

УДК 620.179.162; 534.5

Measurement of small thicknesses by ultrasonic method

Измерение малых толщин ультразвуковым методом

V. V. Astanin¹, A. A. Rogozhkin²
В. В. Астанин¹, А. А. Рогожкин²

¹ Ufa State Aviation Technical University, Marx Str. 12, Ufa, 450008, Russia

² Technopark of Aviation Technologies, Tramvaynaya Str. 5, building 1, Ufa, 450027, Russia

¹ vvastanin@yandex.ru

¹ Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, 450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12

² Технопарк авиационных технологий, Россия, 450027, Уфа, ул. Трамвайная, 5, корп. 1

¹ vvastanin@yandex.ru

ABSTRACT

The method of using ultrasonic devices beyond their passport capabilities is considered. The method is intended for measuring small thicknesses of thin-walled metal structures used in aviation and other equipment. This includes products of cellular or cellular construction: heat exchangers, hollow fan blades, metal pads for protecting parts made of composite materials. Existing methods for solving such problems require special equipment or complex mathematical analysis. The proposed method is based on the analysis of distortion of the shape of the ultrasonic signal by comparison with test samples. Distortion occurs as a result of a phase shift between the forward and reflected signals or as a result of modulation of the signal by vibrations of a thin wall. In particular, an example of measuring the thickness of thin-walled titanium alloy parts from 0.4 to 0.9 mm with an accuracy of 0.05...0.02 mm is shown. The measurement was performed using a serial ultrasonic thickness gauge at a frequency of 5 MHz. The proposed method can be useful when working out the technology of manufacturing thin-walled parts.

KEYWORDS

Ultrasound; thickness measurement; vibrations.

АННОТАЦИЯ

Рассмотрен метод использования ультразвуковых приборов за пределами их паспортных возможностей. Метод предназначен для измерения малых толщин тонкостенных металлических конструкций, применяемых в авиационной и другой технике. Сюда относятся изделия сотовой или ячеистой конструкции: теплообменники, полые лопасти вентилятора, металлические накладки для защиты деталей из композиционных материалов. Существующие методы для решения подобных задач требуют специального оборудования, либо сложного математического анализа. Предлагаемый метод основан на анализе искажений формы ультразвукового сигнала путем сравнения с тест-образцами. Искажение возникает в результате сдвига фаз между прямым и отраженным сигналом, либо в результате модуляции сигнала колебаниями тонкой стенки. В частности, показан пример измерения толщины тонкостенных деталей из титанового сплава от 0,4 до 0,9 мм с точностью 0,05...0,02 мм. Измерение выполнено с помощью серийного ультразвукового толщиномера на частоте 5 МГц. Предлагаемый метод может быть полезен при отработке технологии изготовления тонкостенных деталей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Ультразвук; толщинометрия; колебания.

Введение

В современном авиационном двигателестроении все более востребованы тонкостенные (0,3...0,9 мм) изделия сотовой или ячеистой конструкции: теплообменники, полые лопасти вентилятора, металлические накладки для защиты деталей из композиционных материалов [1-5]. Такие изделия нуждаются в неразрушающем контроле толщины, в част-

ности, при отработке технологических процессов.

Измерение малых толщин наиболее универсальным ультразвуковым импульсным эхо-методом представляет некоторые трудности, особенно для материалов с высокой скоростью распространения ультразвука. Здесь важно четкое разделение прямого и отраженного сигналов по времени [6, 7], что стано-

вится невозможным, если время прохождения сигнала соизмеримо или меньше периода самого сигнала. Так, в случае титановых сплавов при скорости распространения порядка 6000 м/с и рабочей частоте 5 МГц минимально измеряемая толщина составляет 2...2,5 мм. Можно использовать рабочие частоты 15 МГц и выше, но этого не достаточно для измерения малых толщин. Ведутся разработки мегазвуковых сендвичевых преобразователей [8]. Резонансный метод позволяет измерять толщину от минимального значения. При повышении частоты до 30 МГц можно измерять толщины стальных изделий, начиная с 0,1 мм [9]. Разрабатываются специальные методы и оборудование для измерения малых толщин [10–16]. Однако, либо эти методы находятся на стадии разработки, либо для их реализации требуются специальные приборы ограниченного распространения, приобретение которых для выполнения опытно-технологических работ не всегда оправдано. То же можно сказать о методах частотной модуляции сигнала, либо фазовом методе, основанном на измерении сдвига фаз прямого и отраженного сигналов [17–19].

В данной статье предлагается простой практический метод измерения малых толщин с использованием приборов широкого применения.

1. Физические основы метода

Предлагаемый метод основан на том, что в объектах малой толщины возникают характерные искажения формы ульт-

развукового сигнала на экране монитора. Можно назвать две причины искажений, зависящие от толщины объекта: сдвиг фаз прямого и отраженного сигналов и колебания тонкой стенки под действием зондирующего импульса [19]. В последнем случае возникает частотная модуляция сигналов. Наложение сигналов двух последовательных отражений происходит с задержкой на двойное время пробега сигнала по толщине объекта контроля. В этом случае на осциллограмме сигнала появляется характерный скачок (рис. 1), положение которого зависит от толщины объекта контроля.

Другой вариант искажения сигнала связан с возникновением собственных колебаний тонкой стенки под воздействием зондирующего импульса. Эти колебания вызывают частотную модуляцию отраженного сигнала, обусловленную эффектом Доплера [18, 19]. При этом, частота колебаний стенки зависит от ее толщины. При сложении колебаний разной частоты возникают биения с частотой, равной разности частот исходных сигналов. На рис. 2 показано наложение двух сигналов с разными частотами при условии задержки второго сигнала. Частота второго сигнала, как и время его задержки, зависят от толщины стенки и вызывают характерные искажения формы волны. Математическое моделирование выполнено путем сложения нескольких периодических экспоненциально затухающих функций с учетом типичной скорости нарастания амплитуды ультразвукового сигнала.

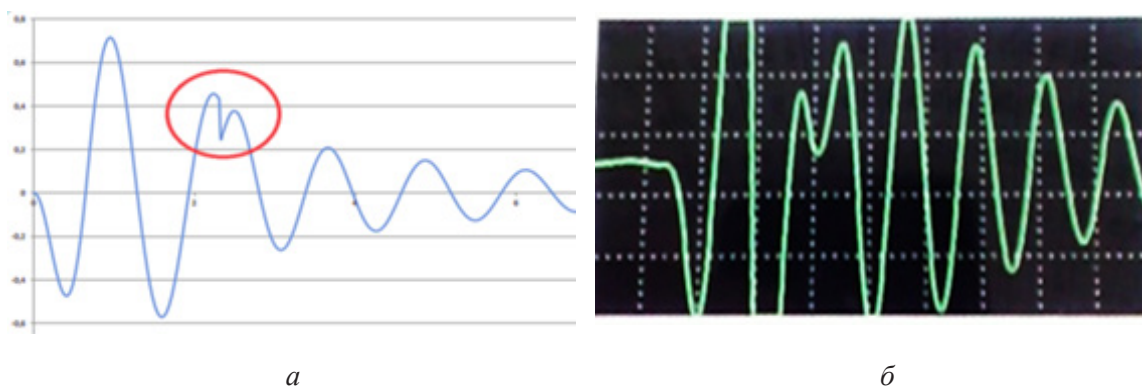


Рис. 1. Искажение сигнала при сдвиге фаз прямого и отраженного сигналов, полученное путем моделирования (а) и снятое с экрана монитора (б)

Fig. 1. Signal distortion during phase shift of the forward and reflected signals, obtained by modeling (a) and taken from the monitor screen (b)

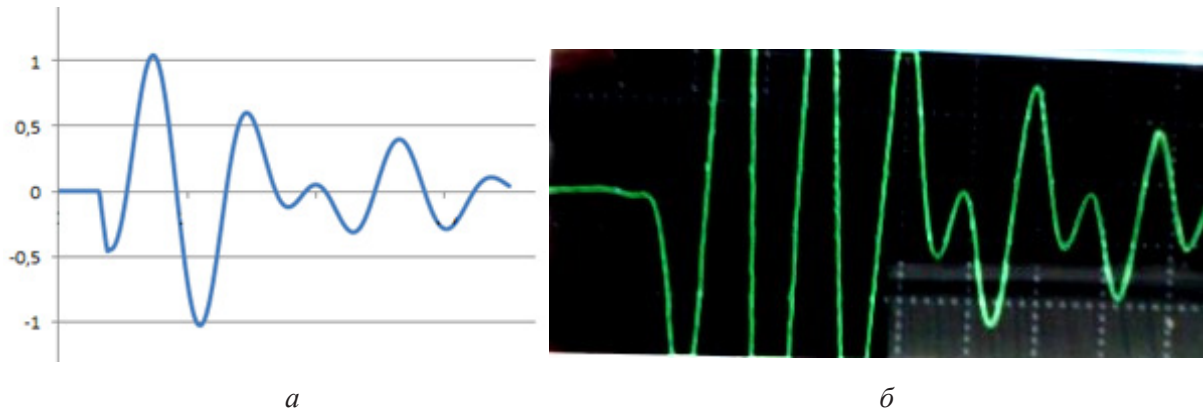


Рис. 2. Искажение сигнала при наложении двух отражений с разными частотами:
а – моделирование; б – реальный сигнал

Fig. 2. Signal distortion when two reflections with different frequencies are superimposed:
a – simulation; б – real signal

Точный расчет искажения формы колебаний представляет собой сложную многофакторную задачу с применением уравнений теории упругости [20]. Существуют примеры использования приемов спектроскопии [21], а также применение кепстр-метода [22, 23]. Но все это требует высокой квалификации персонала и его специальной подготовки. Для практических целей больше подходит методика сравнения с эталоном.

2. Пример использования

Из материала предполагаемого изделия изготавливается ступенчатый образец с требуемым шагом измерения, например, через 0,05 мм. Желательно, чтобы технология обработки образца соответствовала технологии изделия. Снятые с образца формы осциллограмм систематизируют в виде таблицы. Оператор, сопоставляя форму осциллограмм, полученных с изделия, с данными в таблице, определяет толщину изделия.

Для реализации метода были изготовлены образцы из титанового сплава ВТ-6 с набором толщин от 0,3 до 1,0 мм с шагом 0,05 мм. Скорость звука в исследуемом материале порядка 6000 м/с. Был использован ультразвуковой толщиномер Olympus 38DL PLUS с преобразователем прямого типа, оснащенным

линией задержки. Рабочая частота 5 МГц. Измерения проводили в режиме № 3 (эхо-эхо). Минимально измеряемая (паспортная) толщина 2 мм.

Пример части контрольной таблицы приведен на рис. 3. Здесь видно, что изменение толщины объекта контроля на 0,05 мм вызывает вполне заметные изменения формы волны. Многократные измерения показали высокую повторяемость полученных результатов не только на образцах, но и на реальных изделиях после их контрольной разрезки.

Шаг измерения 0,05 мм обычно достаточно для большинства практических целей, но точность измерения по этой методике можно довести до 0,02 мм после приобретения некоторого навыка работы.

Вывод

Фазовый сдвиг и частотная модуляция ультразвукового сигнала в объектах малой толщины вызывает характерные искажения формы результирующей кривой, зависящие от толщины объекта контроля. Полученный эффект можно использовать для контроля малых толщин, лежащих за пределами паспортного диапазона измерений имеющейся системы.

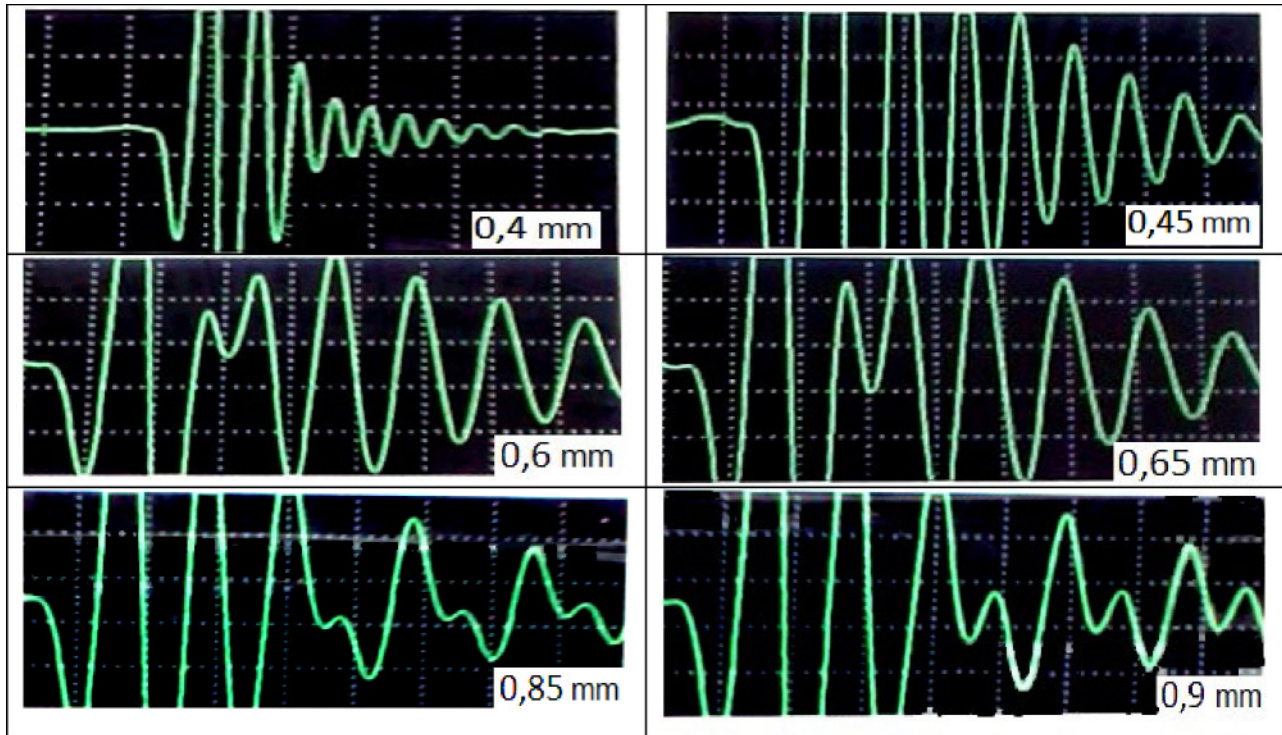


Рис. 3. Примеры формы сигналов для различной толщины объекта контроля

Fig. 3. Examples of waveforms for different thicknesses of the control object

Список литературы

1. Bratukhin A. G., Ivanov Yu. L., Mavrin B. N. Modern technologies of aircraft construction. Moscow: Mashinostroenie, 1999. P. 832.
2. Paik J. K., Thayamballi A. K., Kim G. S. The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels // *Thin-Walled Structures*. 1999. V. 35. P. 205–231.
3. Wadley H. N. G., Fleck N. A., Evans A. G. Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures // *Composites Science and Technology*. 2003. V. 63, No. 16. P. 2331–2343.
4. Bigdeli A., Damghani Nouri M. A Crushing Analysis and Multi-objective Optimization of Thin-walled Five-cell Structures // *Thin-Walled Structures*. 2019. V. 137. P. 1–18. DOI:10.1016/j.tws.2018.12.033.
5. Корниенко А. Н., Жадкевич А. М. Разработка и применение паяных решетчатых и сотовых конструкций в авиационной технике (Ретроспективный обзор) // *Автоматическая сварка*. 2005. № 12. С. 18–25.
6. ГОСТ Р ИСО 16809-2015. Контроль неразрушающий. Контроль ультразвуковой. Измерение толщины. Введ. 03.01.2016. М.: Стандартинформ, 2015. 36 с.
7. Highly accurate adaptive TOF determination method for ultrasonic thickness measurement / L. Zhou et al. // *Measurement Science and Technology*. 2018. V. 29, No. 4. 045002. DOI:10.1088/1361-6501/aa9acf.
8. Lin S. and Tian H. Study on the sandwich piezoelectric ceramic ultrasonic transducer in thickness vibration // *Smart Mater. Struct.* 2008. V. 17, No. 1. P. 1–9. DOI: 10.1088/0964-1726/17/01/015034.
9. Кретов Е. Ф. Ультразвуковая толщинометрия в машиностроении. // *В мире НК*. 2008. № 2 (40). С. 26–30.
10. A Hybrid Approach for Measurement Thickness of Complex Structural Parts using Ultrasonic Inspection and On-machine Probing / Z. Zhao et al. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. No. 103. P. 4777–4785.
11. Ultrasonic metal sheet thickness measurement without prior wave speed calibration / S. Dixon et al. // *IOP Publishing Ltd Journal of Physics D: Applied Physics*. 2013. V. 46, No. 44. P. 1–5. DOI:10.1088/0022-3727/46/44/445502.
12. Reddyhoff T., Dwyer-Joyce R., Harper P. Ultrasonic measurement of film thickness in mechanical seals // *Sealing Technology*.

2006. Iss. 7. P. 7–11. DOI: 10.1016/S1350-4789(06)71260-0.

13. Dobbs E. R. Electromagnetic generation of ultrasonic waves // *Physical Acoustics: Principles and Methods*, vol. 10. New York: Academic, 1973. P. 127–189.

14. Lee J. K., Kwon J. O., Kim Y. H. Simultaneous Measurement of Ultrasonic Velocity and Thickness of Isotropic and Homogeneous Solids Using Two Transducers // *Society for Nondestructive Testing*. 1999. V. 19(5). P. 363–368.

15. Пронин В. В. Новые технологии ультразвуковой толщинометрии: от линейного сканирования до многосхемных методов цифровой фокусировки антенной решетки // *ДИАГНОСТИКА*. 2017. № 3. С. 28–33. URL: <https://tng.elpub.ru/jour/article/download/465/466/>

16. Measuring the thickness of an object using an ultrasonic thickness gauge. URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/34/mateconf_ifcae-iot_2018_03029.pdf.

17. Grebennik V. S. Physical bases of ultrasonic methods of thickness measurement. Moscow: Mashinostroenie, 1968. P. 40.

18. Krautkramer J., Krautkramer H. *Ultrasonic Testing of Materials*. Third Revised Edition. New York: Springer-Verlag, 1983. P. 527.

19. Ermolov I. N., Lange Yu. V. Non-destructive testing. Handbook in 7 v. / V. V. Klyev (ed.). Vol. 3. Ultrasonic control/ Moscow: Mashinostroenie, 2004. P. 864.

20. Landau L. D., Lifshits E. M. *Theory of Elasticity*. Oxford: Pergamon Press, 1986. P. 163.

21. Park I. G., Han E. K., Choi M. Y. Computer Simulation of Multiple Reflection Waves Nondestructive Testing // *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*. 1992. V. 12, No. 1. P. 9–15.

22. Han E. K., Lee J. J., Kim J. Y. A Study on the Thickness Measurement of Thin Film by Ultrasonic Wave // *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*. 1988. V. 7 (2). P. 27–34.

23. Thickness measurement by using cepstrum ultrasonic signal processing / Y. C. Choi et al. // *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*. 2014. V. 34, No. 4. P. 290–298.