

МЕТОД ЛОКАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА

С.Ю. Гуревич, Ю.В. Петров, Е.В. Голубев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

E-mail: gurevichsi@susu.ru

При возбуждении ультразвуковых (у.з.) волн Лэмба в тонких металлических пластинках и листах с помощью термоакустического излучателя диаметром от 3 мм и больше происходит изменение формы у.з. импульса. С увеличением диаметра первоначальный импульс начинает разделяться на два. Считается, что за счет градиента температуры источниками разделенных у.з. импульсов являются диаметрально противоположные края ТА-излучателя (термоакустического излучателя). Время отставания этих импульсов относительно друг друга определяется диаметром ТА-излучателя и скоростью распространения волн Лэмба. Этот факт можно использовать для локального измерения скорости волн, поскольку длина участка, на котором производится измерение, не превышает диаметра ТА-излучателя. На основании зависимости между скоростью у.з. волн Лэмба от толщины пластинки и частоты колебаний предложена методика экспериментального измерения толщины пластинки. Проведена оценка доверительных границ суммарных относительной и абсолютной погрешностей измерений. Для сравнения была проведена такая же оценка для случая измерения толщины образца с помощью микрометра. Сделан вывод о том, что если погрешность в измерении толщины металлических листов и пластинок допускается равной или более 5,0 %, то метод измерения с помощью у.з. волн, возбуждаемых оптическими наноимпульсами, можно успешно применять на производстве. Кроме того, этот метод является весьма перспективным при контроле толщины крупногабаритных тонких металлоизделий.

Ключевые слова: толщина металлоизделия; лазерное возбуждение; волны Лэмба; термо-акустический излучатель; ЭМА-приемник; дисперсионные кривые.

Введение

Одним из практических применений в ультразвуковой дефектоскопии волн Лэмба является измерение толщины тонких металлических изделий (пластин, листов, лент, оболочек и т. п.). Особенно актуален этот вопрос в случаях, когда изделия являются крупногабаритными, а также, когда измерения возможны только при одностороннем доступе к изделию [1–3].

Методика проведения исследований

Скорость распространения волн Лэмба в изделии определяется его толщиной и частотой акустических колебаний [3, 4]. Количественную связь между этими параметрами можно установить, если проанализировать дисперсионные кривые – зависимости групповых скоростей волн Лэмба от толщины изделия и частоты колебаний. В этом случае задача измерения толщины листовых металлоизделий сводится к экспериментальному измерению скорости волн Лэмба и частоты акустических колебаний в них. В работе [5] предложен способ локального измерения групповой скорости волн Лэмба, возбуждаемых термоакустическим излучателем (ТА-излучателем) с постоянной мощностью теплового излучения. Было установлено, что с увеличением диаметра ТА-излучателя форма возбуждаемого ультразвукового импульса изменяется, происходит его разделение на два импульса, причем источниками разделенных акустических импульсов являются противоположные края ТА-излучателя, где имеет место градиент температуры металла. Время отставания этих импульсов относительно друг друга определяется диаметром ТА-излучателя и скоростью распространения ультразвука. Тогда скорость волн Лэмба на участке изделия, длина которого не превышает диаметра ТА-излучателя (лазерного луча), можно рассчитать по формуле

$$v = S / \Delta t ,$$

где S – расстояние между краями ТА-излучателя (его диаметр), Δt – время прохождения ультразвуком этого расстояния.

В качестве примера определим по предложенной методике толщину шлифованной пластинки инварного сплава размерами $270 \times 60 \times 0,60$ мм. Толщина пластинки измерялась стандартным микрометром. На рис. 1 приведена экспериментальная осциллограмма у.з. импульса волны Лэмба. Диаметр ТА-излучателя 9,7 мм, средняя мощность теплового излучения $P = 2,8$ Вт. Регистрируются волны Лэмба широкополосным ЭМА-приемником [6].

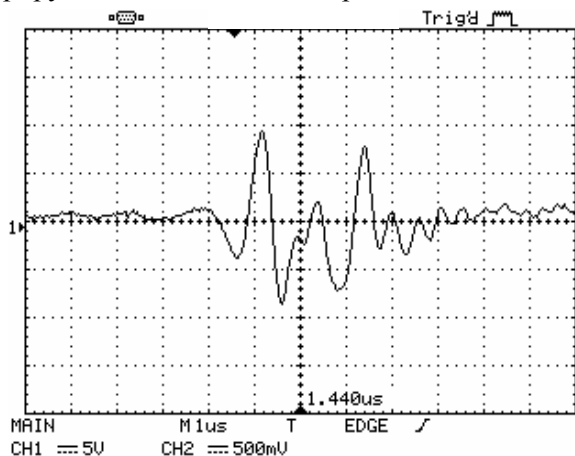


Рис. 1. Импульс у.з. волн Лэмба от ТА-излучателя диаметром 9,7 мм

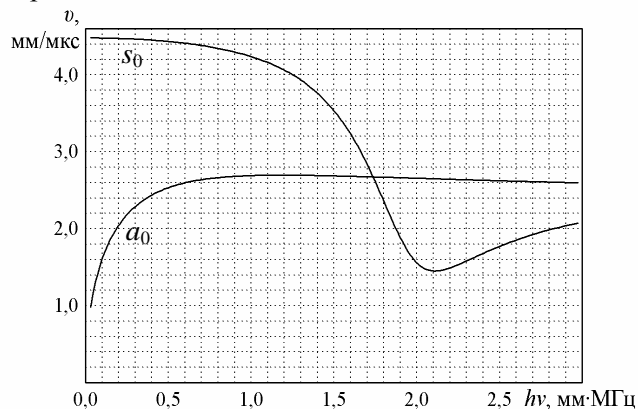


Рис. 2. График дисперсионных кривых групповых скоростей симметричных и антисимметричных волн Лэмба нулевой, первой и второй мод

Из осциллограммы следует, что среднее время $\langle \Delta t \rangle = 2,2$ мкс, средняя частота колебаний $\langle \nu \rangle = 0,85$ МГц. Тогда средняя групповая скорость у.з. волн Лэмба

$$\langle v \rangle = \frac{9,7}{2,2} = 4,41 \left(\frac{\text{мм}}{\text{мкс}} \right).$$

Расчеты зависимости групповых скоростей волн Лэмба от толщины пластинки и частоты (дисперсионные кривые) выполнялись по формулам, взятым из [3]. Скорости поперечных и продольных волн, входящие в эти формулы, были соответственно равны 2683 и 4878 мм/мкс [7]. Результаты расчетов симметричных и антисимметричных волн Лэмба трех низших номеров представлены в виде графика $v = f(h \cdot \nu)$ на рис. 2.

Из графика следует, что экспериментально измеренная групповая скорость соответствует симметричной волне Лэмба нулевой моды. Из точки дисперсионной кривой, соответствующей этой скорости, опускаем нормаль на ось $h\nu$ и находим численное значение параметра $k = h\nu = 0,53$ мм·МГц. После этого рассчитываем среднюю толщину пластинки

$$\langle h \rangle = \frac{0,53}{0,85} = 0,63 \text{ мм.}$$

Оценим погрешность полученного результата [8]. Расчетной формулой является выражение $h = k / \nu$. Считаем, что погрешность параметра k определяется погрешностью измерения скорости ν волн Лэмба. Систематическая относительная погрешность при косвенных многократных измерениях толщины пластинки определяется в основном максимальной погрешностью цифрового осциллографа и равна 1,4 %. Случайная относительная погрешность, которую рассчитываем с помощью доверительного интервала, составляет 4,2 %. Величина доверительной границы суммарной погрешности σ_h равна 4,4 %. В результате получаем:

$$h = 0,63 \pm 0,03 \text{ мм, } \sigma_h = 4,4 \% .$$

Определим толщину этой же пластины путем многократных прямых измерений стандартным микрометром. Систематическая погрешность прибора – 0,7 %. Случайная погрешность рассчитывается с помощью доверительного интервала и составляет 1,7 %. Величина доверительной границы суммарной погрешности σ_h^* равна 1,8 %. В результате получаем:

$$h^* = 0,60 \pm 0,01 \text{ мм, } \sigma_h^* = 1,8 \% .$$

Выводы

1. Используя зависимость скорости волн Лэмба от толщины изделия и частоты акустических колебаний, предложен метод измерения толщины тонких металлоизделий.

2. Скорость и частота колебаний определялись экспериментально при генерации волн Лэмба в тонких металлических изделиях с помощью лазерных импульсов наносекундной длительности. Длина участка изделия, на котором измерялась скорость, не превышает толщины лазерного луча.

3. Проведена оценка погрешностей измерения толщины. Если нижняя граница относительной погрешности допускается равной или больше 5 %, то предложенный метод измерения является весьма перспективным, особенно когда объекты контроля имеют значительные габариты и доступ к измерениям является односторонним.

Статья выполнена при поддержке Правительства РФ (Постановление № 211 от 16. 03. 2013 г.), соглашение № 02. АОЗ. 21. 0011.

Литература

1. Шрайбер, Д.С. Ультразвуковая дефектоскопия / Д.С. Шрайбер. – М.: Металлургия, 1965. – 361 с.

2. Ермолов, И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И.Н. Ермолов. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.

3. Викторов, И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Релея и Лэмба в технике / И.А. Викторов. – М.: Наука, 1966. – 168 с.

4. Бреховских, Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1973. – 343 с.

5. Петров, Ю.В. Метод локального измерения скорости волн Лэмба, возбуждаемых лазерными наноимпульсами / Ю.В. Петров, С.Ю. Гуревич // Сборник докладов международного форума «Сварка и диагностика». – Екатеринбург, 25–27 ноября 2014. – С. 296–301.

6. Петров, Ю.В. Оптико-термический излучатель и ЭМА-приемник ультразвуковых волн Лэмба / Ю.В. Петров, С.Ю. Гуревич, Е.В. Голубев // Дефектоскопия. – 2015. – № 5. – С. 17–24.

7. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1005 с.

8. Зайдель, А.Н. Ошибки измерений физических величин / А.Н. Зайдель. – Л.: Наука, 1986. – 108 с.

Поступила в редакцию 7 декабря 2017 г.

METHOD OF LOCAL MEASUREMENT OF THICKNESS OF THIN METAL PRODUCTS USING ULTRASOUND

S.Yu. Gurevich, Yu.V. Petrov, E.V. Golubev

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

E-mail: gurevichsi@susu.ru

During excitation of ultrasonic Lamb waves in thin metal plates and sheets using a thermoacoustic emitter with diameter of 3 mm and more, the shape of ultrasonic pulse changes. As the diameter increases the initial pulse starts dividing into two. It is believed that due to temperature gradient the opposite sides of the thermoacoustic emitter act as sources of the divided ultrasonic pulses. The time of retardation of these pulses from one another is defined by the diameter of the thermoacoustic emitter and the velocity of Lamb waves propagation. This fact may be used for local measurement of the wave velocity since the length of the section under measurement does not exceed the diameter of the thermoacoustic emitter. Based on the functional connection between the velocity of ultrasonic Lamb waves and the plate thickness and oscillation frequency a method was suggested on experimental measurement of plate thickness. Confidence boundaries of cumulative relative and absolute measurement errors were assessed. For comparison, a similar assessment was performed for a case of measuring a sample's thickness using a micrometer. A conclusion was made that if error in measuring thickness of metal sheets and plates is accepted as equal to or exceeding 5,0 %, then the method of measurement using ultrasonic waves excited by optical nano-pulses may be successfully used at production enterprises. Moreover, this method is quite promising while monitoring thickness of large-size thin metal products.

Keywords: thickness of metal products; laser excitation; ultrasonic Lamb waves; thermoacoustic emitter; EMAT-receiver; dispersion curves.

References

1. Shrayber D.S. *Ul'trazvukovaya defektoskopiya* (Ultrasonic defectoscopy). Moscow, Metallurgiya Publ., 1965, 392 p. (in Russ.).
2. Ermolov I.N. *Teoriya i praktika ul'trazvukovogo kontrolya* (Theory and practice of ultrasonic testing). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 240 p. (in Russ.).
3. Viktorov I.A. *Fizicheskie osnovy primeneniya ul'trazvukovykh voln Releya i Lemba v tekhnike* (Physical basis of application of ultrasonic waves of Rayleigh and Lamb in engineering). Moscow, Nauka Publ., 1966, 167 p. (in Russ.).
4. Brekhovskikh L.M. *Volny v sloistykh sredakh* (Waves in layered media). Moscow, Nauka Publ., 1973, 343 p. (in Russ.).
5. Petrov Yu.V., Gurevich S.Yu. Metod lokal'nogo izmereniya skorosti voln Lemba, vzbuzhdaemykh lazernymi nanoimpul'sami (The method of local measurement of the speed of Lamb waves excited by laser nanopulses). *Sbornik dokladov mezhdunarodnogo foruma "Svarka i diagnostika"* (Proc. of the International Forum "Welding and Diagnostics"), Ekaterinburg, November, 25–27, 2014, pp. 296–301. (in Russ.).
6. Petrov Y.V., Gurevich S.Y., Golubev E.V. A photothermal emitter and an EMA receiver of ultrasonic Lamb waves. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, Vol. 51, no. 5, pp. 272–279. DOI: 10.1134/s106183091505006x
7. Kikoin I.K. (ed.) *Tablitsy fizicheskikh velichin. Spravochnik* (Tables of physical quantities. Handbook). Moscow, Atomizdat Publ., 1976, 1005 p. (in Russ.).
8. Zaydel' A.N. *Oshibki izmereniy fizicheskikh velichin* (Physical Quantities Measurement Errors). Leningrad, Nauka Publ., 1986, 112 p. (in Russ.).

Received December 7, 2017