих в объекте контроля ультразвуковых волн позволяет судить не столько об отсутствии дефектов, сколько о его физико-механических свойствах. Акустический неразрушающий контроль в силу своей относительной дешевизны, простоты и безопасности для человека позволяет перейти от выборочного контроля свойств специально подготовленного образца к полному сплошному контролю готовых изделий, не подвергая их повреждениям или разрушению.

Принципы определения или оценки физико-механических свойств основываются на их аналитических или корреляционных связях с акустическими характеристиками. К основным физико-механическим свойствам материалов относят [1]: упругие (модуль нормальной упругости, модуль

сдвига, коэффициент Пуассона); прочностные (прочность при растяжении, сжатии, изгибе и т.д.), технологические (плотность, пластичность, влажность и т.д.); структурные (анизотропия, кристалличность); размеры, форму включений. Так, например, все три упругих постоянных материала аналитически связаны со значениями скоростей продольной и поперечных волн. Следует отметить, что точность такой оценки напрямую зависит от точности измерения значений скоростей. Ниже приведены аналитические выражения для определения упругих постоянных изотропного материала, полученные за счет использования значений скоростей продольной c_l и поперечной c_t волн, распространяющихся в нем, а также его плотности ρ [2]:

$$\nu = \frac{0,5 - \left(\frac{c_t}{c_l}\right)^2}{1 - \left(\frac{c_t}{c_l}\right)^2};$$

$$G = \rho c_t^2;$$

$$E = 2G(1 + \nu) = 4\rho c_t^2 \cdot \left(\frac{0,75 - \left(\frac{c_t}{c_l}\right)^2}{1 - \left(\frac{c_t}{c_l}\right)^2} \right),$$

где ν — коэффициент Пуассона; G — модуль сдвига, Па; E — модуль нормальной упругости, Па.

Стоит подчеркнуть, что использование ультразвуковых волн дает возможность определять упругие характеристики любого материала, прозрачного для ультразвука, включая композитные и кристаллические материалы [3]. Однако нужно отметить, что приведенные формулы неприменимы для анизотропных материалов, определение характеристик которых требует комплексного подхода, что выходит за рамки настоящей работы.

Основываясь на измерении параметров продольных и поперечных волн, можно судить о структурных свойствах и характеристиках мате-

риала. Так, например, известно, что внутренние напряжения в металлах являются причиной возникновения дислокаций. Механические напряжения в местах их скопления могут в десятки и сотни раз превышать средние напряжения в детали, что может приводить к микроразрывам и, как следствие, к возникновению дефектов. Поперечные волны крайне чувствительны к структурным нарушениям. В области скопления дислокаций их затухание возрастает. Это позволяет обнаруживать микродефекты на ранней стадии. Скорость поперечных волн также связана с напряжениями внутри материала, что называется акустоупругостью. Время распространения ультразвуковых волн в объекте связано с напряжениями, прилагаемыми к нему, через коэффициенты упругоакустической связи [4]. Явление акустоупругости широко применяется на практике для оценки величины напряжений, в том числе в полевых условиях, без снятия нагрузки на объект [5, 6]. Определение напряжений с помощью ультразвуковых волн носит название акустической тензометрии. Установлено, что погрешность акустической тензометрии сопоставима с погрешностями электротензометрии и рентгеновского метода [7]. В работе [8] выявлена и описана зависимость скорости ультразвуковых волн от структуры и типа термической обработки сталей.

Нельзя также не отметить, что поперечные волны могут найти применение в сфере метрологического обеспечения акустического неразрушающего контроля, например для упрощения определения и проверки акустических свойств мер и настроечных образцов.

Приведа основные и наиболее известные способы применения поперечных ультразвуковых волн для целей контроля свойств материалов, обращаем внимание, что существует гораздо больше способов их использования, но они, как правило, являются узкоспециализированными и их обзор выходит за рамки настоящей статьи.

Описание преобразователей серии SHR

Для реализации описанных методов необходим источник излучения поперечных волн. Традиционно для этих целей применялись электромагнитно-акустические преобразователи (ЭМАП), способные излучать и принимать поперечные волны любой поляризации. Однако ЭМАП обладают сравнительно невысоким уровнем чувствительности. Кроме этого, ЭМАП могут использоваться только при условии, что исследуемый материал является ферромагнетиком и/или электропроводящим. Таким образом, изучение композитных материалов, пластмасс становится невозможным. Данных недостатков лишены пьезоэлектрические преобра-



Рис. 1. Преобразователь П111–2-SHR производства ООО «Константа УЗК»

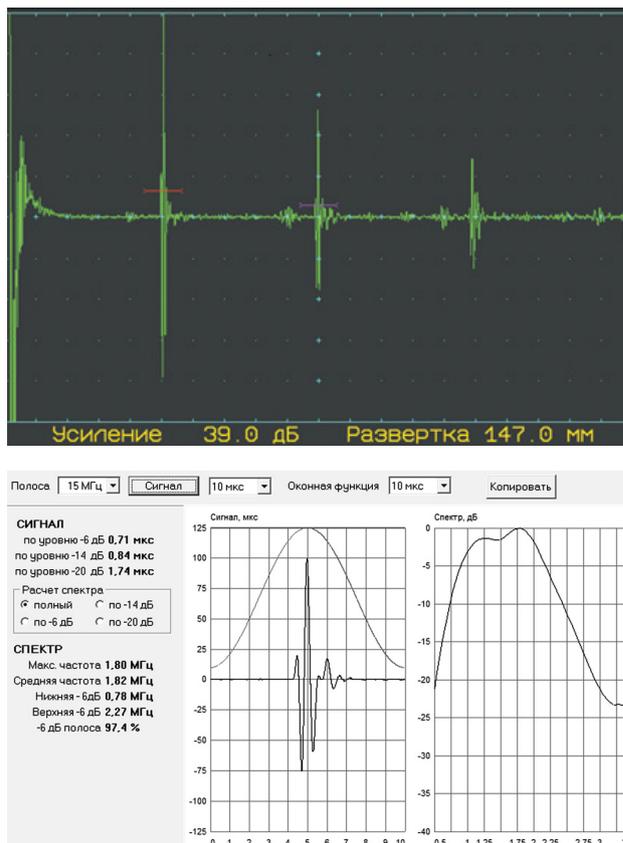


Рис. 2. Данные сигналы в СО-2, вид импульса и спектр сигнала для П111–2-SHR

зователи (ПЭП). Наиболее известными ПЭП для работы с поперечными волнами являются датчики производства Olympus — V152, V154 и V157, однако их приобретение связано с дорогостоящей доставкой и отсутствием гарантии, а также с высокой стоимостью. Известны также способы возбуждения поперечных волн с помощью ПЭП продольных волн на объекте с поверхностью с периодическими неровностями [9]. Однако такой способ неприменим в полевых условиях, а также требует изготовления специальных образцов.

Приведенные факты свидетельствуют о необходимости разработки ПЭП для работы с поперечными волнами. Основываясь на этом, компанией

ООО «Константа УЗК» разработаны прямые совмещенные пьезоэлектрические преобразователи серии SHR. Внешний вид одного из них приведен на рис. 1.

На рис. 2, 3 приведены изображения донных сигналов на мере СО-2 от донной поверхности на глубине 59 мм, полученных с помощью преобразователя П111–2–SHR и Olympus V154. Возбуждение осуществлялось дефектоскопом UCD50.

По рисункам видно, что данный преобразователь обладает более коротким импульсом и, как следствие, более широкой полосой пропускания, хорошим уровнем усиления, а также малой мертвой зоной. Совокупность этих факторов позволяет применять ПЭП серии SHR для контроля широкой номенклатуры материалов в большом диапазоне толщин. При этом преобразователь серии SHR не уступает зарубежному аналогу и может быть применен для решения тех же задач.

Данные преобразователи могут быть изготовлены на частоту как 2 МГц, так и 5 МГц. Активным элементом в данных ПЭП выступает специальная пьезокерамика, излучающая непосредственно поперечные волны, что позволяет получать сигналы высокой амплитуды. Корпус выполнен из нержавеющей стали и обладает миниатюрными размерами. Отличительной особенностью также является применение особого инженерного полимера для изготовления протекторов для преобразователей с частотой 5 МГц, это позволяет достигать малой длительности ультразвукового импульса, сохраняя при этом высокую степень износостойкости и надежности ПЭП серии SHR. Преобразователь с частотой 2 МГц оснащен керамическим протектором.

Нельзя не обратить внимание на общеизвестный факт, состоящий в невозможности распространения поперечных волн в жидкостях, что, как следствие, приводит к проблеме обеспечения стабильного акустического контакта между ПЭП

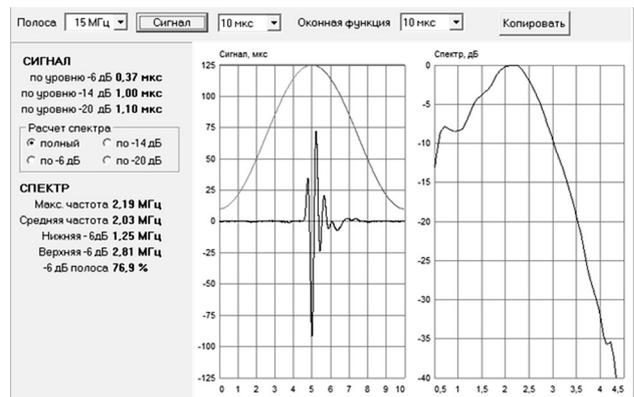
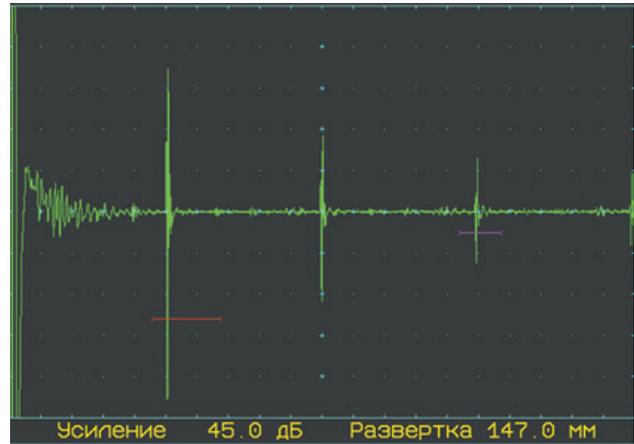


Рис. 3. Донные сигналы в СО-2, вид импульса и спектр сигнала для Olympus V154

и объектом контроля. Для этого, помимо преобразователей SHR, компанией ООО «Константа УЗК» была разработана контактная паста УЗК-SHR, обеспечивающая акустически прозрачный для поперечных волн слой. Помимо этого, данная паста не оказывает воздействия на объект контроля и не вызывает коррозию. Температурный диапазон ее применения от -5 до $+50$ °С, паста водорастворима

Измеренные свойства материала призм

Показатель	Номер прутка										
	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	П9	П10	П11
Скорость l -волн, м/с	1931,5	2060,1	1954,0	2054,8	2049,1	1985,3	1934,3	2028,1	1950,7	1951,6	1905,3
Скорость t -волн, м/с	888,20	932,00	905,96	930,78	915,66	902,9	914,48	926,99	909,41	909,51	918,60
Плотность, г/см ³	1,524	1,473	1,509	1,477	1,490	1,515	1,521	1,478	1,511	1,520	1,523
Модуль Юнга, МПа	3283,7	3509,2	3377,6	3508,7	3435,0	3384,0	3449,9	3474,5	3402,5	3422,7	3466,1
Коэффициент Пуассона	0,366	0,371	0,363	0,371	0,375	0,370	0,356	0,368	0,361	0,361	0,349

и легко очищается с объекта, при этом полностью безвредна для человека. Качество пасты УЗК-SHR, а также ее эксплуатационные характеристики были высоко оценены сотрудниками кафедры ЭУТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Отзыв об использовании пасты доступен на официальном сайте ООО «Константа УЗК».

Опыт применения преобразователей SHR

Как было отмечено, единственное условие для использования ПЭП поперечных волн — акустическая прозрачность материала. Кроме этого, следует также подчеркнуть, что применение данных ПЭП не обязательно связано с трудозатратными научными изысканиями, а вполне может ограничиваться целями отбраковки и входного контроля материала.

На предприятии ООО «Константа УЗК» ПЭП серии SHR также активно применяются. В основном их использование сводится к определению скорости и затухания поперечных ультразвуковых волн как в заготовках для образцов, так и в уже готовых образцах при подготовке к калибровке. Однако нередко данный ПЭП применяется для входного контроля материалов для изготовления преобразователей.

Для производства призм специализированных преобразователей был закуплен композиционный синтетический материал в виде прутков диаметром 100 мм. Однако после изготовления призм было выявлено сильное отклонение фактических углов ввода от расчетных. В целях проверки поставленного материала был в том числе применен преобразователь П111–2-SHR. Измеренные значения скоростей и расчетные значения упругих физико-механических параметров приведены в таблице.

Измерения скорости проводились эхометодом по двум донным сигналам (по фронту) на образцах материала толщиной 15 мм, представляющих собой срез прутка в виде цилиндра. Плотность определялась как отношение массы образца, измеренной на весах, к объему образца. Для упрощения расчета и оперативности оценки материал считался изотропным. По приведенным данным видно, что, несмотря на относительно небольшую разницу значений модуля Юнга, в материале наблюдается значительная девиация скоростей как продольных, так и поперечных волн. На основании полученных результатов было принято решение о прекращении закупки данного материала и замене его на более акустически стабильный.

Помимо описанного случая, известно применение преобразователей серии SHR для оценки анизотропии материалов сварного шва. Также данные ПЭП использовались для разработки преобразователей для контроля целостности трубопровода из новой марки стали, при этом установлено, что точность измерения скорости поперечных волн

преобразователем SHR значительно превосходит точность подобных измерений, проведенных с помощью двух наклонных ПЭП, что позволяет корректно провести расчет угла призмы для разрабатываемых датчиков.

Заключение

В условиях отсутствия альтернативных решений крайне важно было разработать прямой пьезоэлектрический преобразователь поперечных волн. В настоящей статье приведены некоторые способы использования преобразователей подобного типа. Так, например, преобразователи поперечных волн могут быть применены для определения упругих постоянных материала, степени анизотропии и оценки значения действующих на объект напряжений. Подчеркнуто, что преобразователи поперечных волн могут применяться не только для научных исследований, но и для решения инженерно-прикладных задач. Преобразователи серии SHR могут быть востребованы сертификационными и метрологическими органами, различными производственными предприятиями для целей входного контроля, производителями средств неразрушающего контроля, а также обучающими центрами и университетами.

Компанией ООО «Константа УЗК» разработаны преобразователи серии SHR, излучающие непосредственно поперечные волны. Преобразователи серии SHR обладают характеристиками, позволяющими применять их для решения широкого спектра задач, что подтверждено результатами практических исследований. Проведено сравнение преобразователя производства ООО «Константа УЗК» и Olympus. Установлено, что преобразователь серии SHR по своим характеристикам не уступает, а местами превосходит зарубежный аналог.

Помимо датчика, разработана контактная паста УЗК-SHR, которая в совокупности с ПЭП представляет собой комплексное решение задач, связанных с определением физико-механических свойств различных материалов.

Библиографический список

- 1. Неразрушающий контроль:** справочник: в 8 т. / под ред. В. В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. 2-е изд, дораб. М.: Машиностроение, 2006. 864 с.
- 2. Крауткремер Й.** Ультразвуковой контроль материалов: справочник / пер. с нем. Е. К. Бухмана, Л. С. Зенковой; под ред. В. Н. Волченко. М.: Металлургия, 1991. 750 с. ISBN 5-229-00362-6.
- 3. Меркулов Л. Г.** Поглощение ультразвуковых волн в некоторых щелочно-галлоидных кристаллах // Акустический журнал. 1959. Т. V, вып. 4. С. 432–439.

4. **ГОСТ Р 55043–2012.** Контроль неразрушающий. Определение коэффициентов упругоакустической связи. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с.
5. **Курашкин К.В., Мишакин В. В.** Использование результатов ультразвуковых и магнитных исследований для оценки напряжений без разгрузки материала // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. 2013. № 4(101). С. 246 – 255. EDN SEZXEF.
6. **ГОСТ Р 52890–2007.** Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля напряжений в материале трубопроводов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2009. 21 с.
7. **Никитина Н.Е., Смирнов В. А.** Новая технология определения механических напряжений в металлоконструкциях на основе явления акустоупругости // В мире неразрушающего контроля. 2009. № 1(43). С. 26 – 28. EDN SJBZRJ.
8. **Муравьев В.В., Зуев Л. Б., Комаров К.Л.** Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996. 184 с. ISBN 5-02-031211-8. EDN QCESRR.
9. **Пат. 2006853 РФ. С1, МПК G 01 N 29/04.** Ультразвуковой способ определения упругих констант твердых тел / Я. Ю. Самедов, В. Г. Щербинский, А. И. Абдуллаев. Заявка № 4947350/28; заявл. 17.06.1991; опубл. 30.01.1994, Бюл. № 3. 4 с.



КОНСТАНТА КТ

Портативный многофункциональный твердомер, реализующий три стандартизованных метода измерений – Leeb, UCI и PR

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ D
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ U-50N
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ SPR-A

constanta.ru

