

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

© 2019 г. В.В. Казаков^{1,*}

¹ФИЦ Институт прикладной физики РАН, Россия 603950 Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46
E-mail: *kazak@appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 02.07.2018; после доработки 09.11.2018;
принята к публикации 13.12.2018

Предложен метод контроля акустического контакта наклонного ультразвукового преобразователя, основанный на измерении амплитуды и фазы сигнала ультразвуковой волны, принятой дополнительным преобразователем от рабочей поверхности акустической призмы. Приведены характерные осциллограммы изменения сигнала качества акустического контакта в зависимости от изменения площади контакта.

Ключевые слова: ультразвуковая дефектоскопия, контроль акустического контакта, ультразвуковой наклонный преобразователь.

DOI:10.1134/S0130308219030011

ВВЕДЕНИЕ

Достоверность измерений, проводимых при ультразвуковой диагностике материалов и конструкций, в значительной степени определяется состоянием акустического контакта между преобразователем и поверхностью исследуемого объекта. Причины его нарушения разнообразны — от изменения шероховатости и кривизны поверхности изделия и призмы преобразователя — до изменения угла установки преобразователя и неравномерного вытеснения акустической смазки. Знание состояния качества акустического контакта в текущий момент времени позволяет дефектоскописту экономить время на проведение измерений, поскольку в случае сомнений отсутствует необходимость дополнительного перемещения или притирки преобразователя к поверхности с целью подтверждения значений получаемых уровней отражений от дефектов. Это приводит к повышению производительности измерений и их достоверности.

Актуальность задачи контроля акустического контакта привела к созданию разнообразных методов определения его качества, основанных на: периодическом измерении силы тока через преобразователь во время излучения ультразвуковых импульсов [1]; измерении электрического импеданса преобразователя от его механической нагрузки [2]; измерении амплитуды донного эхосигнала вспомогательной продольной волны при рабочей поперечной [3—5] или амплитуды структурных ревербераций и шумов преобразователя за пределами зоны контроля [6, 7]; регистрации амплитуды сигнала, отраженного от рабочей поверхности призмы под первым [8] или вторым [9] критическими углами, а так же трансформации отраженных продольных волн в поперечные [10]; использовании схем излучения и приема, основанных на пересечении диаграмм направленности для двух [11] или трех пьезоэлементов [12]. В качестве информативного сигнала качества контакта в этих методах используется только изменение амплитуды сигнала ультразвуковой волны. В то же время известно, что использование для анализа изменение фазы отражения волны позволяет получить дополнительную информацию, в частности — определить, когда площадь контакта больше 50 % [13].

Цель данной работы — разработка простого в исполнении и наглядного в представлении результата измерения метода контроля качества акустического контакта за счет использования для анализа как амплитуды, так и фазы отражения продольной волны от рабочей поверхности призмы наклонного преобразователя.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Для контроля качества акустического контакта разработаны следующая конструкция ультразвукового преобразователя и метод его измерений (рис. 1). К основному ультразвуковому преобразователю, состоящему из пьезоэлемента 1 с демпфером и акустической призмы 2 с углом ввода α добавлен волновод 3, выполненный с призмой 2 из одной заготовки. К его торцу приклеен дополнительный пьезоэлемент 4 с демпфером. Сечения пьезоэлементов 1, 4 и волновода 3 выбираются одинаковыми, а углы ввода ультразвуковой волны основным и дополнительным пьезоэлементами

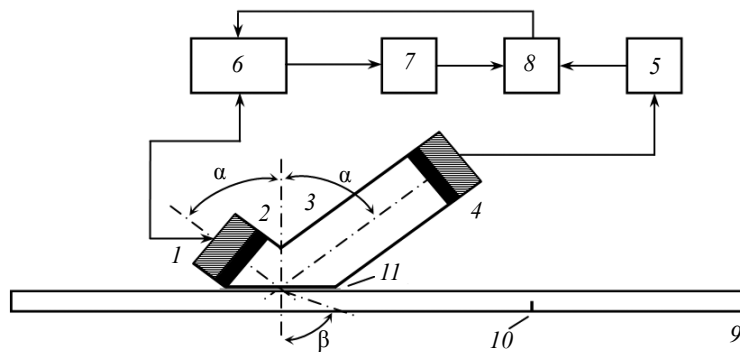


Рис. 1. Функциональная схема установки для проведения измерений.

равны. Длина волновода выбирается такой, чтобы разделить по времени импульс, излучаемый пьезоэлементом 1, от импульса, принятого пьезоэлементом 4. Импульс продольной ультразвуковой волны частоты f излучается пьезоэлементом 1 с углом ввода α и преобразуется в поперечную, излучаемую под углом β , которая используется для обнаружения дефектов. Зеркально отраженный от основания призмы импульс продольной волны распространяется в волноводе 4 и используется для создания сигнала качества акустического контакта путем измерения его амплитуды и разности фаз по отношению к импульсу возбуждения. Для этого сигнал с пьезоэлемента 4 через усилитель 5 и сигнал непрерывного генератора дефектоскопа 6 через регулируемый фазовращатель 7 подаются на фазовый детектор 8. На его выходе сигнал качества акустического контакта $U_a(t)$ формируется в интервале времени, соответствующим положению импульса отражения от поверхности призмы, задержанного в волноводе на время распространения t_0 . Современные цифровые технологии позволяют представить на дисплее информацию о состоянии акустического контакта самым различным образом, например, объединив сигнал $U_a(t)$ с сигналом $U_d(t)$ ультразвуковой волны, принятой пьезоэлементом 1, при условии его размещения в начале координат (область «мертвой зоны»), чтобы он не мешал анализу сигнала $U_d(t)$, но был в зоне наблюдения дефектоскописта. Так же можно усреднить сигнал $U_a(t)$ во временных рамках принятого импульса и представить его значение цифрой или столбиками в начале или конце используемой временной развертки.

Рассмотрим процесс формирования сигнала качества более подробно. Делаются следующие основные допущения. В волноводе импульс отраженной от поверхности призмы ультразвуковой волны имеет лучевой характер распространения. Суммарный импульс можно представить в виде суперпозиции нескольких импульсов, отраженных от границ с двумя сильно различающимися импедансами, соответствующим отражениям от поверхности изделия (контакт есть) и от воздушной прослойки (контакта нет). Вид импульсов совпадает (он определяется импульсом излучения), но они отличаются по амплитуде и фазе на 180° . Как известно [14], фаза отраженной акустической волны в сравнении с падающей меняет знак на противоположный при переходе из среды более жесткой (в данном случае — оргстекло) в среду существенно более мягкую (воздух), а при переходе из более мягкой (оргстекло) в более жесткую (металл) сохраняет его.

Для простейшего случая, когда имеются только две области отражения, суммарный сигнал, принятый преобразователем 4, можно записать как

$$U_s(t) = (U_1(t) - U_2(t)) \sin(2\pi f t),$$

где $U_1(t)$, $U_2(t)$ — огибающие импульсов сигналов, отраженных от поверхности изделия и воздушной прослойки, задержанные на время t_0 распространения в волноводе. После его перемножения с опорным сигналом $U_0 \sin(2\pi f t + \varphi_0)$, где U_0 — амплитуда сигнала частоты f с выхода задающего непрерывного генератора дефектоскопа, φ_0 — устанавливаемый сдвиг фаз (0 или 180°) и подавления составляющих сигнала выше частоты f , сигнал на выходе фазового детектора будет иметь вид:

$$U_f(t) = 0,5 U_0 (U_1(t) - U_2(t)) \cos(\varphi_0).$$

Отсюда следует, что если выбрано $\varphi_0 = 0^\circ$ и площадь акустического контакта менее 50 % ($U_2(t) > U_1(t)$), то сигнал качества контакта $U_a(t)$ будет отрицательным и иметь минимальную амплитуду, если $U_2(t) = U_1(t)$ (контакт 50 %) — то он равен нулю, а при $U_1(t) > U_2(t)$ — он положи-

тельный и имеет максимальную амплитуду. Важным моментом является то, что 50-процентная площадь контакта устанавливается автоматически из-за равенства сигналов и метод не требует какой-либо дополнительной градуировки для установления этого факта. Минимальное значение сигнала, соответствующее отсутствию контакта, также визуально контролируется очень просто — достаточно разъединить датчик с поверхностью объекта.

Для демонстрации работы созданного метода была собрана установка, в которой в качестве объекта исследования использовалась металлическая пластина 9, имеющая размеры $305 \times 50 \times 6$ мм с изготовленной одиночной трещиной 10 [15]. Было выбрано: расстояние от разработанной конструкции преобразователя до трещины — 120 мм, длина волновода 3—70 мм, сечение волновода — 12×20 мм, $\alpha = 45^\circ$, $\varphi_0 = 0^\circ$. Импульс возбуждения преобразователя оригинального ультразвукового дефектоскопа 7 имел четыре периода частоты $f = 2,6$ МГц, амплитуду 20 В и частоту повторения 159 Гц. Сигнал с выхода дефектоскопа $U_d(t)$ после амплитудного детектирования и сигнал с выхода фазового детектора через двухканальную плату аналого-цифрового преобразователя ADM214×60M (Инструментальные системы) с частотой дискретизации 15 МГц записывались в компьютер. Для акустического контакта использовалась густая смазка 11 типа солидол. Удаление ее с части рабочей поверхности призмы перед установкой преобразователя и визуальный контроль ее площади через боковую поверхность преобразователя позволяли качественно устанавливать площадь контакта от 0 до 100 % с шагом 25 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 2 приведены осциллограммы сигнала на выходе дефектоскопа и сигнала с выхода фазового детектора (сигнал качества $U_a(t)$ выделен линией) в зависимости от изменения площади S акустического контакта от 0 до 100 %. При отсутствии акустической смазки сигнал $U_a(t)$ — отрицательный и имеет минимальное значение амплитуды, при этом отраженный от трещины сигнал $U_d(t)$ отсутствует, а при 100 % — $U_a(t)$ имеет положительный знак и максимальную амплитуду. Соответственно увеличению S увеличивается и сигнал $U_d(t)$, отраженный от трещины (см. рис. 2а). Поскольку одноименные сигналы $U_a(t)$ и $U_d(t)$ для различных площадей контакта хорошо отличаются друг от друга, то можно говорить о высокой чувствительности предлагаемого метода к площади изменения контакта. Когда значение S близко к 50 %, изменение амплитуды сигнала $U_a(t)$ во временных границах принятого ультразвукового импульса близко к нулю и имеет различную полярность. Такой характер изменения может быть объяснен особенностями принятых допущений о лучевом характере распространения волн и отражении от поверхностей с различным значением импеданса. Из рис. 2а так же видно, что в сигнале $U_d(t)$ в районе 53—63 мкс присутствует сигнал отражения от преобразователя 4. Поскольку его местоположение на временной оси не изменяется, его наличие при анализе сигнала $U_d(t)$ в выбранном временном окне следует учитывать, или, в случае необходимости, изменить его положение путем изменения длины волновода. В частности, можно установить такую задержку t_0 , чтобы указанный импульс оказался за пределами окна анализа.

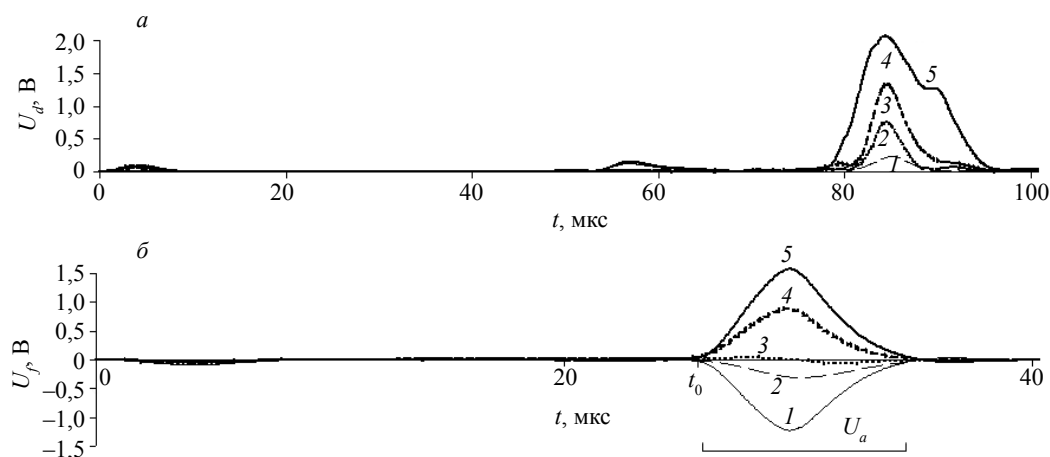


Рис. 2. Изменение сигналов на выходе дефектоскопа (а) и фазового детектора (б) в зависимости от площади контакта: 1—0, 2—25, 3—50, 4—75, 5—100 %.

ВЫВОДЫ

Использование информации об амплитуде и фазе отражения ультразвукового импульса от рабочей поверхности призмы ультразвукового преобразователя позволяет создать новый метод контроля качества акустического контакта, отличающийся наглядностью представления получаемой информации. Вывод в реальном времени на дисплей дефектоскопа информации одновременно об отражении ультразвуковой волны от дефектов и о текущем состоянии акустического контакта позволяет повысить производительность измерений и достоверность результатов дефектоскопии.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект № 0035-2014-0008).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладиллин А.В. Контроль акустического контакта пьезоэлектрических излучателей ультразвука с объектом воздействия // Эл. журн.: Сделано в России. 2000. С. 943—947. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2000/065.pdf>
2. Гревцов А.В., Осипов Л.В., Сазонов В.Н., Шейман В.Л., Щигель-Ермолов В.Р. Способ контроля степени акустического контакта / Патент РФ № 2022548. Оpubл. 15.11.1994.
3. Алешин Н.П., Белый В.Е., Вopilкин А.Х. и др. Методы акустического контроля металлов. М.: Машиностроение, 1989. С. 185—186.
4. Марков А.А., Федоренко Д.В., Кузнецова Е.А. Использование программ отображения дефектограмм при оценке качества контроля рельсов / Сб. трудов «Радиоэлектронные комплексы многоцелевого направления». С.-Петербург, 2006. С. 79—85.
5. Гурвич А.К., Дымкин Г.Я., Коряченко В.Д., Фак И.И., Цомук С.Р. О формировании опорного сигнала при оценке состояния акустического контакта // Дефектоскопия. 1981. № 3. С. 107—109.
6. Тарабрин В.Ф., Одынец С.А., Бобров В.Т., Зайцев С.А., Кисляковский О.Н. Способ ультразвуковой дефектоскопии изделий и устройство для его реализации / Патент РФ № 2270998. Оpubл. 27.02.2006. Бюл. № 6.
7. Гусаров В.Р., Мокроусов А.С., Терешин С.Н., Шершов А.В. Способ и устройство контроля качества акустического контакта при ультразвуковой дефектоскопии / Патент РФ № 2523781. Оpubл. 20.07.2014. Бюл. № 20.
8. Жмуркин Ю.А., Круглов Б.А. Способ контроля качества акустического контакта при ультразвуковой дефектоскопии / Патент РФ № 1310710. Оpubл. 15.05.1987.
9. Пестунович Е.А., Бушуев И.Ю. Раздельно-совмещенный преобразователь для ультразвукового контроля / Патент РФ № 1405494. Оpubл. 10.06.1996.
10. Дымкин Г.Я., Миронов Ф.С., Рождественский С.А., Эттинген И.З. Способ контроля качества акустического контакта при ультразвуковой дефектоскопии / Патент РФ № 2506585. Оpubл. 10.02.2014. Бюл. № 4.
11. Казинцев В.А., Лукичева С.В. Способ и устройство контроля жидких сред с сигнализацией наличия акустического контакта между излучателем и приемником ультразвуковых колебаний и поверхностями стенок резервуара / Патент РФ № 2378624. Оpubл. 10.01.2010. Бюл. № 1.
12. Щербаков О.Н., Петров А.Е., Полевой А.Г., Анненков А.С., Васенев Ю.Г. Ультразвуковой преобразователь / Патент РФ № 2158920. Оpubл. 10.11.2000.
13. Миронов Ф.С., Марков А.А., Молотков С.Л. Способ контроля качества акустического контакта при ультразвуковой дефектоскопии / Патент РФ № 2141653. Оpubл. 20.11.1999.
14. Лепендин Л.Ф. Акустика. Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1978. С. 181—183.
15. Казаков В.В. Модуляционный способ обнаружения трещин. II. Программный метод реализации // Дефектоскопия. 2006. № 12. С. 3—11.