

УДК 539.25

ЭЛЕКТРОМАГНИТОАКУСТИЧЕСКИЙ ПРИЕМНИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВОЛНЫ РЭЛЕЯ НА МАЛЫХ УЧАСТКАХ ПОВЕРХНОСТИ

© Х. Б. Толипов¹*Статья поступила 12 марта 2013 г.*

Описана экспериментальная установка, с помощью которой регистрировали акустические импульсы с малого участка поверхности. Основной особенностью этой установки является бесконтактный электромагнитоакустический приемник, в котором индуктор выполнен из тонкого прямого проводника. Работа ее была апробирована при определении картины стоячей волны, возникающей в клиновидной пластине вблизи ребра. Шаг сканирования поверхности пластины электромагнитоакустическим приемником — 0,5 мм. Скорость поверхностной волны определяли измерением времени прохождения между двумя прямыми тонкими параллельными проводниками, составляющими базу измерения. Частота колебаний волны варьировалась в диапазоне от 2 до 10 МГц, что соответствовало изменению длины поверхностной акустической волны от 600 до 240 мкм. Предложена новая методика измерения временного интервала между двумя акустическими импульсами, позволяющая повысить точность определения скорости волны.

Ключевые слова: акустическая волна; остаточные напряжения; акустоупругость; теория упругости; стоячие волны.

Ультразвуковые методы являются эффективным инструментом для исследования свойств материалов. Как известно [1, 2], механические напряжения вследствие эффекта акустоупругости связаны со скоростью упругих волн. Поэтому ультразвуковые методы благодаря высокой эффективности диагностики остаточных напряжений получили широкое распространение.

Скорость упругих волн, как правило, является интегральной характеристикой, по которой определяется только среднее по длине значение механических напряжений. Поэтому актуальна задача измерения скорости волны на малых базах, что позволяет приблизиться к дифференциальной оценке напряжений.

В первых работах в этом направлении использовали спекл-интерферометрическую установку [3, 4]. Авторам удалось сократить базу измерений в пределах 5 – 10 мм. Дальнейшее ее уменьшение сдерживалось диаметром светового пятна лазера (40 мкм). Следует отметить, что уменьшение базы измерений является одной из актуальных задач при определении механических напряжений. Так, например, при сжатии стали [3, 4] часто происходит локализация деформаций до миллиметровых размеров и внутренние напряжения, суммируясь с внешними, могут превысить допустимые значения.

В данной статье описана лабораторная установка, позволяющая определять скорость волн практически на неограниченно малой области поверхности. Установка была апробирована при определении скорости волны методом стоячих волн вблизи ребра клиновидной пластины [5, 6]. Она позволяет проводить измерения скорости рэлеевской волны на участках поверхности миллиметрового размера. Основным эле-

ментом этой установки является электромагнитоакустический (ЭМА) приемник, расположенный на поверхности изделия и состоящий из постоянного магнита и индуктора, выполненного в виде прямого проводника [7]. При движении акустической волны по поверхности исследуемого изделия колебания частиц среды доходят до ЭМА приемника. Во внешнем магнитном поле ЭМА приемника колебания частиц среды сопровождаются появлением сил Лоренца, действующих на электроны проводимости:

$$F = q [VB],$$

Эту формулу можно представить в виде $E = F/q = [VB]$.

Плотность магнитоакустических токов, возникающих на поверхности электропроводящего изделия, будет зависеть от удельной электропроводности σ , индукции магнитного поля B , создаваемого электромагнитом, и скорости частиц среды V :

$$\gamma_n = \sigma E = \sigma [VB].$$

Поскольку скорость волны связана со смещением ($V = dU/dt$), то для гармонического режима возбуждения получаем выражение

$$\gamma_n = i\omega\sigma[UB],$$

свидетельствующее о линейной зависимости между наведенными токами и смещениями волны. Эти токи излучают электромагнитную волну в окружающее пространство, которая фиксируется индуктором ЭМА приемника. Выражение для амплитуды электрического сигнала на индукторе имеет громоздкий вид и зависит от конфигурации индуктора, зазора между индуктором и поверхностью изделия и т.д. [8]. Напряжение на индукторе пропорционально смещениям

¹ Южноуральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия; e-mail: thb@susu.ac.ru

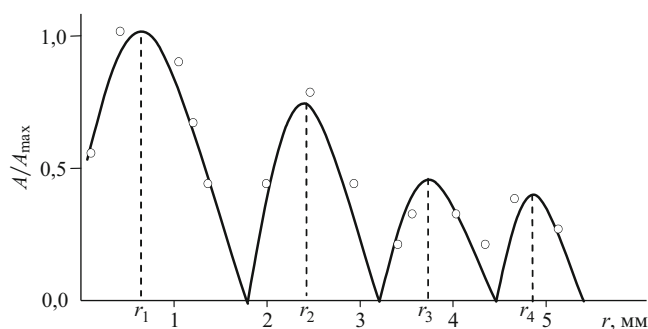


Рис. 1. Теоретическая зависимость амплитуды стоячей волны от расстояния до ребра для угла клина 26° (O — экспериментальные точки)

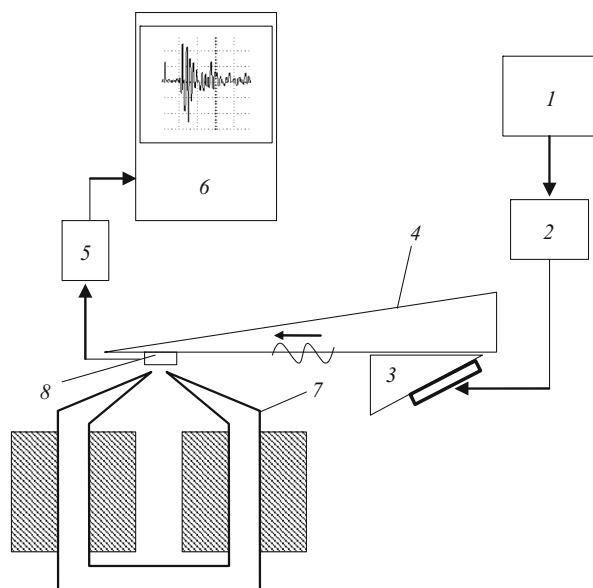


Рис. 2. Блок-схема лабораторной установки

акустической волны. Электрический сигнал с индуктора усиливается и поступает для измерения на цифровой осциллограф, оцифрованные осциллографом сигналы — в компьютер для последующей обработки.

Как правило, напряжения часто концентрируются у края изделия и, следовательно, контроль этой его части является одной из ответственных задач. В этом случае для измерения скорости целесообразно использовать метод стоячих волн, образованных падающей и отраженной от края изделия волнами.

Учитывая, что расстояние d между пучностями составляет половину длины волны, ее скорость определяется соотношением

$$V = d/2v.$$

С увеличением частоты колебаний v уменьшается база измерений d , что позволяет измерять остаточные напряжения на малых участках.

Часть конструкций, особенно широко применяемых в ракетной технике, с целью снижения веса изготавливают в форме цилиндрических оболочек с уменьшающейся по образующей толщиной, которые в

сечении имеют клиновидную форму с небольшим углом раствора. Контроль таких изделий потребовал теоретического исследования особенностей распространения акустических волн. Возникающая вблизи ребра стоячая волновая картина (рис. 1), образованная падающей и отраженной от ребра волнами, имеет миллиметровые размеры. Эта задача была решена приближенными методами [5–6], что потребовало экспериментального подтверждения полученных результатов.

На рис. 2 приведена блок-схема лабораторной установки, использованной для построения картины смещений и определения величины скорости волны на различных участках поверхности клиновидной пластины.

Рассмотрим работу этой установки. Поверхностная волна, возбужденная по методу клина [9] наклонным пьезодатчиком 3 с углом ввода 70° , двигалась перпендикулярно к ребру клина (см. рис. 2). Электрические импульсы длительностью 5 мкс и с частотой заполнения от 2 до 10 МГц поступали на пьезодатчик с генератора импульсов 1, предварительно усиленные в блоке 2.

Клиновидная пластина 4 выполнена из дюралюминия марки D16 с периметром 300×200 мм и угол клина 26° . ЭМА приемник состоит из электромагнита 7 и индуктора 8, представляющего собой прямой тонкий проводник диаметром 0,015 мм, жестко закрепленный на подложке [7]. Электрические сигналы с индуктора 8 через предварительный токовый усилитель 5 поступали на цифровой осциллограф 6 для определения величины амплитуды. Образец перемещали относительно неподвижного ЭМА приемника с помощью микровинта (на рисунке не показан) с шагом 0,5 мм. Опытные данные амплитуд смещений поверхности, полученных на этой установке, представлены на рис. 1. С приближением к ребру расстояние между пучностями увеличивается, что свидетельствует об уменьшении скорости волны, подтверждая теоретические результаты. Важно отметить, что область изменения скорости не превышает 10 мм.

Традиционный метод заключается в измерении времени прохождения волны между двумя прямыми параллельными проводниками, составляющими базу измерений. Скорость волны Рэлея измеряли импульсным методом [9] на этой же установке. Частотный диапазон возбуждаемых цугов волн — от 2 до 10 МГц. Индукторы приемника — сменные и в зависимости от длины волны имели базу от 0,5 до 4 мм.

На практике изменения остаточных напряжений на различных участках обычно не превышают десяти процентов, поэтому актуальна задача получения высокой точности измерений.

Систематическая среднеквадратическая погрешность измерения скорости в значительной степени зависит от базы измерений l :

$$\Delta V/V = \sqrt{(\Delta l/l)^2 + (\Delta t/t)^2}.$$

При длине базы $l = 4$ мм с разрешением 1 мкм и времени $t = 1$ нс эта погрешность не превышает ± 1 %. Однако при уменьшении базы измерения до 0,5 мм при тех же разрешениях погрешность определения скорости резко возрастает до ± 10 %.

Временной интервал между двумя цугами волн, как правило, определяется по их пикам. Увеличение частоты возбуждаемых волн приводит к уменьшению их длин, позволяющих сократить базу измерений. Однако с частотой увеличивается затухание колебаний, вносящее дополнительную погрешность при измерении скорости. Вследствие затухания волны при прохождении по поверхности изделия меняется амплитуда сигнала, сопровождающаяся также изменением его формы и сдвигом пика волны.

Затухание амплитуды волны по мере прохождения по поверхности изделия носит нелинейный характер и чаще всего имеет экспоненциальную зависимость

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

где U_0 — начальное смещение; ω — круговая частота; δ — коэффициент затухания; t — время; k — волновое число; x — координата, вдоль которой распространяется волна.

Затухание приводит к неравномерному смещению положения максимума каждой полуволны. Следовательно, временной интервал между полуволнами в точках максимальных амплитуд зависит не только от пройденного расстояния, но и от затухания волны, вносящего вклад в погрешность измерения.

Зависимость затухания от расстояния можно определить из экспериментальных измерений по крайней мере трех ультразвуковых цугов волн [10]. Оцифрованные сигналы с осциллографа поступают на компьютер, с помощью которого выявляют теоретическую зависимость амплитуды ультразвуковых импульсов от расстояния.

После нормировки амплитуд временные интервалы между полуволнами в точках с максимальными амплитудами в каждом цуге будут иметь равные значения (рис. 3). Это свидетельствует о том, что положение пика полуволны не сдвинуто вследствие затухания волны, что исключает погрешность и приводит к повышению точности измерений.

Таким образом, выполнение индуктора в виде прямых параллельных проводников позволяет расширить диапазон принимаемых волн в сторону более высоких частот. Возможность приема акустических волн на высоких частотах уменьшает длину возбуждаемой волны и существенно сокращает базу измерений. Это позволяет приблизиться к дифференциальной оценке напряжений, а также осуществить неразрушающий контроль микрообъектов. Предложенная новая методика определения временного интервала между цугами волн позволяет повысить точность измерения, а использование метода стоячих волн — определить остаточные напряжения у края изделий.

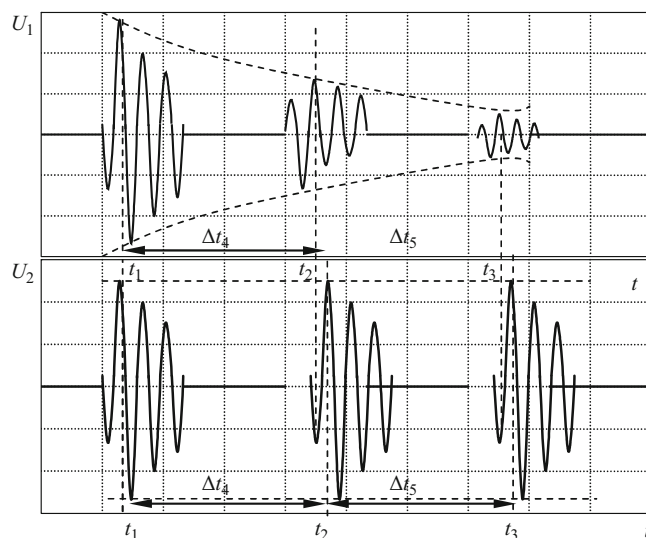


Рис. 3. Ультразвуковые импульсы: реальные затухающие с расстоянием U_1 и обработанные пронормированные по амплитуде на компьютере U_2

ЛИТЕРАТУРА

1. Девиченский А. Ю., Ломоносов А. М., Жаринов С. Е. и др. Диагностика остаточных напряжений в металлах с помощью широкополосных поверхностных акустических импульсов / Акустический журнал. 2009. № 1. С. 39 – 46.
2. Камышев А. В., Никитина Н. Е., Смирнов В. А. Диагностика остаточных напряжений в ободьях железнодорожных колес методом акустоупругости / Дефектоскопия. 2010. № 3. С. 50 – 54.
3. Владимиров А. П., Горкунов Э. С., Горулева Л. С. и др. Спекл-интерферометрическая установка для определения скорости ультразвуковой волны Релея на участках миллиметрового размера / Дефектоскопия. 2011. № 3. С. 3 – 9.
4. Владимиров А. П., Горкунов Э. С., Еремин П. С. и др. Спекл-интерферометрическая установка для бесконтактного измерения скорости ультразвуковой волны Релея / Приборы и техника эксперимента. 2010. № 1. С. 128 – 131.
5. Tolipov Kh. Stagnant Nonuniform Acoustic Waves / Advanced Material Research. 2013. Vol. 684. P. 667 – 670. Trans Tech Publications. Switzerland. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.684.667.
6. Толипов Х. Б. Акустические стоячие волны в ограниченной однородной среде / Акустический журнал. 2013. № 4. С. 502 – 507.
7. Патент № 115492. РФ, МПК G01N 29/01 / Устройство для измерения скорости поверхностной акустической волны. Толипов Х. Б., Толипова Ю. Х.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ). Заявлено 21.12.2011. Опубл. 27.04.2012. Бюл. № 12.
8. Толипов Х. Б. Возбуждение и прием ультразвуковых волн в упругом клине при неразрушающем контроле клеевых соединений: дисс. канд. техн. наук. Свердловск, 1991. — 166 с.
9. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. — М.: Наука, 1966. — 166 с.
10. Патент №. 2490606 РФ, МПК G01N 29/01 / Способ измерения скорости поверхностной ультразвуковой волны / Толипов Х. Б., Толипова Ю. Х.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ) — № 2012Ю06496; заявл. 22.02.2012. Опубл. 20.08.2013. Бюл. № 23.