

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Предложены методики точного определения скорости поверхностных волн конструкционных материалов электромагнитно-акустическим способом. Методики подходят для образцов прямоугольной формы из ферромагнитных материалов, в частности для конструкционных сталей и сплавов. Показано, как скорости ультразвуковых волн в материале связаны с модулями упругости материала. Определение модулей упругости материала является важной задачей материаловедения. Наилучшим методом определения скорости поверхностных волн является метод электромагнитно-акустического преобразования, сочетающий в себе бесконтактность и быстроедействие. В качестве датчиков использованы проволочные меандровые преобразователи, которые могут работать в двух режимах: совмещенный режим (один датчик генерирует волну и принимает ее отражение) и раздельный режим (один датчик генерирует волну, другой ее принимает). Проанализированы основные погрешности метода. Показано, что основная погрешность связана с определением временного интервала распространения волны. Это связано с трудностью получения точки отсчета, так как зондирующий импульс имеет затухающую форму. Предложена отстройка от зондирующего импульса при определении временного интервала времени распространения волны. Другая погрешность измерений связана с точностью определения базы меандровых преобразователей (расстояние между центрами), работающих в раздельном режиме. Получены простые формулы для расчета скорости поверхностной волны, а также базы меандровых преобразователей. Проверка методик проводилась на образце Армо-железа. Точность определения поверхностной волны Рэлея составила $\pm 0,5\%$. Показано, что применение современных цифровых измерителей временных интервалов позволит получать точность $\pm 0,05\%$. Полученные с указанной точностью значения скорости можно использовать для определения модулей упругости, а также в качестве самостоятельного информационного параметра оценки упругих свойств материала, например анизотропии листового проката.

Ключевые слова: поверхностные акустические волны, волны Рэлея, ультразвук, скорость ультразвука, модули упругости, анизотропия, электромагнитно-акустический способ, ферромагнитные материалы, точность измерений.

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей металловедения является задача определения модулей упругости материала и их анизотропия. Прямое измерение этих параметров при механических испытаниях является достаточно трудоемкой задачей.

В последнее время все чаще для этих целей используют косвенные физические методы. Так хорошо себя зарекомендовали ультразвуковые (УЗ) методы оценки упругих свойств разных материалов [1-3]. Они основаны на простой корреляции упругих свойств и информационных параметров УЗ-методов и подходят как для металлов, так и для неметаллов [4]. Так, например, скорость продольной волны C_l связана с модулем Юнга E простым соотношением:

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где ρ – плотность материала, а скорость сдвиговой волны C_t связана с модулем сдвига G :

$$C_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}.$$

Более сложная зависимость для коэффициента Пуассона ν [5]:

$$\nu = \frac{C_R - 0,87C_t}{1,12C_t - C_R},$$

где C_R – скорость волны Рэлея.

Среди ультразвуковых методов электромагнитно-акустический (ЭМА) способ генерации и приема ультразвука имеет определенные преимущества перед методами, использующими пьезоэлементы, благодаря бесконтактности и быстроедействию [6]. Основными информационными параметрами ЭМА-способа являются амплитуда принятого сигнала и скорость распространения акустических волн. Нестабильность амплитуды принятого сигнала, несмотря на условную «бесконтактность», по сравнению со способом пьезоэлементов, не позволяет проводить точные измерения параметров материалов. На амплитуду влияют технологические факторы измерений, такие как температура образца, зазор между образцом и датчиком, а также параметры структуры, внешние и внутренние напряжения, полученные в процессе производства и эксплуатации [7, 8]. При измерении скорости ультразвуковых волн уровень амплитуды принятого сигнала не сказывается настолько сильно на результаты измерений, и точность измерения при современной цифровой обработке может быть достаточно высокой. Измерение

скорости продольных и поперечных волн и ЭМА-методом и методом пьезоэлементов, основанное на прозвучивании пластины известной толщины, описано достаточно подробно в справочнике [9]. Рассмотрим возможность измерения ЭМА-способом скорости поверхностных акустических волн (ПАВ) Рэлея.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Для генерации и приема поверхностных волн удобно использовать меандровые преобразователи [10-12]. Они могут быть выполнены как в проволочном, так и в пленочном исполнении. При наличии подмагничивающего поля такой преобразователь может генерировать поверхностную волну влево и вправо от себя. В зависимости от ориентации подмагничивающего поля и толщины образца можно генерировать волны разных типов: волны Рэлея, Лэмба, SH-волны и др. Импульсная методика ЭМА преобразования предполагает генерацию и прием волновых импульсов с высокочастотным заполнением, причем прием может вестись этим же самым меандровым преобразователем при отражении от края образца или вторым приемным меандром.

Простым вариантом образца из заданного материала для определения скорости УЗ-волн является прямоугольный параллелепипед. При генерации поверхностной волны Рэлея его толщина должна быть больше трех длин волн. Так, при генерации волны Рэлея частотой 3 МГц длина волны в сталях составляет около 1 мм, и толщина образца должна быть больше 3 мм, что вполне реально.

При определении скорости ПАВ одним меандровым преобразователем (рис. 1) имеем осциллограмму, представленную на рис. 2. Такой преобразователь работает в совмещенном режиме, то есть выполняет функции и генератора, и приемника.

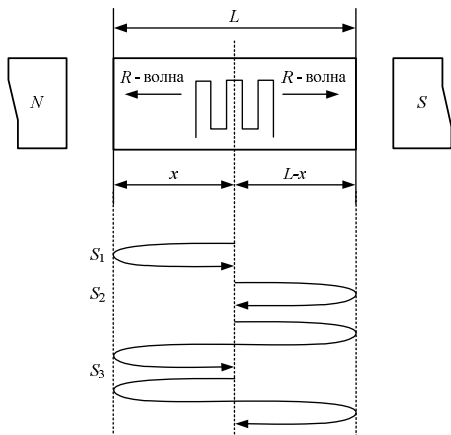


Рис. 1. ЭМА-преобразователь ПАВ в совмещенном режиме

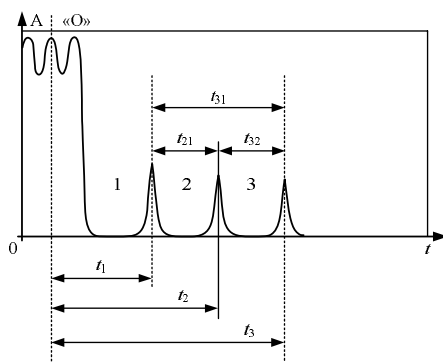


Рис. 2. Осциллограммы совмещенного датчика

На рисунке: 0 — означает зондирующий импульс; 1 — импульс, отраженный от левой грани, его путь S_1 ; 2 — импульс, отраженный от правой грани, его путь S_2 ; 3 — импульс, отраженный от двух граней, его путь S_3 .

АНАЛИЗ ОСЦИЛЛОГРАММ

Понятно, что пути S_3 влево и вправо одинаковые. Каждый из этих импульсов имеет четко выраженную вершину, по которой можно определить момент прихода импульса. Проблема заключается в том, какую точку осциллограммы взять за начало отсчета: начало зондирующего импульса (точка «О»), его конец или середину. Эта проблема актуальна и при измерении скорости продольных и поперечных волн. Эксперименты показали, что эта точка лежит где-то между началом зондирующего импульса и его серединой. Это происходит потому, что токовый зондирующий импульс имеет неправильную затухающую форму вследствие особенности используемого генератора ударного возбуждения. При этом она еще зависит от индуктивности системы «датчик-образец». Как избавиться от этого недостатка?

Если при полной длине образца L обозначить за x расстояние от левой грани до центра датчика (см. рис. 1), то

$$S_1 = 2x = C_R t_1;$$

$$S_2 = 2(L - x) = C_R t_2;$$

$$S_3 = 2L = C_R t_3.$$

Из этих уравнений получаем:

$$\Delta S_{21} = S_2 - S_1 = 2L - 4x = C_R t_{21}; \quad (1)$$

$$\Delta S_{31} = S_3 - S_1 = 2L - 2x = C_R t_{31}; \quad (2)$$

$$\Delta S_{32} = S_3 - S_2 = 2x = C_R t_{32}. \quad (3)$$

Таким образом, имеем простые соотношения:

$$t_1 = t_{32}, \quad t_2 = t_{31}. \quad (4)$$

Сложив (2) и (3), с учетом (4) получаем простые формулы для скорости рэлеевской волны:

$$C_R = \frac{2L}{t_{31} + t_{32}} = \frac{2L}{t_{21} + t_{32}}. \quad (5)$$

Как видно, эта формула не зависит от зондирующего импульса, и точность измерений зависит от точности измерения длины образца и временных расстояний между принятыми импульсами.

При использовании двух меандровых преобразователей, работающих в раздельном режиме (рис. 3), где один преобразователь генерирует УЗ-волны, а второй принимает, осциллограмма работы представлена на рис. 4.

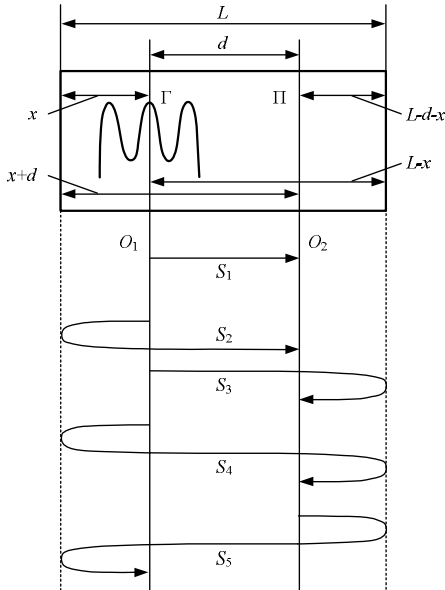


Рис. 3. ЭМА-преобразователь ПАВ в раздельном режиме

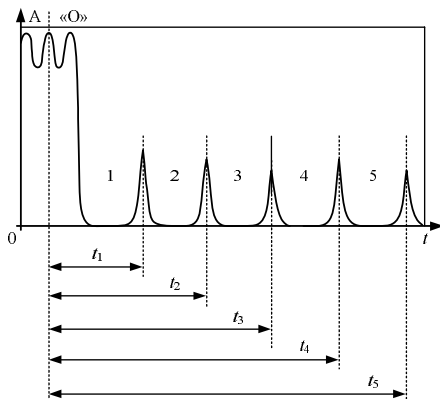


Рис. 4. Осциллограммы раздельного датчика

Пусть расстояние генераторного (левого) датчика до левой грани – x (см. рис. 3), а расстояние между центрами датчиков – d , тогда остальные расстояния понятны из рисунка. Также из рис. 3, 4 понятны пути прохождения первых пяти характерных принятых импульсов:

$$S_1 = d = C_R t_1;$$

$$S_2 = d + 2x = C_R t_2;$$

$$S_3 = 2L - 2x = C_R t_3;$$

$$S_4 = 2L - d = C_R t_4;$$

$$S_5 = 2L + d = C_R t_5.$$

Произведем математические преобразования, аналогичные (1-3), и получим простую формулу для определения скорости:

$$C_R = \frac{2L}{t_{51}}. \quad (6)$$

Заметим, что при известной скорости C_R можно получить формулу для точного определения базы такого преобразователя, расстояния между центрами меандровых преобразователей:

$$d = \frac{C_R t_{54}}{2}. \quad (7)$$

Часто эти датчики жестко фиксируются в единый преобразователь в электромагните, и измерить точно их базу бывает нелегко.

Нужно отметить также, что отстроиться от зондирующего импульса можно на цилиндрическом образце. В этом случае все времена между принятыми импульсами будут одинаковыми, и формула для определения скорости Рэлеяской волны достаточно простая:

$$C_R = \frac{2\pi R}{t}, \quad (8)$$

где R – радиус цилиндра; t – время между импульсами.

Но здесь надо заметить, что точные значения скорости ПАВ для плоскости и цилиндра совпадают только при большом диаметре цилиндра, то есть при большом соотношении диаметра цилиндра к длине поверхностной волны.

Оценим точность измерений по полученным формулам (5) и (6). Она будет определяться точностью измерения длины образца L и точностью измерения временных интервалов между принятыми импульсами.

Для оценки был взят образец Армко-железа в виде прямоугольного параллелепипеда длиной 80 мм и поперечными размерами 40 × 40 мм. Точность измерения длины микрометром составляет примерно 0,006 %. Таким образом, все определяет точность определения временных интервалов. При использовании цифрового измерителя DSO 2100 погрешность измерения в данном диапазоне составляет ±0,25 %. Полученная по методике одного преобразователя скорость волны Рэлея получилась:

$$C_R = (3038 \pm 15) \text{ м/с } (\pm 0,5 \%).$$

Современные цифровые приборы измеряют временные интервалы как минимум на порядок точнее (до $\pm 0,02\%$), что позволит измерять скорость поверхностной волны с точностью $\pm 0,05\%$. Это дает возможность повысить достоверность контроля процессов с небольшим изменением скорости поверхностных волн, как, например, анизотропия упругих свойств листового проката [13] или остаточные напряжения в рельсах [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные методики позволяют повысить точность измерения скорости поверхностных волн. Отработанные на рзеевских волнах, они подойдут и для других типов поверхностных волн, например волн Лэмба или SH-волн в ферромагнитных материалах. В первую очередь это нужно для дефектоскопии и структуроскопии изделий из сталей и сплавов, а также листового проката.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
2. Муравьев В.В. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996. 184 с.
3. Dixon S., Edwards C. and Palmer S.B. Texture measurements of metal sheets using wideband electromagnetic acoustic transducers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2002, vol. 35, no. 8, pp. 816-824.
4. Потапов А.И., Махов В.Е. Физические основы контроля упругих характеристик анизотропных композиционных материалов ультразвуковым методом // Дефектоскопия. 2017. № 11. С. 33-49.
5. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 288 с.
6. Комаров В.А. Квасистационарное электромагнитно-акустическое преобразование в металлах. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. 235 с.
7. Учет температуры и приложенных напряжений при неразрушающем контроле методом ЭМАП поверхностных волн / С.Э. Бабкин, В.В. Величко, М.А. Боровкова, Р.С. Ильясов, О.Н. Вострокнутова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. №3(15). С. 46-49.
8. Ильясов Р.С., Бабкин С.Э., Вострокнутова О.Н. Влияние одноосных и внутренних напряжений на электромагнитно-акустическое преобразование в ферромагнетиках // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. № 3 (39). С. 33-37.
9. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
10. Thompson R.B. Model for the Electromagnetic Generation and Detection of Rayleigh and Lamb Waves. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1973, vol. 20, no. 4, pp. 340-346.
11. Бабкин С.Э. Определение коэффициента Пуассона ферромагнитных материалов ЭМА-способом // Дефектоскопия. 2015. № 5. С. 51-55.
12. Murayama R. and Mizutani K. Conventional electromagnetic acoustic transducer development for optimum Lamb wave modes. *Ultrasonics*, 2002, vol. 40, no. 1-8, pp. 491-495.
13. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Волкова Л.В. Влияние анизотропии механических свойств тонколистового стального проката на информативные параметры волн Лэмба // Сталь. 2016. № 10. С. 75-79.
14. Муравьев В.В., Тапков К.А., Ленюков С.В. К вопросу контроля остаточных напряжений в дифференцированно-термоупрочненных рельсах // Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 3-9.

Поступила в редакцию 15 января 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MEASUREMENT OF SURFACE WAVES VELOCITY OF FERROMAGNETIC MATERIALS BY THE ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC METHOD

Sergey E. Babkin

Ph.D. (Physics and Mathematics), Research worker, the Laboratory of electromagnetic phenomena, Udmurt Federal Research Center of Ural Branch of RAS, Izhevsk, Russia.

Marina Yu. Lebedeva

Ph.D. (Physics and Mathematics), Research worker, the Laboratory of electromagnetic phenomena, Udmurt Federal Research Center of Ural Branch of RAS, Izhevsk, Russia.

Yuriy I. Savchenko

Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Department of Physics, Institute of Natural Science and Standardization, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sav@magtu.ru.

Olga N. Vostroknutova

Assistant Professor, the Department of physics, Institute of Natural Science and Standardization Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Methods for the exact determination of the surface waves velocity by the electromagnetic-acoustic method are proposed. The method is suitable for rectangular samples of ferromagnetic materials, in particular for structural steels. The velocities of ultrasonic waves in the material are shown to be related to the elastic moduli of the material. The determination of the elastic modulus values of the material is an important materials science problem. The best method for the determination of the speed of surface waves is that of electromagnetic-acoustic conversion,

which combines both non-contact measurement and quick operation. Wire meander transducers are used as sensors, which can operate in two modes: a combined mode (one sensor generates a wave and receives its reflection) and a separate mode (one sensor generates a wave while the other one receives it). The main inaccuracies of the method have been analyzed. The main inaccuracy has been shown to be associated with the determination of the time interval of the wave propagation. This is due to the difficulty of obtaining the reference point since the

probe pulse has a damped shape. A detuning from the probe pulse in determining the time interval of the wave propagation has been proposed. Another measurement inaccuracy is related to the accuracy of determining the base of the meander transducers (the distance between the centers) operating in separate mode. Simple formulas for calculating the surface wave velocity and the base of the meander transducers have been obtained. Technique testing was carried out using the sample of Armco iron. The accuracy of determining the surface Rayleigh wave was $\pm 0.5\%$. It has been shown that the use of modern digital detectors of time interval will allow one to obtain the accuracy of $\pm 0.05\%$. The velocity values obtained with the specified accuracy can be used to determine the elastic moduli as well as to assess the elastic properties of the material, for example, sheet metal anisotropy as an independent information parameter.

Keywords: surface acoustic waves, Rayleigh waves, ultrasound, ultrasonic velocity, elastic moduli, anisotropy, electromagnetic-acoustic method, ferromagnetic materials, accuracy of measurements.

REFERENCES

1. Zolotarevskij V.S. *Mekhanicheskie svoystva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow, Metallurgy Publ., 1983. 352 p. (In Russian)
2. Muraviev V.V. *Skorost zvuka i struktura stalej i splavov* [The speed of sound and the structure of steel and alloys]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1996. 184 p. (In Russian)
3. Dixon S., Edwards C. and Palmer S.B. Texture measurements of metal sheets using wideband electromagnetic acoustic transducers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2002, vol. 35, no. 8, pp. 816-824.
4. Potapov A.I., Makhov V.E. Physical basics of evaluating elastic characteristics of anisotropic composites by the ultrasonic method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, no. 11, pp. 785-799.
5. Viktorov I.A. *Zvukovye poverkhnostnye volny v tverdykh telakh* [Sound surface waves in solids]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 288 p. (In Russian)
6. Komarov V.A. Kvazistatsionarnoe elektromagnitno-akusticheskoe preobrazovanie v metallah [Quasistationary electromagnetic acoustic conversion in metals]. Sverdlovsk, USC of the USSR Academy of Sciences Publ., 1986. 235 p. (In Russian)
7. Babkin S.E., Velichko V.V., Borovkova M.A., Ilyasov R.S., Vostroknutova O.N. Consideration of temperature and applied stresses with non-destructive testing by surface wave EMAT method. *Vestnik Magnitorskogo gosudarstvennogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2006, no. 3 (15), pp. 46-49. (In Russian)
8. Ilyasov R.S., Babkin S.E., Vostroknutova O.N. Influence of uniaxial and internal stresses on the electromagnetic-acoustic conversion in ferromagnets. *Vestnik Magnitorskogo gosudarstvennogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, no. 3(39), pp. 33-37. (In Russian)
9. Nerazrushayushchij kontrol i diagnostika: spravochnik pod red. V.V. Klyueva [Non-destructive testing and diagnostics: reference book, under the editorship of V.V. Klyuev]. Moscow, Machine building Publ., 2003. 656 p. (In Russian)
10. Thompson R.B. Model for the Electromagnetic Generation and Detection of Rayleigh and Lamb Waves. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1973, vol. 20, no. 4, pp. 340-346.
11. Babkin S.E. The determination of the Poisson ratio for ferromagnetic materials using the EMA method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 303-307.
12. Murayama R. and Mizutani K. Conventional electromagnetic acoustic transducer development for optimum Lamb wave modes. *Ultrasonics*, 2002, vol. 40, no. 1-8, pp. 491-495.
13. Muraviev V.V., Muravieva O.V., Volkova L.V. Influence of the mechanical anisotropy of thin steel sheets on the parameters of Lamb waves. *Steel in Translation*, 2016, vol. 46, no. 10, pp. 752-756.
14. Muraviev V.V., Tapkov K.A., Lenkov S.V. On the Question of Monitoring Residual Stresses in Selectively Heat-Strengthened Rails. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, vol. 54, no. 10, pp. 675-681.

Измерение скорости поверхностных волн ферромагнитных материалов электромагнитно-акустическим способом / С.Э. Бабкин, М.Ю. Лебедева, Ю.И. Савченко, О.Н. Вострокнутава // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 4(45). С. 47-51. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-47-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-47-51)

Babkin S.E., Lebedeva M.Yu., Savchenko Yu.I., Vostroknutova O.N. Measurement of Surface Waves Velocity of Ferromagnetic Materials by the Electromagnetic-Acoustic Method. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 47-51. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-47-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-47-51)