

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ОСНОВНЫХ ТИПОВ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В МЕТАЛЛАХ ПРИСТАВНЫМ ДАТЧИКОМ

© 2020 г. С.Э. Бабкин^{1,*}

¹ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН», Россия 426000 Ижевск, ул. Кирова, 132
E-mail: babkin.s.e@mail.ru

Поступила в редакцию 03.02.2020; после доработки 02.03.2020

Принята к публикации 03.03.2020

Предложен метод использования приставного датчика поверхностных волн на основе электромагнитно-акустических меандровых преобразователей для определения скоростей поверхностных, продольных и поперечных волн в металлах. Метод применим на образцах с плоскопараллельными границами при одностороннем доступе к изделию. Все три скорости определяются за одну установку датчика на поверхность образца. Решены проблемы точного измерения пути распространения и временного отсчета принятых импульсов. Показано на примерах, что точность определения скоростей звука может быть не хуже 0,5 %.

Ключевые слова: поверхностные волны Рэлея, поперечные и продольные волны, электромагнитно-акустический преобразователь, скорость звука, точность измерений.

DOI: 10.31857/S0130308220040041

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковые методы — одни из самых распространенных методов неразрушающего контроля металлов. Одним из важных информационных параметров ультразвуковых методов является скорость звука. Скорость звука используется, с одной стороны, для целей дефектоскопии, когда изменяется при прохождении в дефектном образце [1, 2], и, с другой стороны, для решения задач структуроскопии, таких как определение упругих модулей, параметров напряженно-деформированного состояния и анизотропии различных свойств материала [3—5].

Скорость звука в металле можно определять с высокой точностью при использовании резонансных методов, но при одностороннем доступе к изделию точное определение скорости звука имеет ряд трудностей [1, 6].

Основным методом генерации и приема ультразвука в металлах является метод, использующий пьезоэлементы [7]. Однако проблема контакта является для него постоянным мешающим фактором. Метод электромагнитно-акустической (ЭМА) генерации и приема ультразвуковых колебаний в металлах благодаря бесконтактности имеет некоторые преимущества перед традиционным методом пьезоэлементов, оперирует теми же методическими приемами ультразвукового контроля, но и привносит свою новизну [8, 9].

Как и в других твердых телах, в металлах имеются три основных типа звуковых волн — продольные, поперечные и поверхностные (волны Рэлея). Они распространяются с разными скоростями. Как для пьезоэлементов, так и для методов ЭМА-преобразования эти скорости определяются в разных экспериментах, использующих разные преобразователи-датчики. В данной работе предлагается определять скорости всех трех основных волн одним приставным датчиком на основе ЭМА-метода за одну установку на поверхность образца с точностью не хуже 0,5 %.

1. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ВОЛН РЭЛЕЯ

Традиционный метод измерения поверхностных волн Рэлея заключается в следующем. На поверхность образца устанавливаются два преобразователя — один генерирует поверхностную волну, другой — ее принимает (рис. 1) [1, 10]. В случае ЭМА-преобразования преобразователями являются одинаковые решетки, выполненные из провода или напыленные в виде меандра, с системой подмагничивания, в случае пьезоэлементов преобразователи могут выполняться, например, в виде гребенки [7]. Расстояние между центрами преобразователей обозначим за d . Если считать, что волна распространяется от центра одного преобразователя до центра другого, то скорость волны Рэлея определяется формулой $C_R = d/t_R$, где t_R — время распространения волны Рэлея.

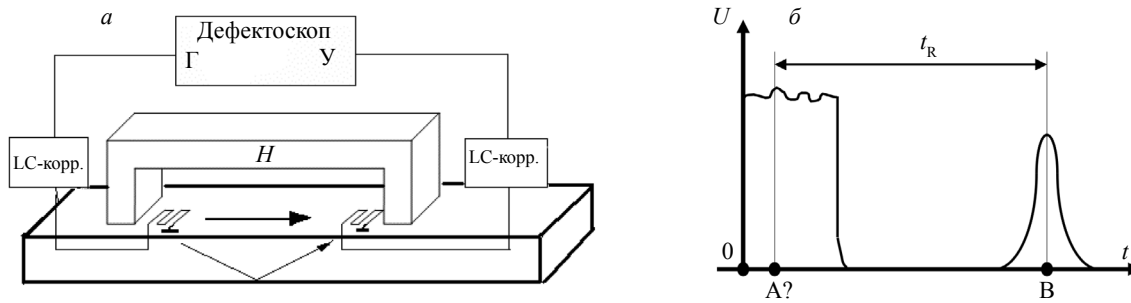


Рис.1. Датчик волн Рэлея на поверхности образца (а) и его осциллограмма (б).

Из этой формулы понятны две проблемы точного определения скорости: определение расстояния d и определение времени t_R , соответствующее указанному расстоянию.

Определить расстояние d можно штангенциркулем (между геометрическими серединами преобразователей или от начала генерирующего преобразователя до начала приемного). Точность измерения $\pm 0,05$ мм, что при обычной величине базы 50 мм дает относительную погрешность $\pm 0,1$ %. Реально будет хуже из-за ручной установки штангенциркуля. Также погрешности изготовления и намотки датчика (датчик может быть многвитковым) приводят к тому, что реальный «центр тяжести» датчика может не совпадать с геометрическим. Практика показывает, что, таким образом, погрешность измерения может составлять 0,5 мм. Это дает относительную погрешность около 1 %, что уже слишком много.

Вторая проблема — это корректное определение временного интервала t_R , соответствующее распространению волны между центрами преобразователей. Генерирующий преобразователь формирует на поверхности образца колоколообразный импульс смещений поверхностной волны, который распространяется в обе стороны от преобразователя. Импульс, движущийся в сторону приемного преобразователя, наводит в нем колоколообразный приемный сигнал. Вершину этого импульса можно взять за конец отсчета временного интервала распространения волны между центрами преобразователей (на рис. 1б на всех осциллограммах приведены огибающие детектированных импульсов). А вот где брать точку начала отсчета временного интервала, соответствующего расстоянию d (т. А), неясно. Погрешности, вызванные неточным определением начала и конца временного интервала, можно значительно сократить, если измерять временной интервал между импульсами отраженных волн по следующим методикам.

Предлагается измерять скорость рэлеевской волны на образце в форме прямоугольного параллелепипеда. При этом толщина образца не важна, главное, чтобы она была больше $3\lambda_R$ (λ_R — длина волны Рэлея, соответствующая периоду меандра). Для реальных датчиков λ_R составляет ≈ 1 мм (для датчиков 2 МГц) и 2 мм (для датчиков 1 МГц). Это дает толщину образца более 6 мм, что вполне реально.

Тогда скорость рэлеевской волны можно измерять в двух режимах.

1. Измерение одним преобразователем в совмещенном режиме (рис. 2). В этом случае датчик-преобразователь устанавливается на поверхность образца параллельно краю (этого добиваются по максимуму принятого сигнала). Волна генерируется датчиком в обе стороны, отражается от краев и принимается тем же датчиком. Осциллограмма показана на рис. 2б: 0 — зондирующий импульс, 1 — импульс от ближнего края, 2 — импульс от дальнего края, 3 — импульс двойного отражения.

Если при полной длине образца L обозначить за x расстояние от левой грани образца до центра датчика, то путь каждого импульса:

$$S_1 = 2x = C_R t_1,$$

$$S_2 = 2L - 2x = C_R t_2,$$

$$S_3 = 2L = C_R t_3,$$

где t_1, t_2, t_3 — время, отсчитываемое от «центра тяжести» зондирующего импульса по осциллограмме измерения (т. А).

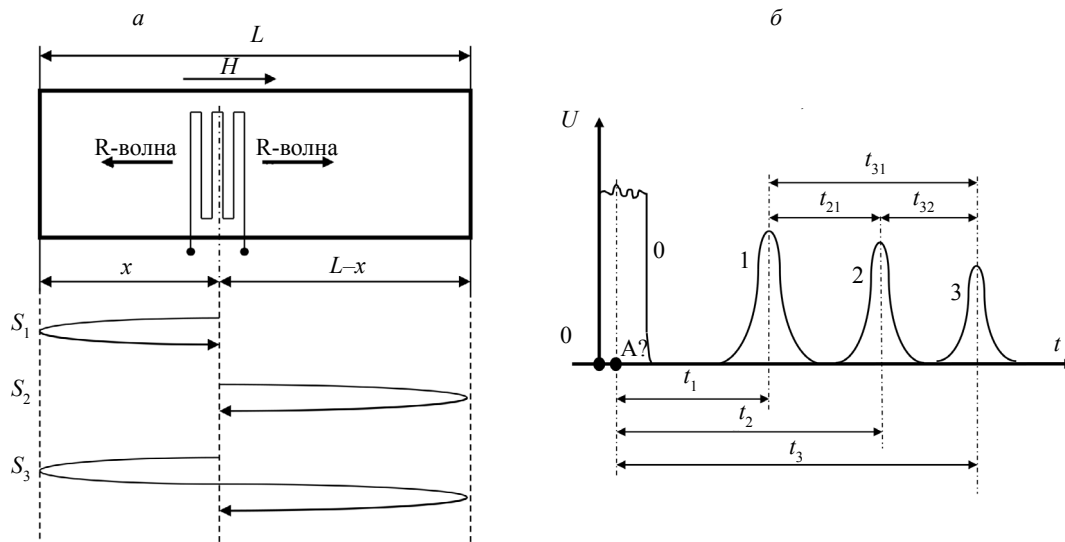


Рис. 2. Меандровый ЭМА-преобразователь в совмещенном режиме (а) и его осциллограмма (б).

Из этих уравнений получаем:

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

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

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

где t_{21} , t_{31} , t_{32} — соответствующие временные интервалы (см. рис. 2б).

Отсюда получаем простые соотношения:

$$t_1 = t_{32}, \quad t_2 = t_{31}, \quad t_{21} + t_{32} = t_{31}. \quad (4)$$

Из этих формул методом обратного отсчета легко можно определить точку А — центр тяжести зондирующего импульса.

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

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

2. Измерение двумя преобразователями в раздельном режиме. Меандровые преобразователи устанавливаются параллельно друг другу и краям образца (по максимуму сигнала). Пусть расстояние генераторного (левого) преобразователя до левой грани — x , а расстояние между центрами преобразователей — d , тогда остальные расстояния понятны из рисунка (рис. 3). Также из рисунка понятны пути прохождения первых пяти характерных принятых импульсов, показанных на осциллограмме (рис. 3б):

$$S_1 = d = c_R t_1,$$

$$S_2 = d + 2x = c_R t_2,$$

$$S_3 = 2L - 2x - d = c_R t_3,$$

$$S_4 = 2L - d = c_R t_4,$$

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

Проведем простые математические преобразования, аналогичные (1)—(4), и получим простую формулу для определения скорости:

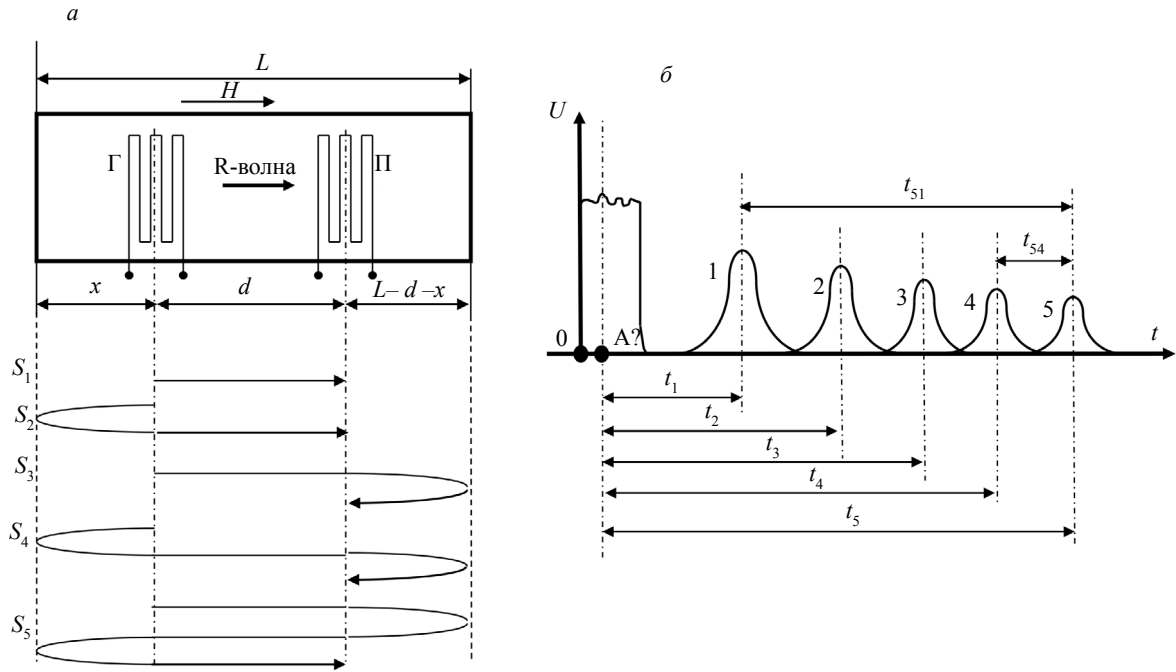


Рис. 3. Меандровые ЭМА-преобразователи в раздельном режиме (а) и их осциллограмма (б).

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

Отметим, что формулы (5), (6) не зависят от расположения «центра тяжести» зондирующего импульса, а точность измерений зависит от точности измерения длины образца и временных расстояний между принятыми импульсами.

Заметим, что при известной скорости C_R , можно получить формулу для определения d такого датчика:

$$d = \frac{C_R t_{54}}{2}.$$

2. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ОБЪЕМНЫХ ВОЛН

С помощью приставного датчика, состоящего из двух меандровых ЭМА-преобразователей, работающих в раздельном режиме, можно измерить не только скорость поверхностной волны Рэлея, но и скорости объемных волн — продольной и поперечной. Это возможно в образце с плоскопараллельными границами.

Для этого ЭМА-преобразователи и намагничивающая система фиксируются в единую конструкцию (см. рис. 1). При генерации волны Рэлея частота заполнения токового импульса должна соответствовать частоте поверхностной волны $f_\Gamma = f_R = C_R/\lambda_R$. Этого добиваются с помощью подстроечных элементов. При такой частоте будет синхронизация волновых колебаний вдоль поверхности, что обеспечит эффективную генерацию и прием импульсов поверхностной волны [11]. Каждый токовый элемент генерирующей решетки генерирует вокруг себя, помимо поверхностной, еще две объемные цилиндрические волны — продольную волну (со скоростью C_l) и поперечную волну (C_t), идущие вглубь образца [12]. Однако при частоте f_R ни по какому направлению синхронизация этих волн невозможна. Это поясняет рис. 4. Чтобы в некотором направлении АВ была синхронизация колебаний, должно выполняться условие (например, для поперечной волны):

$$k_R = k_t \cos \alpha, \quad k_t = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f_t}{C_t}, \quad k_R = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f_R}{C_R},$$

где k_R, k_t — модули волнового вектора поверхностной и поперечной волны.

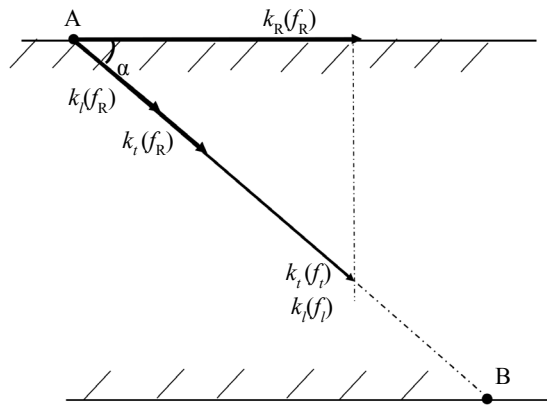


Рис. 4. Расположение волновых векторов поверхностной, поперечной и продольной волн в образце.

Из рисунка понятно, что при частоте f_R это невозможно, так как $C_R < C_l$.

При увеличении частоты генерации мы увеличиваем вектор k , при некоторой частоте f_l по направлению АВ будет выполняться условие синхронизации для поперечной волны, и эта волна будет эффективно распространяться в этом направлении. Если точка В — середина проекции отрезка АС на нижнюю грань (рис. 5а), то при плоскопараллельных границах образца эта волна отразится от нижней грани в точке В и попадет в точку С (приемная меандровая ЭМА-катушка). В этом случае при известных толщине образца H и расстоянии d легко вычислить скорость поперечной волны [12]:

$$C_t = \frac{2\sqrt{H^2 + d^2/4}}{t_t},$$

где t_t — время прохождения поперечной волны от центра генерирующего преобразователя до центра приемного.

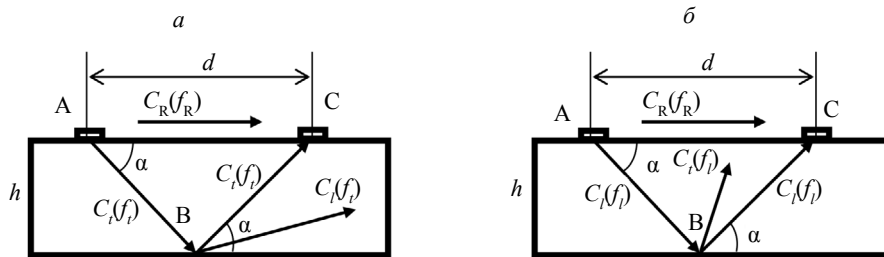


Рис. 5. Распространение волн внутри образца: поперечная волна (а), продольная волна (б).

При дальнейшем увеличении частоты мы увеличиваем волновой вектор продольной волны и при некоторой частоте f_l получаем условие ее синхронизации в направлении АВ: $k_R = k_l(f_l) \cos \alpha$ (рис. 5б).

Для этого случая

$$C_l = \frac{2\sqrt{H^2 + d^2/4}}{t_l},$$

где t_l — время прохождения продольной волны.

На рис. 5а показано, что при отражении поперечной волны от нижней грани образца в точке В формируются две волны: продольная и поперечная, но первая волна уходит в сторону, не создавая помехи при приеме второй волны. Рис. 5б поясняет, что при отражении в точке В продольной волны, когда также возникают две волны, поперечная волна идет мимо приемника (С), не мешая продольной.

При известной толщине образца и расстоянии d датчика основную трудность метода составляют идентификация принятого осциллографом дефектоскопа сигнала и измерение времени его распространения. На рис. 6 показан общий случай экрана осциллографа для всех трех волн, но реально эти импульсы появляются на экране по очереди при перестройке частоты.

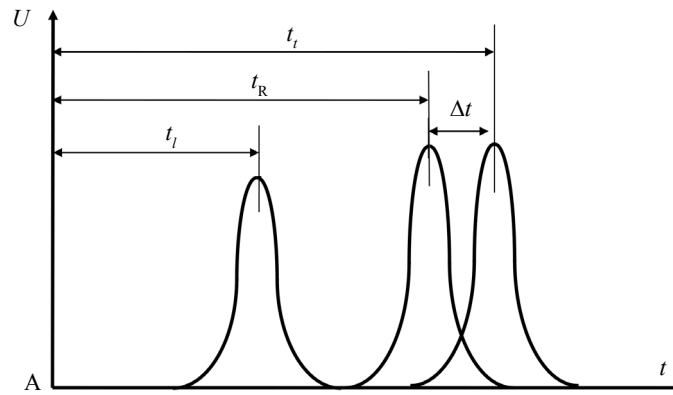


Рис. 6. Импульсы трех волн на одной осциллограмме.

В [12] показано, как можно просто рассчитать случай совпадения импульсов R-волны и t -волны. Это неблагоприятный случай, при котором при перестройке частоты с f_R до f_t принятый импульс R-волны будет уменьшаться, и на этом же месте “вырастет” импульс t -волны. Желательно, чтобы между ними был временной промежуток Δt , так легче наблюдать, идентифицировать и измерять два импульса. Идентификация волн подробно описана в [12]. При перестройке частоты на продольную волну неблагоприятный случай совмещения импульсов получить гораздо труднее из-за высокой скорости этой волны ($2C_R \approx C_t$).

Рассчитаем благоприятное соотношение между d преобразователя и толщиной образца, при котором удобно наблюдать и измерять принятые импульсы. Обозначим временной интервал между вершинами принятых импульсов рэлеевской и поперечной волн за Δt (рис. 6), тогда время распространения поперечной волны:

$$t_t = \frac{2\sqrt{H^2 + d^2 / 4}}{C_t},$$

где C_t — скорость волны, H — толщина образца.

Условие различимости импульсов $t_t = t_R + \Delta t$:

$$\frac{2\sqrt{H^2 + d^2 / 4}}{C_t} = d / C_R + \Delta t.$$

Отсюда легко переходим к квадратному уравнению относительно d :

$$d^2(A^2 - 1) + 2ABd + B^2 - 4H^2 = 0,$$

где $A = C_t / C_R$, $B = C_t \Delta t$ — параметры эксперимента.

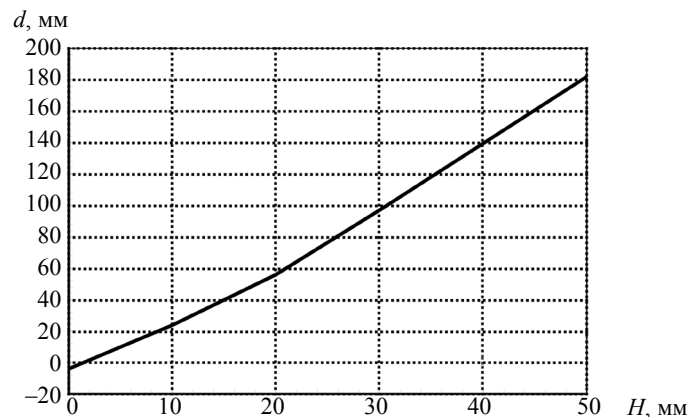


Рис. 7. График зависимости оптимальной базы датчика от толщины образца.

Подставляя в это уравнение ориентировочные значения скоростей материала из справочников, а также принимая значение $\Delta t = 2 \text{ } \mu\text{S}$ (для надежности измерений, хотя возможно значение $1 \text{ } \mu\text{S}$), получаем численное уравнение, которое удобно решать с помощью программы MATCAD. Результатом расчетов является график зависимости $d = f(H)$, по которой для конкретной толщины материала можно определить примерное расстояние между преобразователями, либо при фиксированном d датчика определить желательную толщину образца.

На рис. 7 представлены рассчитанные таким образом кривые для стального листового проката ($C_t = 3300 \text{ м/с}$, $C_R = 3000 \text{ м/с}$). Так для толщины проката 15 мм оптимальной является база 40 мм.

Аналогичные графики легко получить для любого материала с известным ориентировочно значением скоростей звука.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для примера определим скорость звуковых волн для двух материалов: армко-железа и никеля. Был изготовлен приставной датчик с двумя отдельными ЭМА-преобразователями в виде меандровых решеток и П-образной системой подмагничивания (см. рис. 1). Расстояние между центрами преобразователей было выставлено на уровне 40 мм, более точно измерялось по методике раздела 1 и составило 39,32 мм. Шаг меандровых решеток $\lambda_m = 2 \text{ мм}$ задавал длину волны Рэлея.

В качестве образцов были взяты пластина армко-железа толщиной $H = 15 \text{ мм}$ и пластина никеля толщиной $H = 12 \text{ мм}$, продольные размеры значительно больше размеров датчика. Инженерный расчет [7] показывает, что в неблагоприятную зону совмещения импульсов рэлеевской и поперечной волн оба образца не попадают. Таким образом, мы можем за одну установку датчика на поверхность образца определить все три основные скорости.

Подстраивая частоту для каждого типа волны, получаем сигнал в приемном преобразователе, настраиваем его на максимум. По приведенной методике определяем положение точки А (начало правильного отсчета временных интервалов) на временной шкале. Время ОА оказалось равным 0,71 мкс для обоих образцов. Это объясняется примерно одинаковыми размерами образцов и одинаковым индуктивным влиянием их на колебательный контур меандровых ЭМА-катушек. Более массивные образцы сильнее изменили бы индуктивность контуров и форму токового сигнала. С помощью цифрового осциллографа DSO 2100 измеряем времена распространения каждой волны t_R , t_P , t_I и производим расчет (данные заносим в табл. 1).

Таблица 1

Параметр	Армко-железо	Никель
$d = S_R = S_{AC}$	39,32 мм	39,32 мм
$S_t = S_l = S_{ABC}$	49,44 мм	46,06 мм
H	15,01 мм	12,03 мм
$\cos \alpha$	0,8	0,86
f_R	$\approx 1,5 \text{ МГц}$	$\approx 1,33 \text{ МГц}$
f_t	$\approx 2,0 \text{ МГц}$	$\approx 1,7 \text{ МГц}$
f_l	$\approx 3,6 \text{ МГц}$	$\approx 2,8 \text{ МГц}$
t_R	12,91 мкс	14,41 мкс
t_t	15,14 мкс	15,31 мкс
t_l	7,82 мкс	8,99 мкс
C_R	3046 м/с	2729 м/с
C_t	3266 м/с	3008 м/с
C_l	6322 м/с	5178 м/с

По точности измерений:

1. Подстройка частоты осуществляется до достижения максимума сигнала. Она приведена приблизительно, более точно ее можно определить с помощью фурье-анализа принятого сигнала.

В принципе, частоту волны можно подсчитать, исходя из равенства проекций волновых векторов на поверхность образца:

$$f_{t,l} = f_R \frac{C_{t,l}}{C_R \cos \alpha},$$

эта же формула позволяет при точном определении частоты волн определять соотношение скоростей волн C_R/C_p , C_R/C_p , C_l/C_t даже без сложного измерения временных интервалов.

2. Точность измерения метрических величин d , H составляет $\pm 0,01$ мм, что дает вклад в общую погрешность порядка 0,1 %. В принципе точность измерения этих величин можно увеличить.

3. Основную погрешность при измерения скорости дает измерение временных интервалов. Сюда входит погрешность цифрового осциллографа, которая в этом диапазоне составляет $\pm 0,25$ %, то есть при измерении временного интервала около 10 мкс абсолютная погрешность составляет величину около $\pm 0,025$ мкс. Отметим, что при современной аппаратуре вполне реально достигнуть точности $\pm 0,01$ мкс и выше.

Полная погрешность измерения скорости звука в нашем случае составит $\pm 0,5$ % (в абсолютных величинах ± 10 м/с).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработана методика определения скорости поверхностных волн Рэлея с помощью меандровых ЭМА-преобразователей. Получены простые формулы для определения скорости.

Методика позволила определить точки отсчета временных интервалов при распространении продольных, поперечных и поверхностных волн. Благодаря этому удалось за одну установку ЭМА-датчика на поверхность образца генерировать, принять и определить скорости всех трех волн с точностью $\pm 0,5$ %. Методика подходит для образцов с плоскопараллельными границами и может найти применение для решения задач структуроскопии (контроль по скорости) как ферромагнитных образцов (например, конструкционных сталей), так и проводящих неферромагнитных металлов (алюминий, медь).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль и диагностика / Справочник под. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
2. Муравьева О.В., Муравьев В.В. Методические особенности использования SH- волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 3—11.
3. Maxfield B., Kuramoto A., Hulbert I. Оценка конструкции ЭМА-преобразователей для избранных применений // Mater. Eval. 1987. V. 45. № 10. P. 1163—1183.
4. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Волкова Л.В. Влияние анизотропии механических свойств тонколистового стального проката на информационные параметры волн Лэмба // Сталь. 2016. № 10. С. 75—79.
5. Murav'ev V.V., Gushchina L.V. et al. Evaluating Damage Accumulated in Car Wheelset Axle Journals by the Ultrasonic Method Using Rayleigh and Head Waves // Russian Journal of Nondestructive testing. 2019. V. 55. No. 10. P. 713—722. [Муравьев В.В., Гущина Л.В., Казанцев С.А. Оценка накопленной поврежденности шеек осей колесных пар вагонов ультразвуковым методом с использованием релейских и головных волн // Дефектоскопия. 2019. № 10. С. 14—23.]
6. Кондратьев А.И., Римлянд В.И., Драчев К.А. Применение резонансного метода для изучения акустических свойств тонких образцов // Дефектоскопия. 2015. № 12. С. 3—10.
7. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 288 с.
8. Комаров В.А. Квазистационарное электромагнитно-акустическое преобразование в металлах. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. 235 с.
9. Thompson R.B. Model for the Electromagnetic Generation and Detection of Rayleigh and Lamb Waves // IEEE Trans. Sonics and Ultras. 1973. V. 20. № 4. P. 340—346.
10. Ильясов Р.С., Бабкин С.Э., Комаров В.А. О механизмах ЭМА-преобразования волн Рэлея в ферромагнетиках при низких частотах // Дефектоскопия. 1988. № 10. С. 77—82.
11. Бабкин С.Э., Ильясов Р.С., Комаров В.И., Рубцов В.И. Устройство для бесконтактного возбуждения и приема волн Рэлея в ферромагнетиках // Дефектоскопия. 1989. № 6. С. 93—94.
12. Бабкин С.Э. Определение коэффициента Пуассона ферромагнитных изделий ЭМА-способом // Дефектоскопия. 2015. № 5. С. 51—55.