

АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЕ РАДИОКОМПОНЕНТЫ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

А.Багдасарян^{1, 2}, д.т.н., В.Днепровский³, к.т.н., Г.Карапетьян³, к.т.н., С.Нефедов⁴, О.Зорин³

Ультразвуковая дефектоскопия – известный метод определения дефектов в твердых телах. Однако минимальный предел распознаваемого дефекта в ультразвуковых толщиномерах и дефектоскопах составляет одну длину волны (до 1 мм на частотах до 1 МГц). С помощью высокочастотных акустоэлектронных устройств можно обнаружить дефекты меньшего размера – до 1 мкм (длина акустической волны). При использовании техники поверхностных акустических волн (ПАВ) в неразрушающем контроле поверхности твердого тела точность измерений в монокристаллах достигает долей микрона. В отличие от ультразвуковой дефектоскопии метод на ПАВ позволяет выполнять измерения с более высокой надежностью, помехоустойчивостью и при низком энергопотреблении. Разработанная методика открывает практические возможности создания специализированных ультразвуковых дефектоскопов для обнаружения микро- и нанодфектов в монокристаллах, а также осуществления неразрушающего контроля различных объектов в беспроводном режиме.

Среди многообразных принципов организации и методов неразрушающего контроля [1–9], таких как вихретоковые [1–3], магнитные [4], акустические [5–9], в том числе акустические импедансные [5], методы связанных колебаний [6–8], особое место занимают ультразвуковые методы [9], основанные на возбуждении свободно затухающих упругих колебаний в контролируемом объекте или

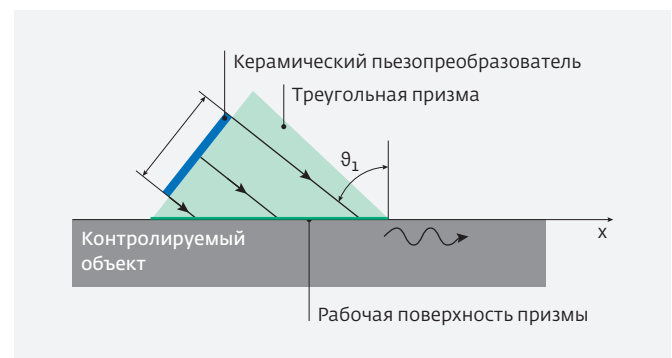


Рис.1. Схема возбуждения ПАВ

¹ ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН.

² ФГУП НИИР, Москва.

³ ЮФУ, Ростов-на-Дону.

⁴ ООО "Контроль. Измерение. Диагностика", Москва.



Рис.2. Блок-схема экспериментального стенда

его части и анализе параметров этих колебаний [9-11]. Количество информации, которое можно извлечь из поведения волны, ограничивается ее длиной. Теоретический минимум в ультразвуковых толщиномерах и дефектоскопах составляет одну длину волны. Дефект меньшего размера не распознается [9].

ПОВЕРХНОСТНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

В ультразвуковой дефектоскопии для контроля качества поверхности и имеющих на ней дефектов удобно использовать ПАВ, поскольку их энергия концентрируется в основном в поверхностном слое толщиной порядка длины волны. Причем чем меньше длина ПАВ, тем более тонкие дефекты поверхности можно контролировать. В таких волнах частицы перемещаются эллиптически. Ультразвуковые волны распространяются прямолинейно, поэтому используемые в дефектоскопии сигналы легко определяются. В ситуации, когда звуковая волна отражается от поверхности материала (от границы двух сред), угол отражения равен углу падения. Звуковая волна, передающаяся из одного материала в другой, преломляется, как и в оптике, в соответствии с законом Снеллиуса:

$$\sin \vartheta_1 / \sin \vartheta_2 = v_1 / v_2,$$

где ϑ_1 – угол падения в первом материале, ϑ_2 – угол преломления во втором материале, v_1 – скорость

звука в первом материале, v_2 – скорость звука во втором материале. Часть волны отражается от границы раздела.

Хорошо известно, что, используя треугольную призму (или клин) и закон Снеллиуса, можно преобразовать продольные акустические волны в ПАВ (рис.1). Поскольку при преобразовании объемной акустической волны в поверхностную угол ϑ_2 должен быть равен $\pi/2$, то угол падения волны в клине на объект для преобразования волны в поверхностную легко определить как:

$$\vartheta_{1п} = \arcsin (v_1/v_2).$$

Учитывая значения v_1 и v_2 в клине из оргстекла и в контролируемом объекте из дюралюминия, соответственно, получим $\vartheta_{1п} = \arcsin (v_1/v_2) = 65,7^\circ$. (Если вместо дюралюминия используется другой металл, то в формуле $\vartheta_{1п} = \arcsin (v_1/v_2)$ скорость v_2 и, соответственно, угол $\vartheta_{1п}$ будут иметь другие значения). Исходя из этого изготавливался клин из оргстекла. Блок-схема экспериментального стенда представлена на рис.2, клинообразный преобразователь и исследуемый образец – на рис.3 и 4. Пьезокерамический преобразователь, который крепится на клин (рис.2), имеет форму диска из пьезокерамики ПКО-78 диаметром 10 мм, резонансная частота преобразователя – 1,9 МГц.

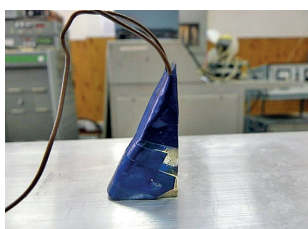


Рис.3. Клинообразный преобразователь

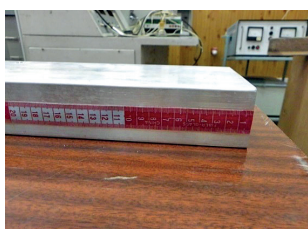


Рис.4. Исследуемый образец

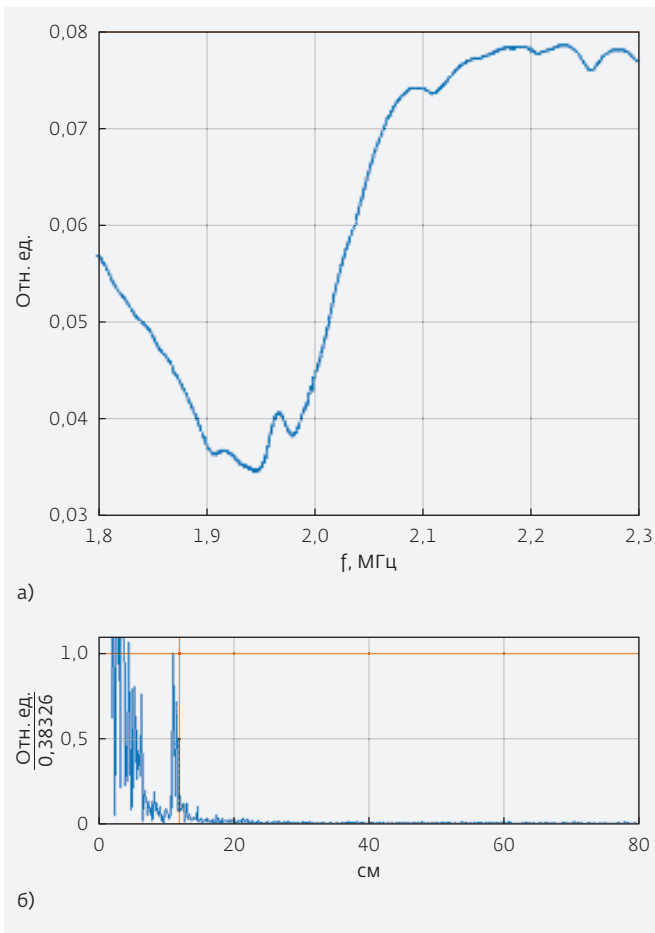


Рис.5. Частотная характеристика импеданса преобразователя с учетом отраженного сигнала (а) и соответствующий ей импульсный отклик, полученный в результате преобразования Фурье (б)

МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

Для возбуждения и приема ПАВ использовался пьезоэлектрический преобразователь, закрепленный на клине. Базовая часть экспериментальной установки – измеритель комплексного коэффициента

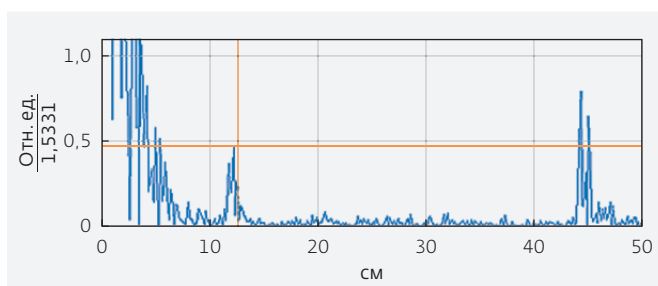


Рис.6. Отражение ПАВ от дефекта, расположенного под углом 4,8° к направлению волнового вектора

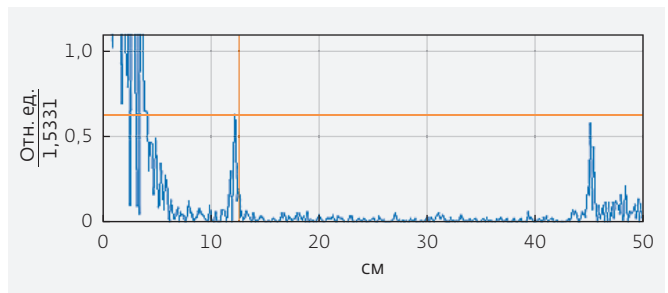


Рис.7. Отражение ПАВ от дефекта, расположенного под углом 2,5° к направлению волнового вектора

передачи (ИККП) "Обзор-103". ПАВ, отраженная от дефектов в образце, преобразуется в электромагнитный сигнал и интерферирует с основным электромагнитным сигналом, что приводит к изрезанности частотной зависимости элемента S_{11} матрицы рассеяния. Полученные данные обрабатываются с помощью преобразования Фурье и после этого на графиках в среде MathCad на мониторе ПК наблюдаются импульсные отклики, по которым можно определить место нахождения, величину и приблизительную форму дефектов [10]. При этом ИККП посылает на преобразователь сигнал, в котором частота меняется со временем по линейному закону (длинный ЛЧМ-сигнал).

Частота меняется дискретно. Величина дискретности зависит от числа задаваемых точек измерения. В каждой точке выполняется измерение на определенной частоте в течение некоторого времени. В отличие от импульсного этот метод позволяет производить измерения с более высокой помехоустойчивостью, надежностью и при низком энергопотреблении. Высокий уровень помехоустойчивости обеспечивается за счет того, что в каждой точке отсчета показания снимаются не один раз, а несколько, затем определяется среднее.

После обработки результатов в среде MathCad видна разница в величине шумов при разном

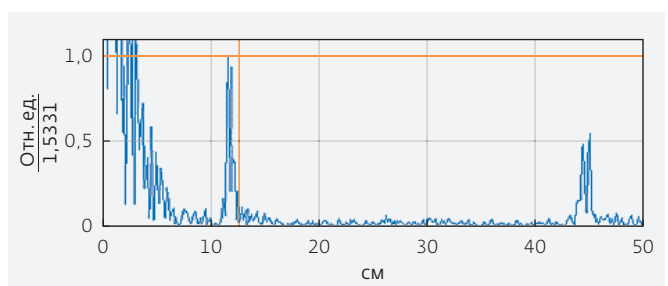


Рис.8. Отражение ПАВ от дефекта, лежащего в апертуре акустического пучка

времени прохождения сигнала на одинаковой полосе частот и с одним и тем же количеством точек-отсчетов. Отсчеты с одной точки усредняются прибором автоматически по определенному алгоритму, за счет чего и обеспечивается уменьшение шумов. При увеличении времени прохождения сигнала наблюдалось заметное снижение шумов.

Оптимальным оказалось время прохождения сигнала, равное 1,25 с, при полосе частот 1,8–2,3 МГц и числе точек, равном 2049. При таких условиях в каждой точке показания снимаются в течение 0,00061 с, что и обеспечивает приемлемый уровень шумов.

В качестве примера на рис. 5а показана частотная характеристика импеданса преобразователя с учетом отраженного сигнала, а импульсный отклик, полученный в результате преобразования Фурье представленной частотной характеристики – на рис. 5б. Нормировочный коэффициент, равный 0,38326, выбран по максимальной амплитуде, отраженной ПАВ от края.

Исследовались отражения от искусственных дефектов на поверхности металла в виде пропилов глубиной 0,5–1,0 мм и отверстий. Амплитуда отраженного импульса, как и следовало ожидать, зависела от расстояния клин-дефект и от размера дефекта.

В качестве примера ниже приводятся результаты измерений на расстоянии 12 см от дефекта (в виде сквозного отверстия диаметром 8 мм) до клина и на расстоянии 45 см от края металлического швеллера до клина. Данные снимались при перемещении датчика поперек образца, от левой боковой поверхности к правой, с шагом 0,5 см. По максимальной амплитуде ПАВ, отраженной от отверстия, был выбран нормировочный коэффициент, равный 1,5331. Результаты измерений представлены на рис. 6–8.

Как видно из рисунков, по мере увеличения угла между волновым вектором и направлением

на дефект амплитуды отраженных импульсов существенно уменьшаются. При углах более 7° отраженный импульс от данного дефекта не наблюдается. Очевидно, увеличение апертуры акустического пучка и его мощности позволит существенно увеличить площадь контролируемой поверхности.

Более высокий частотный диапазон ПАВ с использованием высоких технологий [12, 13] обеспечит обнаружение микро- и даже нанодефектов. Большой интерес представляет также проведение мониторинга дефектов различных объектов в беспроводном режиме [14–18]. Это возможно только при использовании пьезоэлектрических подложек с встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) [11, 19] для возбуждения ПАВ в исследуемых объектах. Предварительные эксперименты по применению подложек ниобата лития с ВШП для исследования состояния поверхности подложек из сапфира в диапазоне 119–123 МГц свидетельствуют об этом [11, 20].

* * *

В статье дан краткий обзор измерительных средств в области ультразвуковой дефектоскопии [2, 4, 6–8, 21], приведены результаты исследований метода контроля дефектов, основанного на преобразовании объемных ультразвуковых волн в ПАВ. Разработана оригинальная методика восстановления импульса отраженного сигнала путем Фурье-преобразования частотной зависимости элемента S_{11} матрицы рассеяния. Базовая часть экспериментальной установки – измеритель комплексного коэффициента передачи ИККП "Обзор-103" [22] – серийно выпускается отечественной промышленностью.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке темы № 16.219.2014К проектной части государственного задания Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бакунов А.С., Мужичкий В.Ф., Курозаев В.П., Нефедов С.В.** Новые вихретоковые толщиномеры неэлектропроводящих покрытий // Материалы 15-й Российской научно-технической конференции "Неразрушающий контроль и диагностика". – Москва, 1999. С. 117.
2. **Нариманов Т.В., Бобылев Ю.Н., Нефедов С.В.** Опыт использования вихретокового дефектоскопа ВД-701 для контроля сварных швов труб в процессе производства // Материалы Российской научно-технической конференции "Технология, оборудование и подготовка кадров в сварочном производстве". – Москва, 2003. С. 95.
3. **Елишев А.В., Нефедов С.В., Редькин М.Ю.** Исследование параметров тепловыделяющих элементов энергетических реакторов современной системой вихретокового и визуального контроля // Наука и технологии в промышленности. 2006. Вып. 4. С. 72–74.
4. **Павлюченков Н.Ф., Нефедов С.В.** Особенности использования дефектоскопа АД-64М для неразрушающего контроля воздушных винтов // Материалы 14-й Российской научно-технической конференции "Неразрушающий контроль и диагностика". – Москва, 1996. С. 502.
5. **Ланге Ю.В., Нефедов С.В.** Корреляционная обработка сигналов импедансных дефектоскопов // Контроль. Диагностика. 1998. № 1. С. 26–32.
6. **Ланге Ю.В., Воропаев С.И., Мужичкий В.Ф., Нефедов С.В.** Спектры импульсных сигналов преобразователей низкочастотных акустических дефектоскопов // Дефектоскопия. 1995. № 12. С. 9–19.
7. **Ланге Ю.В., Воропаев С.И., Мужичкий В.Ф., Ермолаев А.П., Нефедов С.В.** Новые низкочастотные акустические дефектоскопы для неразрушающего контроля многослойных конструкций // Материалы 14-й Российской научно-технической конференции "Неразрушающий контроль и диагностика". – Москва, 1996. С. 86.
8. **Ланге Ю.В., Мужичкий В.Ф., Нефедов С.В.** Компьютеризированный акустический дефектоскоп для контроля многослойных конструкций // Контроль. Диагностика. 1998. № 6. С. 18–22.
9. **Кретов Е.Ф.** Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. – Радиоавионика, 1995. С. 317. ISBN: 5-88877-001-9.
10. **Dneprovski V.G., Karapetyan G.Ya., Zorin O.A.** Determination of Defects in Metal by Fourier Transformation of Surface Acoustic Waves Frequency Characteristics. – Abstracts & Schedule, 2014, International Symp. on Physics and Mechanics of New Materials and Underwater Applications (PHENMA 2014), Khon Kaen, Thailand, March 27–29, 2014. P. 33–34. URL: <http://phenma2014.math.sfedu.ru> (Дата обращения 26.02.2015).
11. **Днепровский В.Г., Карапетьян Г.Я., Зорин Д.А.** Исследование состояния поверхности подложек из сапфира с помощью поверхностных акустических волн // Труды XVII Международной конференции "Современные проблемы механики сплошной среды" 14–17 окт. 2014. – Ростов-на-Дону, 2014. Т. 1. С. 161–165.
12. **Белянин А.Ф., Гуляев Ю.В., Самойлович М.И., Багдасарян А.С.** Оборудование для формирования пленок алмаза и алмазоподобных материалов для акустоэлектроники // Наука и технологии в промышленности. 2006. № 4. С. 19.
13. **Багдасарян А.С., Багдасарян С.А., Бутенко В.В., Карапетьян Г.Я.** Радиочастотные метки на ПАВ. Особенности конструкции и технологии // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2012. № 7 (121). С. 76–82.
14. **Багдасарян А.С., Багдасарян С.А., Гуляев Ю.В., Карапетьян Г.Я.** Датчик дистанционного контроля физической величины на поверхностных акустических волнах. Патент на изобретение RUS 229695003.09.2004.
15. **Бутенко В.В., Багдасарян С.А., Семенов Р.В., Николаева С.О.** Принципы построения системы радиочастотной идентификации на основе ПАВ-технологий с повышенной дальностью действия // Радиотехника. 2013. № 3. С. 37–41.
16. **Багдасарян С., Днепровский В., Карапетьян Г., Нефедова Н., Сеницына Т.** ПАВ-датчик дистанционного контроля физических величин // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2008. № 1. С. 46–51.
17. **Багдасарян С.А., Николаева С.О., Подшивалова Г.В., Семенов Р.В.** Оценка дальности действия систем радиочастотной идентификации в условиях природных и техногенных катастроф // Теория и техника радиосвязи. 2012. № 4. С. 11–16.
18. **Багдасарян А.С., Днепровский В.Г., Карапетьян Г.Я., Богданов М.И., Багдасарян С.А.** Пассивный датчик давления на поверхностных акустических волнах // Инженерный вестник Дона (электронный научный сетевой журнал). 2012. Т. 22. № 4–1. URL: <http://www.ivdon.ru/> (дата обращения 25.01.2014).
19. **Гуляев Ю.В., Багдасарян А.С.** Фильтры на ПАВ. Состояние и перспективы развития // Радиотехника. 2003. № 8. С. 15.
20. **Bagdasarian A.S., Bagdasaryan S.A., Dneprovski V.G., Karapetyan G.Y.** To issue on development of piezoelectric devices on surface acoustic waves // В кн.: Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications. – New York: Nova Science Publishers, 2012. P. 189–238.
21. **Официальный сайт компании ООО "Контроль. Изменение. Диагностика"** URL: <http://www.defectoscop.ru> (дата обращения 25.01.2015).
22. **Официальный сайт компании ООО "Планар"** URL: <http://www.planar.chel.ru/> (дата обращения 25.01.2015).