

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ВОЛН ЛЭМБА, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ЛАЗЕРНЫМИ НАНОИМПУЛЬСАМИ

Ю.В. Петров¹, С.Ю. Гуревич², Е.В. Голубев³

Проведено экспериментальное исследование зависимости основных параметров у.з. импульсов волн Лэмба, возбуждаемых оптико-термическим излучателем круглой формы, от его диаметра. Обнаружено, что начиная с диаметра 3,0 мм, происходит разделение у.з. импульса на два. Считается, что источниками разделенных импульсов являются диаметрально противоположные края ОТ-излучателя. Из результатов эксперимента следует, что зависимость времени распространения максимумов разделенных импульсов от диаметра ОТ-излучателя является линейной. Исходя из этого, предложен графический метод локального измерения групповой средней скорости волн Лэмба.

Ключевые слова: ультразвуковые волны Лэмба; оптико-термический излучатель; лазерное возбуждение; широкополосный ЭМА-приемник.

Введение

Известны методы оценки физико-механических свойств металлоизделий, основанные на измерении скоростей у.з. волн различных видов [1–3]. При этом ввод и прием ультразвука в изделие осуществляется, как правило, пьезопреобразователями через контактные среды. В данной работе рассматривается метод измерения групповой скорости ультразвуковых волн Лэмба в листовых металлоизделиях, генерируемых и регистрируемых бесконтактным способом с помощью лазерных наноимпульсов и широкополосного (ш.п.) ЭМА-приемника [4].

Описание экспериментальной установки

Для проведения измерений использовалась установка, схема которой показана на рис. 1. Она состоит из импульсного лазера 1, диафрагмы 2, исследуемых образцов 3, ЭМА-приемника волн Лэмба 4, усилителя тока 5, усилителя напряжения 6, цифрового осциллографа 7.

Генерация волн Лэмба осуществляется импульсным лазером Nd: YAG «Brilliant В» фирмы QUANTEL с модулируемой добротностью. Длина волны лазерного излучения 1064 нм, длительность и энергия световых импульсов равны соответственно 4–6 нс и 0,85 Дж. Диаметр светового пучка 9,5 мм. Образцами служили металлические пластины размерами 270х60 мм и толщиной от 0,6 до 2,5 мм.

При лазерном облучении тонких металлических пластин металл в зоне действия наносекундных световых импульсов нагревается и становится источником у.з. волн. Эффективность такого оптико-термического источника (в дальнейшем ОТ-излучатель) определяется не только мощностью лазерного излучения и теплофизическими свойствами металла, но и зависит от его формы и размеров. Возбуждаемые

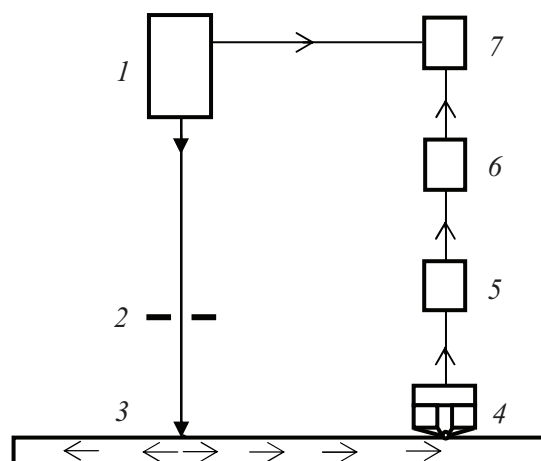


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 – лазер, 2 – диафрагма, 3 – металлическая пластина,
4 – ЭМА-приемник, 5 – усилитель тока, 6 – усилитель
напряжения, 7 – цифровой осциллограф.

¹ Петров Юрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, кафедра общей и экспериментальной физики, Южно-Уральский государственный университет.

² Гуревич Сергей Юрьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики, Южно-Уральский государственный университет.

E-mail: sergur@susu.ac.ru

³ Голубев Евгений Валерьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра общей и экспериментальной физики, Южно-Уральский государственный университет.

E-mail: ev_golubev@mail.ru

ОТ-излучателем у.з. импульсы обладают достаточно широким спектром излучаемых частот и распространяются в пластине с различными скоростями.

Регистрируются у.з. волны Лэмба ш.п. ЭМА-приемником, который практически без искажений преобразует акустические импульсы в электромагнитные. После усиления электромагнитные импульсы поступают на вход ш.п. осциллографа, где происходит цифровое запоминание, автоматическая установка размеров изображения, автоматическое измерение амплитудно-временных параметров с выводом результатов измерений на экран дисплея.

Методика проведения исследований

Предлагаемый в настоящей статье метод измерения скорости у.з. волн Лэмба, возбуждаемых лазерными наноимпульсами, является следствием результатов экспериментальных исследований зависимости основных характеристик у.з. импульсов от размеров ОТ-излучателя.

Эксперимент проводился следующим образом. Лазерное излучение максимальной мощности направляется на образец через диафрагму с круглым отверстием. В результате на поверхности пластины начинает действовать ОТ-излучатель у.з. волн в форме правильного круга. В ходе эксперимента диаметр отверстия диафрагмы, а значит и диаметр ОТ-излучателя, изменялся от 1,0 до 9,0 мм с шагом 0,5 мм. Форма и результаты измерения амплитудно-временных параметров у.з. импульсов, преобразованных ЭМА-приемником, выводились на экран дисплея.

Из анализа полученных осциллограмм следует, что для ОТ-излучателей, диаметр которых не превышает 3,0 мм, форма, максимальная амплитуда, длительность и частота колебаний у.з. импульсов существенно не изменяются. Количественно эти параметры (кроме амплитуды) можно оценить из приведенной на рис. 2, а осциллограммы у.з. импульса, возбуждаемого ОТ-излучателем диаметром 1,0 мм в пластине толщиной 0,6 мм.

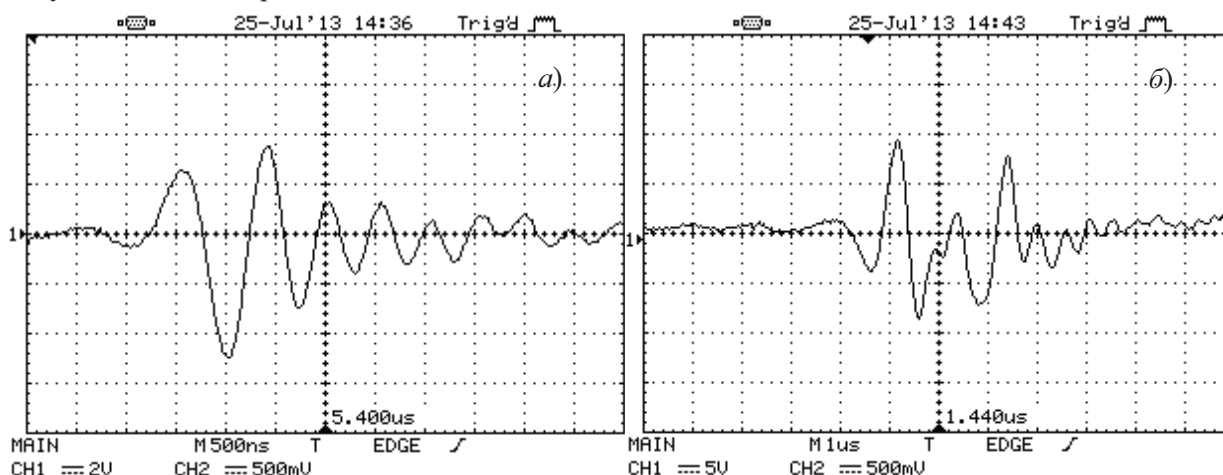


Рис. 2. Импульсы у.з. волн Лэмба от «оптико-термического» излучателя диаметром: а) 1,0 мм, б) 9,0 мм

По мере увеличения диаметра ОТ-излучателя форма у.з. импульса и его параметры изменяются. Так на рис. 2, б приведена осциллограмма у.з. импульса, возбуждаемого ОТ-излучателем диаметром 9,0 мм. Видно, что произошло его разделение на два импульса, каждый из которых имеет свою максимальную амплитуду, длительность и частоту колебаний.

Причина такого разделения заключается в следующем. При лазерной генерации ультразвука его интенсивность определяется в основном градиентом температуры. А поскольку у ОТ-излучателя градиент температуры максимален на его границах, то они и вносят основной вклад в возбуждаемое акустическое поле. Если рассматривать диаметрально противоположные границы ОТ-излучателя, то возбуждаемые ими у.з. импульсы проходят до ЭМА-приемника разные расстояния. Максимум импульса от дальней границы регистрируется позднее, чем максимум импульса от ближней. «Время запаздывания» определяется расстоянием между границами ОТ-излучателя, то есть его диаметром, и скоростью распространения ультразвука. По результатам проведенного эксперимента была найдена зависимость «времени запаздывания» у.з. импульсов волн Лэмба от диаметра ОТ-излучателя. На рис. 3 построен график этой зависимости. Видно, что она является линейной и тогда по коэффициенту k экспериментальной прямой нетрудно найти среднее значение скорости $\langle v \rangle$ распространения у.з. волн Лэмба.

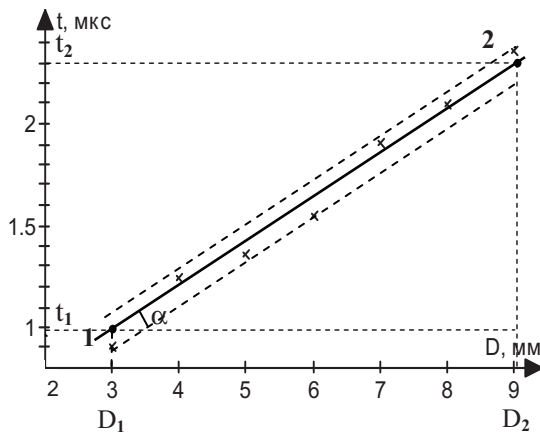


Рис. 3. Зависимость «времени запаздывания» импульсов волн Лэмба, излучаемых диаметрально противоположными границами ОТ-излучателя, от его диаметра.

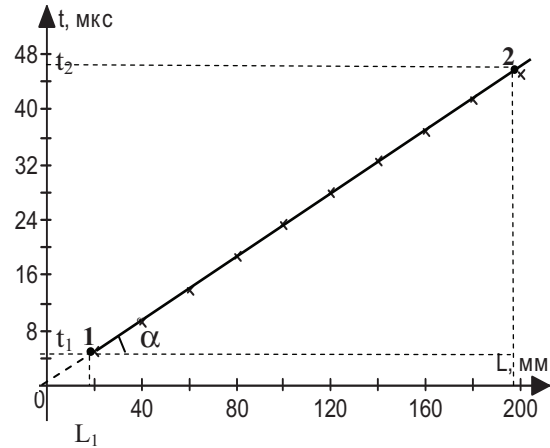


Рис. 4. Зависимость времени распространения волн Лэмба от расстоянием между ОТ-излучателем и ЭМА-приемником.

Проведем по предложенной методике оценку величины средней скорости. По графику, приведенному на рис. 3, находим угловой коэффициент

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{t_2 - t_1}{D_2 - D_1}.$$

Тогда

$$\langle v \rangle = \frac{1}{k} = \frac{9 - 3}{2,36 - 0,95} = 4,26 \text{ (мм / мкс)}.$$

Оценим погрешность измерения этой скорости. Доверительные границы относительной E_v и абсолютной Δ_v суммарной погрешностей при многократных косвенных измерениях скорости оцениваются стандартным методом [5]. При этом систематическая погрешность γ определяется в основном максимальной погрешностью измерительных приборов (осциллограф и микрометр), а случайная погрешность ε оценивается графическим методом с доверительной вероятностью $p = 0,95$.

Итак, предел допускаемой суммарной погрешности:

относительной $E_v = \sqrt{\gamma^2 + \varepsilon^2} = \sqrt{(1\%)^2 + (6,0\%)^2} = 6,1\%,$

абсолютной $\Delta_v = E_v \% \cdot \langle v \rangle \frac{1}{100\%} = \frac{6,1 \cdot 4,26}{100} = 0,26 \text{ (}\frac{\text{мм}}{\text{мкс}}\text{)}.$

Окончательно

$$v = (4,26 \pm 0,26) \frac{\text{мм}}{\text{мкс}}, E_v = 6,0\% \text{ при } p = 0,95.$$

Таким образом, разделение импульсов у.з. волн Лэмба, генерируемых ОТ-излучателем вследствие увеличения его диаметра, можно использовать для измерения их средней скорости. При этом длина участка изделия, на котором производится измерение, не превышает диаметра ОТ-излучателя (диаметра лазерного пучка).

Если измерения производятся на участке изделия, длина которого значительно превышает максимальный диаметр ОТ-излучателя, то средняя скорость $\langle v \rangle$ у.з. волн Лэмба рассчитывается по угловому коэффициенту k экспериментального графика зависимости времени распространения максимума у.з. импульса от расстояния между ОТ-излучателем и ЭМА-приемником. Диаметр ОТ-излучателя в этом случае необходимо выбирать не более 3,0 мм.

Проведем оценку величины $\langle v \rangle$ для пластины, которая использовалась в первом эксперименте. Для этого воспользуемся приведенным на рис. 4 экспериментальным графиком упомянутой выше зависимости. Перемещение ЭМА-приемника относительно ОТ-излучателя контролировалось по миллиметровой шкале оптической скамьи. Из графика находим угловой коэффициент

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{t_2 - t_1}{L_2 - L_1}.$$

Тогда

$$\langle v \rangle = \frac{1}{k} = \frac{200 - 20}{45,20 - 4,80} = 4,46 \text{ (мм/мкс)}.$$

Оценим погрешность измерения $\langle v \rangle$. Как следует из графика на рис. 4, случайная погрешность измерения скорости практически равна нулю. Тогда предел допускаемой суммарной погрешности будет определяться только систематической погрешностью измерительных приборов:

$$\text{относительной} \quad \gamma_v = 1\%,$$

$$\text{абсолютной} \quad \theta v = \gamma_v \% \cdot \langle v \rangle \frac{1}{100\%} = \frac{1 \cdot 4,46}{100} \approx 0,05 \left(\frac{\text{мм}}{\text{мкс}} \right).$$

Окончательно

$$v = (4,46 \pm 0,05) \frac{\text{мм}}{\text{мкс}}, \quad \gamma_v = 1\%.$$

Следует заметить, что предложенные методики могут быть успешно применены и для измерения скорости поверхностных ультразвуковых волн.

Выводы

1. При лазерном облучении тонких металлоизделий источником у.з. волн Лэмба является нагретая в зоне действия светового луча поверхность металла (оптико-термический излучатель). Считается, что за счет градиента температуры основной вклад в акустическое поле такого излучателя вносят его границы.

2. Исследования зависимости основных параметров импульса волны Лэмба от диаметра ОТ-излучателя показали, что начиная с диаметра 3,0 мм происходит его разделение на два импульса. При этом зависимость времени распространения максимумов этих импульсов от диаметра ОТ-излучателя является линейной.

3. Считая, что источниками разделенных импульсов являются диаметрально противоположные границы ОТ-излучателя, предложен графический метод расчета средней скорости волн Лэмба. При этом длина участка изделия, на котором производится измерение, не превышает диаметра ОТ-излучателя (лазерного пучка).

4. По предложенной методике проведен расчет средней скорости волн Лэмба для металлической пластины толщиной 0,6 мм. Предел допускаемой суммарной относительной погрешности при многократном косвенном измерении скорости не превышает 6 %.

Авторы выражают искреннюю благодарность А.А. Шульгинову за обсуждение результатов работы.

Литература

1. Ермолов, И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И.Н. Ермолов. – М.: Машиностроение, 1981. – 230 с.

2. Методы акустического контроля металлов // под ред. Н.П. Алешина. – М.: Машиностроение, 1989. – 210 с.

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. ЭМА-регистрация ультразвуковых волн Лэмба, возбуждаемых лазерными наноимпульсами / С.Ю. Гуревич, Ю.В. Петров, Е.В. Голубев, А.А. Шульгинов // Дефектоскопия. – 2013. – № 8. – С. 4–8.

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

Поступила в редакцию 14 июля 2014 г.

MEASUREMENT OF VELOCITY OF LAMB WAVES EXCITED BY LASER**Yu.V. Petrov¹, S.Yu. Gurevich², E.V. Golubev³**

The experimental investigation of the dependence of ultrasound pulse parameters of Lamb waves excited by a round shaped optical-thermal emitter on its diameter was carried out. It was found that the ultrasound pulse is divided into two parts when the diameter is 3,0 mm or more. The sources of the separated pulses are considered to be the opposite edges of the optical-thermal emitter. The results show that the dependence of the propagation time of the maximum values for separated pulses on the diameter of the optical-thermal emitter is linear. Thus, the graphical method for the measurement of the group mean velocity of Lamb waves was offered.

Keywords: ultrasound Lamb waves; optical-thermal emitter laser excitation; broadband EMAT receiver.

References

1. Ermolov I.N. *Teoriya i praktika ul'trazvukovogo kontrolya* (Theory and practice of ultrasonic testing). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 230 p. (in Russ.).
2. Aleshin N.P. *Metody akusticheskogo kontrolya metallov* (Methods of acoustic testing of metals). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 210 p. (in Russ.).
3. Vladimirov A.P., Gorkunov E.S., Eremin P.S., Zadvorkin S.M., Shadrin M.V., Solov'ev K.E. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2010. no. 1. pp. 128–131. (in Russ.).
4. Gurevich S.Yu., Petrov Yu.V., Golubev E.V., Shulginov A.A. EMA Recording of Ultrasound Lamb Waves Excited by Laser Nanopulses. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2013. Vol. 49, no. 8, pp. 431–435. DOI: 10.1134/S1061830913080056.
5. Zaydel' A.N. *Oshibki izmereniy fizicheskikh velichin* (Measurement errors of physical quantities). Leningrad, Nauka Publ., 1986. 108 p. (in Russ.).

Received 14 July 2014

¹ Petrov Yuriy Vladimirovich is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, General and Experimental Physics Department, South Ural State University.

² Gurevich Sergei Yurevich is Dr. Sc. (Engineering), Professor, General and Experimental Physics Department, South Ural State University.
E-mail: sergur@susu.ac.ru

³ Golubev Evgeniy Valerievich is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, General and Experimental Physics Department, South Ural State University.

E-mail: ev_golubev@mail.ru