

## **БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ НА МАЛОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

*Х.Б. Толипов*

Описана лабораторная установка, на которой экспериментально регистрировали акустические импульсы с малого участка поверхности. Установка включает бесконтактный электромагнито-акустический приемник, в котором индуктор был выполнен в виде двух прямых тонких параллельных проводников, находящихся на близком расстоянии друг от друга. Скорость волны Рэлея определяли в частотном диапазоне 2–10 МГц. При этих частотах длина поверхностной акустической волны варьировались от 600 до 240 мкм, а минимальная база измерения скорости волны Рэлея на частоте 10 МГц составила 500 мкм. Предложена новая методика измерения временного интервала между двумя акустическими импульсами.

Ключевые слова: волновое поле, теория упругости, механические напряжения, скорость волны, акустоупругость.

### **1. Введение**

Проблема измерения скорости волны Рэлея и амплитуды смещений на малых участках поверхности давно привлекает исследователей. Его решение открывает уникальные возможности исследований в неразрушающем контроле, в физических исследованиях, технологии и т.п.

Так, например, известно [1], что скорость упругих волн, вследствие эффекта акустоупругости, зависит от механических напряжений. Однако эта скорость, как правило, является интегральной характеристикой, по которой определяется только среднее по длине значение напряжений. Однако часто

при сжатии стали [1, 2], происходит локализация деформаций практически до размеров миллиметрового диапазона. Поэтому, остаточные напряжения, складываясь с внешними, могут достигнуть и превысить предельно допустимые значения. Таким образом, уменьшение базы измерений при определении скорости волны является одной из важных задач при диагностике остаточных напряжений.

Первые шаги в этом направлении были предприняты в [2, 3], где для измерения скорости волны применили спекл-интерферометрическую установку. Авторам удалось уменьшить базу измерений до 5–10 мм, однако дальнейшее уменьшение сдерживалось диаметром светового пятна (40 мкм).

В данной статье описана лабораторная установка, позволяющая определять амплитуду смещений и скорости волн практически на неограниченно малой области поверхности. Работа этой установки была апробирована при определении амплитуд стоячей волны вблизи ребра [4–5].

## 2. Описание лабораторной установки

Установка также позволяет производить измерения скорости рэлеевской волны на участках миллиметрового размера. Основным элементом этой установки является электромагнитоакустический (ЭМА) приемник, расположенный на поверхности изделия для приёма волн и состоящего из постоянного магнита и индуктора, выполненного в виде двух прямых проводников.

Рассмотрим подробнее работу ЭМА приемника. При движении акустической волны по поверхности исследуемого изделия, колебания частиц среды доходят до расположения ЭМА приемника. Во внешнем магнитном поле ЭМА приемника колебания частиц среды сопровождаются появлением сил Лоренца, действующих на электроны проводимости. На поверхности электропроводящего изделия возникают магнитоакустические токи, которые излучают электромагнитную волну в окружающее пространство, и которые принимаются индуктором ЭМА приемника. Напряженность электрической составляющей электромагнитного поля вблизи поверхности определяется формулой [6]:

$$E = \frac{2NB_n^2}{\rho c_r},$$

где:  $N$  – напряженность переменного магнитного поля, вызванного колебаниями частиц среды,  $B_n$  – индукция магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом,  $\rho$  – плотность среды,  $c_r$  – скорость волны Рэлея.

Индуктор обычно выполняется в виде плоской катушки, имеющей свою резонансную частоту [6]. Эта частота, как правило, составляет порядка единиц МГц, и создание ее с более высокой частотой наталкивается на трудности. Также отметим, что размеры таких индукторов сравнимы с размерами пьезодатчиков, находящимися в сантиметровом диапазоне. В предложенном

ЭМА приемнике индуктор представляет прямой тонкий проводник, занимающий узкую область поверхности и имеющий широкий частотный диапазон принимаемых волн. Напряжение на концах проводника такого индуктора будет линейно зависеть от его длины:  $U = E\ell$ .

На рис. 1 приведена блок-схема лабораторной установки, использованной для измерения амплитуды смещений поверхности и величины скорости волны Рэлея на клиновидной пластине. Как было выяснено [4–5], в этой пластине вблизи ребра возникает стоячая волновая картина, образованная падающей и отраженной от ребра волнами, и занимающая ограниченную область миллиметрового размера. Решение этой задачи было получено приближенными методами, что потребовало экспериментального подтверждения полученных результатов.

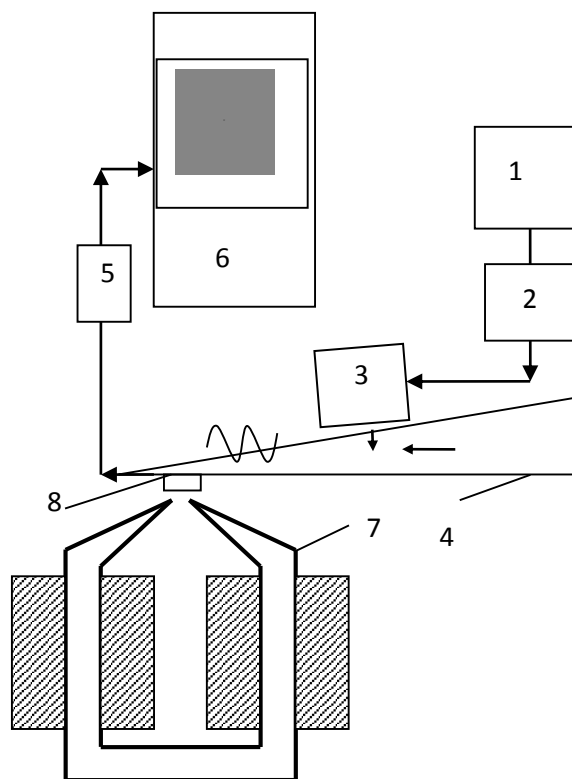


Рис. 1. Блок-схема лабораторной установки: 1 – генератор импульсов АНР 1001, 2 – высоковольтный усилитель, 3 – пьезодатчик, 4 – изделие, 5 – предусилитель, 6 – осциллограф GDS-2202, 7 – электромагнит, 8 – индуктор с проводниками 9, 10.

Акустическая волна возбуждалась наклонным пьезодатчиком 3 с углом ввода  $70^\circ$  импульсами длительностью 5 мксек и с частотой заполнения 2,5 МГц в направлении перпендикуляра к ребру клина. Электрические сигналы поступали на пьезодатчик с генератора импульсов 1, предварительно усиленные в блоке 2.

Клиновидная пластина 4 была выполнена из дюралюминия марки D16 с размерами 200x300 мм с углом раствора 26°. Сам ЭМА приемник состоит из электромагнита 7 и индуктора 8 представляющего собой два прямых тонких проводника диаметром 0,015 мм, жёстко закрепленные на подложке. Электрические сигналы с индуктора 8, затем через предварительный токовый усилитель 5 поступали на цифровой осциллограф 6 для определения их амплитуды. Образец перемещали относительно неподвижного ЭМА приемника с помощью микровинта (на рис. не показан) с шагом 0,5 мм. Опытные данные амплитуд смещений поверхности с этой установки представлены на рис. 2.

Измерение скорости волны Рэлея производили импульсным методом [7] на этой же установке. Базу измерения определяли два проводника 9 на индукторе (рис. 3), расположенные на небольшом расстоянии миллиметровых размеров [8].

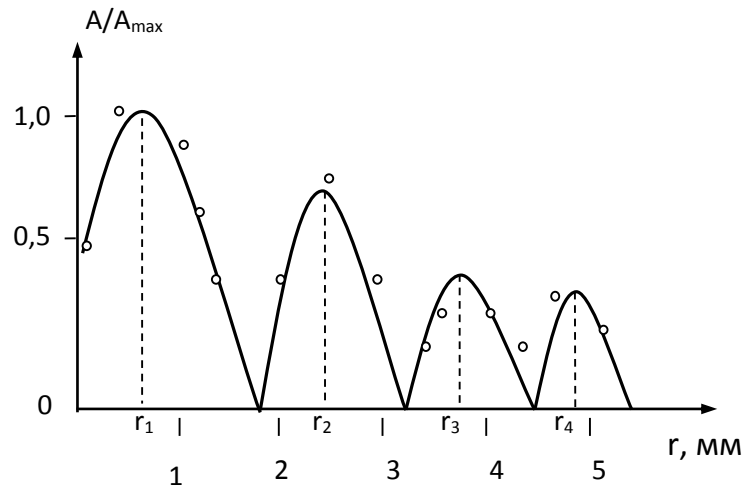


Рис. 2. Зависимость амплитуды стоячей волны от расстояния до ребра для угла клина 26°.

Для разрешения электрических импульсов, поступающих с индуктора, применили используемый обычно в оптике критерий Рэлея [9]. Два импульса будут разрешены, если максимум амплитуды второго импульса приходится на минимум предыдущего импульса. Минимальная база измерения скорости волны Рэлея на частоте 10 МГц составила 500 мкм. В отличие от спекл-интерферометрической установки, проводники неподвижно установленные на подложке индуктора и определяющие базу измерения, можно измерить с высокой точностью. Скорость волны была определена на цифровом осциллографе, и имело значение 2740 м/сек со средним квадратичным отклонением  $6 \cdot 10^{-3}$  м/сек от среднего значения по 10 измерениям. Переход на более высокие частоты позволяет еще уменьшить базу измерений, но при этом растет затухание волны, вносящее дополнительную погрешность в измерение скорости.

Эту погрешность можно значительно уменьшить, если учесть зависимость затухания от расстояния [10]. Обычно временной интервал измеряется между полуволнами в точках с максимальными амплитудами. Однако при прохождении по поверхности изделия, вследствие затухания волны, изменяется амплитуда сигнала, сопровождающаяся также изменением его формы.

Уменьшение амплитуды волны с пройденным расстоянием по поверхности изделия происходит нелинейно, в основном, по экспоненциальной зависимости:

$$U = U_0 \exp(-\delta x) \cos(\omega t - kx),$$

где  $U_0$  – начальное смещение,  $\omega$  – круговая частота,  $\delta$  – коэффициент затухания,  $t$  – время,  $k$  – волновое число,  $x$  – координата, вдоль которой распространяется волна.

К предусилителю

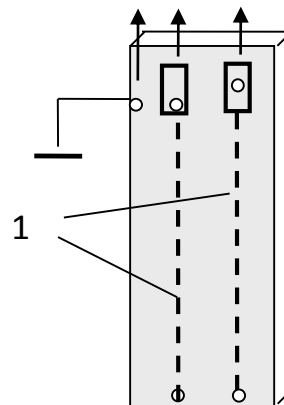


Рис. 3. ЭМА-приемник. На передней грани гетинакса располагается фольга, на задней – проводники 1

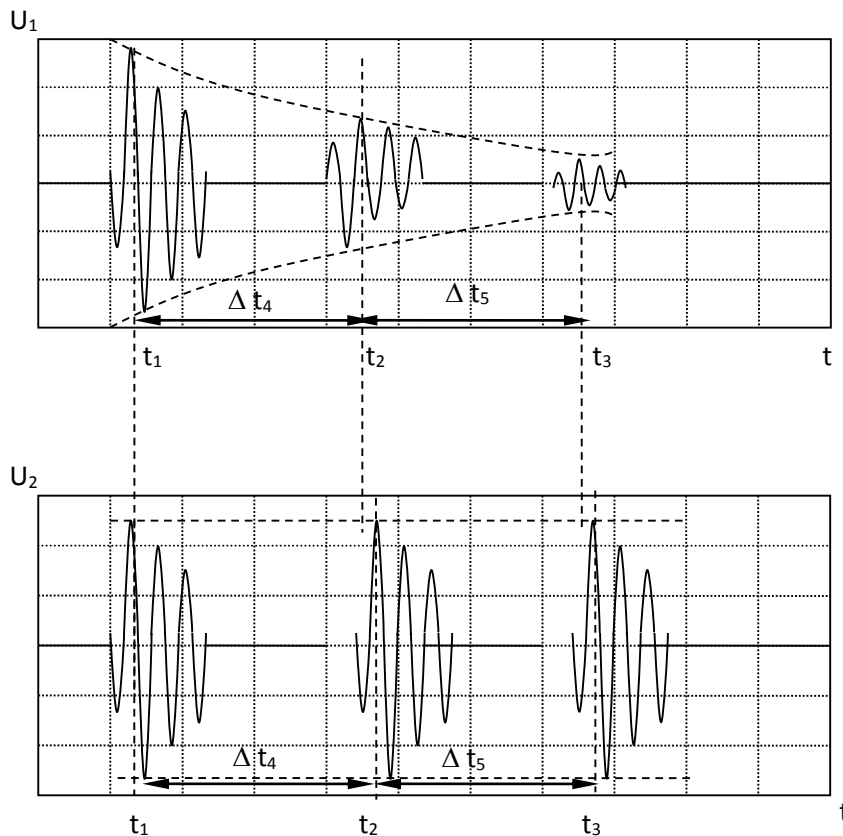


Рис. 4. Ультразвуковые импульсы: реальные затухающие с расстоянием  $U_1$  и обработанные и пронормированные на компьютере по амплитуде  $U_2$

Это приводит к смещению положения максимума каждой полуволны, и временной интервал между полуволнами с максимальными амплитудами будет зависеть не только от пройденного расстояния, но и от затухания волны, вносящего неучитываемый вклад в погрешность измерения.

Зависимость амплитуды ультразвуковых импульсов от пройденного расстояния можно определить из экспериментальных измерений по серии, по крайней мере, трех ультразвуковых цугов волн [10]. После нормировки ультразвуковых импульсов временные интервалы между полуволнами в точках с максимальными амплитудами в каждом цуге выравниваются (рис. 4).

Это свидетельствует о том, что положение максимума полуволны не искажено вследствие затухания волны, и тем самым исключается погрешность измерения.

### 3. Выводы

Таким образом, выполнение индуктора в виде прямых проводников позволяет расширить диапазон принимаемых волн в сторону более высоких частот. Возможность приема акустических волн на высоких частотах позволяет существенно сократить базу измерений при определении скорости волны, а также осуществлять неразрушающий контроль микрообъектов.

#### Библиографический список

1. Камышев, А.В. Диагностика остаточных напряжений в ободьях железнодорожных колес методом акустоупругости / А.В. Камышев, Н.Е. Никитина, В.А. Смирнов // Дефектоскопия. – 2010. – № 3. – С. 50–54.
2. Спекл-интерферометрическая установка для определения скорости ультразвуковой волны Релея на участках миллиметрового размера / А.П. Владимиров, Э.С. Горкунов, Л.С. Горулева и др. // Дефектоскопия. – 2011. – № 3. – С. 3–9.
3. Спекл-интерферометрическая установка для бесконтактного измерения скорости ультразвуковой волны Релея / А.П. Владимиров, Э.С. Горкунов, П.С. Еремин и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – № 1. – С. 128–131.
4. Tolipov, Kh. Stagnant Nonuniform Acoustic Waves / Kh. Tolipov // *Advanced Material Research*. – 2013. – Vol. 684. Pp. 667–670. Trans Tech Publications. Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.684.667.
5. Толипов, Х.Б. Акустические стоячие волны в ограниченной однородной среде / Х.Б. Толипов // АЖ. – 2013. – № 4. – С. 1–6.
6. Ключев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / В.В. Ключев. – М: Машиностроение, 2003. – С. 230.
7. Викторов, И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике / И.А. Викторов. – М.: Наука, 1966. – 166 с.
8. Пат. №115492. РФ, МПК G01N 29/01. Устройство для измерения скорости поверхностной акустической волны / Х.Б. Толипов, Ю.Х. Толипова. Опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12.
9. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высшая школа, 1989. – С. 375.

Наука ЮУрГУ: материалы 67-й научной конференции  
Секции естественных наук

10. Пат. №.2490606 РФ, МПК G01N 29/0. Способ измерения скорости поверхностной ультразвуковой волны / Х.Б. Толипов, Ю.Х. Толипова. Опубл. 20.08.2013, Бюл. №23.