

ИЗЛУЧАТЕЛЬ И ПРИЕМНИК УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТОНКОЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

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

Приведены результаты исследования по выявлению зависимости основных характеристик ультразвуковых волн Лэмба, возбуждаемых в металлических пластинах термооптическим излучателем, от его геометрических и энергетических параметров. Таким излучателем ультразвука считается нагретая зона поверхности металла при его облучении наносекундными оптическими импульсами. Регистрация возбуждаемых волн Лэмба осуществлялась специальным широкополосным ЭМА-приемником. Полученные результаты можно использовать при создании средств бесконтактного ультразвукового контроля качества тонких металлоизделий.

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

Введение

В практике ультразвуковой дефектоскопии широко используются методы контроля качества тонколистовых металлоизделий и созданных на их основе композитных материалов с помощью волн Лэмба. Поскольку применение контактных жидкостей при ультразвуковой дефектоскопии ответственных композитных изделий не допускается, то способы генерации и приема ультразвука должны быть бесконтактными, например, с помощью наносекундных лазерных импульсов и электромагнитно-акустического (ЭМА) приемника [1–4].

При облучении наносекундными лазерными импульсами листовых металлоизделий нагретая часть поверхности металла становится источником ультразвуковых волн Лэмба. Эффективность такого «термооптического» излучателя (в дальнейшем – ТО-излучатель) зависит от теплофизических свойств металла и его толщины, поверхностной плотности мощности теплового излучения, которая задается мощностью лазерного излучения. Существенное значение имеют и геометрические размеры ТО-излучателя. Все это определяет тип возбуждаемых волн Лэмба, величину амплитуды, форму и длительность ультразвуковых импульсов, а также частоту их заполнения.

В работах [4, 5] для бесконтактной регистрации ультразвуковых волн Лэмба использовался ЭМА-приемник объемных волн. Чувствительность и надежность такого приемника можно существенно повысить, если в его конструкцию внести изменения, учитывающие некоторые особенности движения упругих частиц в волнах Лэмба разных номеров [6].

Таким образом, чтобы довести контролируемую аппаратуру, созданную на базе импульсного лазера и широкополосного ЭМА-приемника, до внедрения на производстве необходимо:

- разработать и изготовить ЭМА-приемник симметричных и антисимметричных волн Лэмба;
- провести исследования по выявлению зависимости основных характеристик волн Лэмба, возбуждаемых ТО-излучателем, от его геометрических и энергетических параметров, теплофизических свойств и толщины листового металла.

Методика проведения исследований

Для проведения экспериментальных исследований использовалась установка, схема которой показана на рис. 1.

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

E-mail: petrovyyv@susu.ac.ru

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

E-mail: gurevichsi@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

Нагрев поверхности образца 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. Средняя мощность лазера при частоте следования импульсов 10 Гц составляет 8,5 Вт. Диаметр светового пучка 9,5 мм, его расхождение менее чем 0,7 мрад. Для регулирования мощности лазерного излучения используется оптический attenuатор в виде набора тонких плоскопараллельных стеклянных пластин, расположенных под небольшим углом к лучу лазера. Мощность лазерного излучения измеряется прибором ИМО-2Н. Изменение размеров ТО-излучателя осуществляется с помощью круглых диафрагм и собирающей линзы. Образцами служили стальные пластины размерами 270x60 мм и толщиной от 0,6 до 2,5 мм.

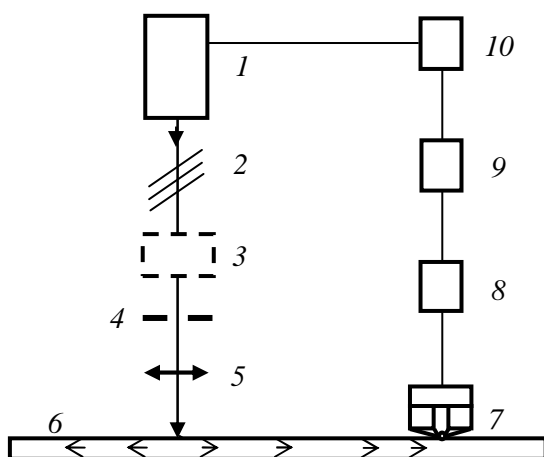


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 – лазер,
2 – оптический attenuатор,
3 – измеритель мощности,
4 – диафрагма, 5 – линза,
6 – металлическая пластина,
7 – ЭМА-приемник,
8 – усилитель тока,
9 – усилитель напряжения,
10 – цифровой осциллограф

Для регистрации возбуждаемых волн Лэмба использовался широкополосный (от 20 до 200 МГц) приемный тракт. Он состоит из последовательно соединенных ЭМА-приемника, усилителей тока, напряжения и цифрового осциллографа GDS-2202. Конструкция ЭМА-приемника обеспечивала наиболее оптимальный прием симметричных и антисимметричных ультразвуковых волн. Достигалось это необходимой ориентацией поляризующего магнитного поля относительно образца (за счет изменения формы концентраторов полюсов постоянного магнита) и расположения индуктора ЭМА-приемника.

Амплитуда, форма, длительность и частота колебаний в электрических импульсах, наблюдаемых на экране дисплея осциллографа, считаются пропорциональными соответствующим величинам в упругих импульсах. Пределы допускаемых значений относительной погрешности измеряемых величин не превышают $\pm 3\%$.

Результаты исследований и их обсуждение

1. Зависимость характеристик импульсов волн Лэмба от диаметра ТО-излучателя с постоянной мощностью теплового излучения

Мощность теплового излучения ТО-излучателя P_T связана с мощностью лазерного излучения P_λ через коэффициент отражения k . Величина этого коэффициента для большинства сталей равна примерно 60 % [7]. Для нашего случая $P_T = 0,4P_\lambda$. Лазерное излучение мощностью 7,0 Вт направлялось через диафрагму с круглым отверстием на пластину толщиной 0,6 мм. В результате на её поверхности начинает действовать ТО-излучатель с постоянной мощностью теплового излучения $P_T = 2,8$ Вт. В ходе эксперимента диаметр отверстия диафрагмы, а значит и диаметр ТО-излучателя, изменялся от 1,0 до 9,0 мм с шагом 1,0 мм.

По полученным осциллограммам были определены зависимости максимальных амплитуд, формы, длительности и частоты колебаний импульсов симметричных и антисимметричных волн Лэмба от диаметра и площади ТО-излучателя. На рис. 2 приведены графики для максимальных амплитуд. Разброс значений амплитуд может быть вызван неравномерным распределением энергии по площади ТО-излучателя, анизотропией тепловых свойств металла, а также погрешностями при аналого-цифровом преобразовании электрического импульса, подаваемого с выхода приемного тракта на вход осциллографа.

Из результатов эксперимента видно, что с увеличением диаметра (площади) ТО-излучателя амплитуды увеличиваются, но происходит это различным образом. Для диаметров от 1,0 до 3,5 мм (площадей от 0,8 до 10 мм²) темп роста амплитуд значительно больше, чем для диаметров от 3,5 до 9,0 мм (площадь от 10 до 63 мм²).

Исследование зависимости формы, длительности и частоты колебаний регистрируемого импульса от диаметра (площади) ТО-излучателя показало, что до 3,0 мм (7,1 мм²) эти характеристики существенно не изменяются. Порядок величин этих характеристик можно оценить из приведенной на рис. 3, а) осциллограммы импульса симметричных волн Лэмба, возбуждаемых ТО-излучателем диаметром 1,0 мм (площадь 0,8 мм²). Из осциллограммы следует, что длительность импульса равна 3,0 мкс, средняя частота колебаний 1,5 МГц.

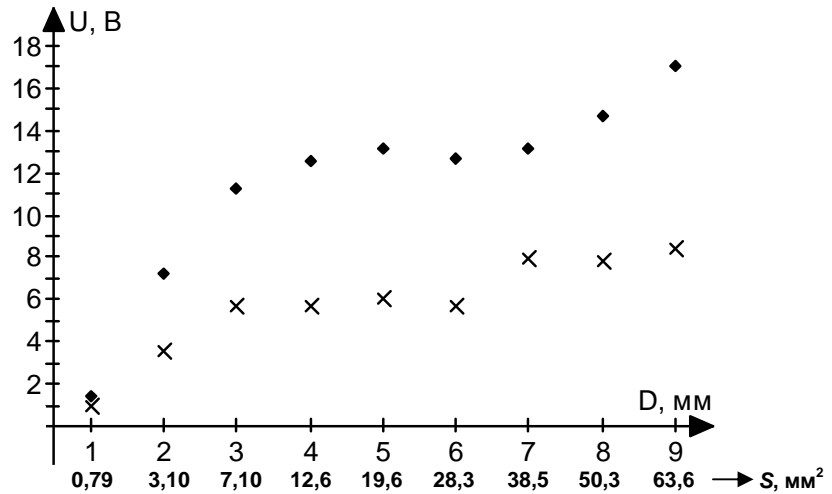


Рис. 2. Зависимость максимальных амплитуд импульсов волн Лэмба от диаметра и площади термооптического излучателя: ■ – симметричные волны; × – антисимметричные волны

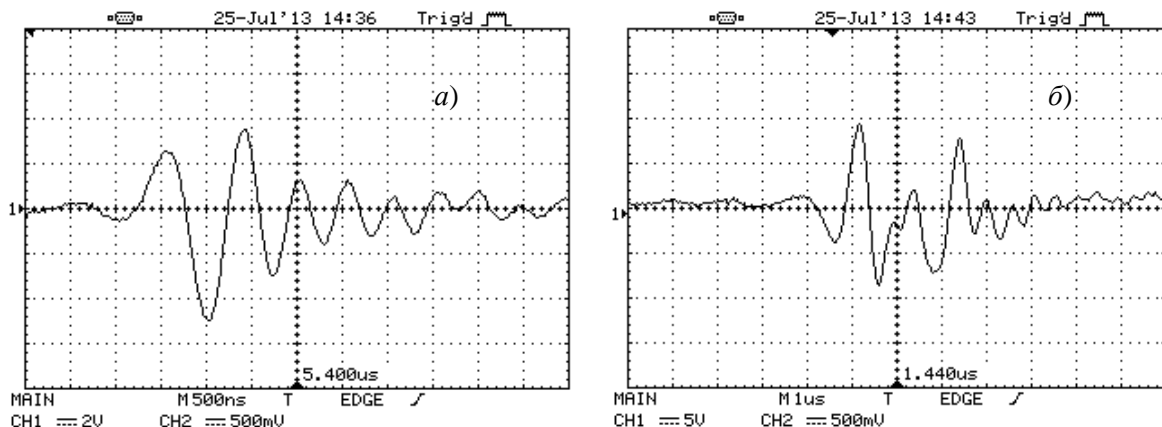


Рис. 3. Импульсы симметричных волн Лэмба, генерируемые термооптическим излучателем: а) $D = 1,0$ мм ($S = 0,8$ мм²); б) $D = 9,0$ мм ($S = 63,4$ мм²).

Дальнейшее увеличение диаметра (площади) ТО-излучателя приводит к изменениям формы и некоторых характеристик регистрируемого импульса. Так на рис. 3, б) приведена осциллограмма импульса симметричной волны Лэмба от ТО-излучателя диаметром 9,0 мм (площадь 63,6 мм²). Видно, что произошло его разделение на два разных по форме и амплитуде импульса. Длительность разделенных импульсов одинакова и равна 2,8 мкс, а средние частоты колебаний отличаются примерно в два раза (у первого 0,7 у второго 1,3 МГц). В случае, когда по каким-либо причинам разделение ультразвукового импульса нежелательно, диаметр ТО-излучателя следует выбирать не больше 3,0 мм.

2. Зависимость характеристик импульсов волн Лэмба от мощности теплового излучения ТО-излучателя с постоянным диаметром

Лазерный пучок мощностью $P_{\lambda} = 7,0$ Вт и диаметром $D = 9,5$ мм направлялся на образец через оптический attenuator. В результате на поверхности металла начинает действовать ТО-излучатель такого же диаметра. В ходе эксперимента диаметр излучателя оставался постоянным, а мощность его теплового излучения изменялась с помощью оптического attenuatorа и рассчи-

тывалась по формуле $P_T = 0,4P_\lambda^*$, где P_λ^* – мощность лазерного излучения, измеренная на выходе аттенюатора. По полученным осциллограммам были определены зависимости максимальной амплитуды, формы, длительности и частоты колебаний импульсов симметричных и антисимметричных волн Лэмба от мощности теплового излучения. На рис. 4 приведены графики такой зависимости для указанных максимальных амплитуд.

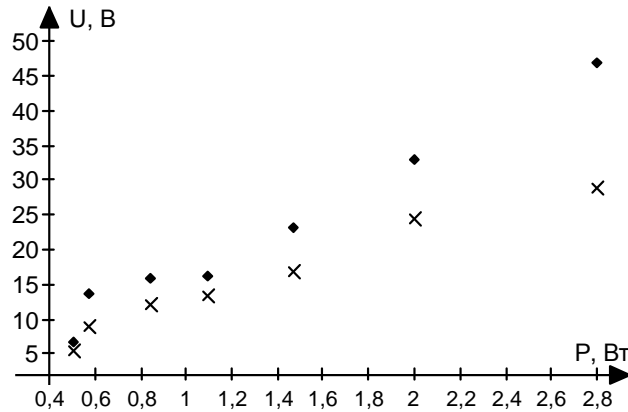


Рис. 4. Зависимость максимальных амплитуд импульсов волн Лэмба от средней тепловой мощности термооптического излучателя: ■ – симметричные волны, × – антисимметричные волны

Поскольку диаметр ТО-излучателя больше 3,0 мм, то, как было отмечено ранее, ЭМА-приемник регистрирует раздвоенный акустический импульс. Результаты, отраженные на рис. 4, относятся к максимуму первого импульса. Из графиков следует, что полученные зависимости почти линейные: чем больше тепловая мощность, тем больше амплитуды. Однако темп амплитуд при минимальных (до 0,6 Вт) и максимальных мощностях (0,6 до 2,8 Вт) значительно отличаются друг от друга. На рис. 5 приведена осциллограмма импульсов симметричной и антисимметричной волн Лэмба возбужденных ТО-излучателем с максимальной тепловой мощностью – 2,8 Вт.

Как следует из осциллограммы, длительность и средняя частота колебаний в первом акустическом импульсе равны соответственно 2,8 мкс и 0,7 МГц. Эти же величины во втором импульсе равны соответственно 3,0 мкс и 1,3 МГц. С уменьшением мощности теплового излучения значение этих параметров не изменялось.

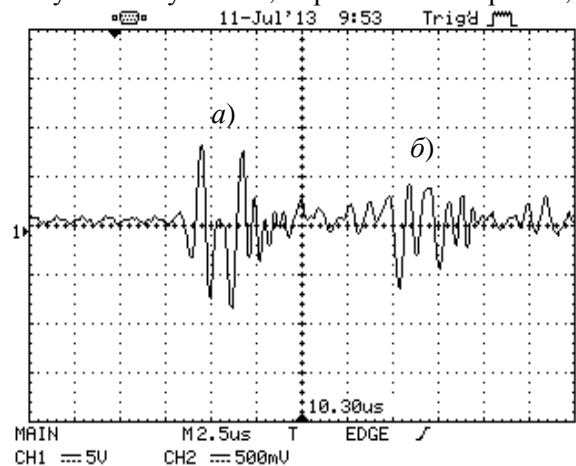


Рис. 5. Импульсы волн Лэмба, возбуждаемые термооптическим излучателем, тепловая мощность которого 2,8 Вт, $D = 9,5$ мм: а) симметричные волны; б) антисимметричные волны

3. Зависимость характеристик импульсов волн Лэмба от поверхностной плотности мощности теплового излучения ТО-излучателя

Лазерное излучение мощностью $\langle P_\lambda \rangle = 0,28$ Вт направлялось через собирающую линзу с фокусом 12,0 см на металлическую пластину. В результате, на поверхности пластины начинает действовать ТО-излучатель, диаметр которого определяется расстоянием между линзой и поверхностью образца. Перемещением линзы в пределах двойного фокусного расстояния формировались ТО-излучатели с диаметрами от 0,5 до 4,5 мм с шагом 0,5 мм. Измерение диаметров проводилось с помощью светочувствительной бумаги и микрометра. Средняя поверхностная плотность мощности теплового излучения рассчитывалась по формуле

$$\langle q \rangle = \frac{\langle P_T \rangle}{(\pi D^2 / 4) \cdot \tau \cdot \nu} = \frac{1,6 \cdot \langle P_\lambda \rangle}{\pi D^2 \cdot \tau \cdot \nu},$$

здесь D – диаметр ТО-излучателя, τ и ν соответственно длительность и частота лазерных импульсов. Потери световой энергии при прохождении лазерного луча через линзу не учитывались.

По полученным осциллограммам были найдены зависимости характеристик симметричных и антисимметричных волн Лэмба от средней поверхностной плотности мощности теплового излучения $\langle q \rangle$. На рис. 6 приведены графики зависимости максимальных амплитуд упругих смещений от $\ln \langle q \rangle$. Логарифмическая шкала выбрана по причине резкого возрастания величины $\langle q \rangle$ при уменьшении диаметра излучателя. Анализ полученной зависимости удобнее проводить вместе с экспериментальным графиком, приведенным на рис. 7.

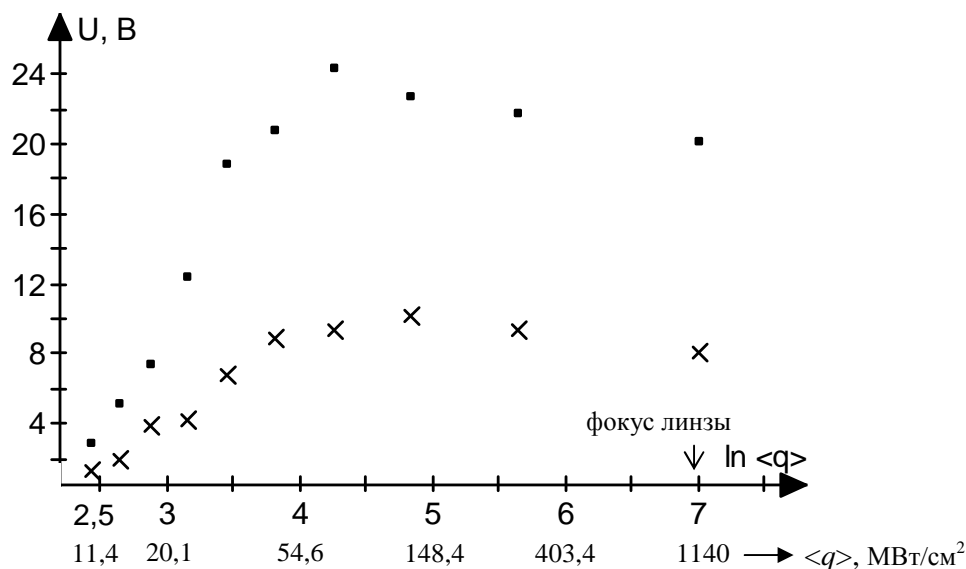


Рис. 6. Зависимость максимальных амплитуд импульсов волн Лэмба, возбуждаемых термооптическим излучателем, от его средней поверхностной плотности тепловой мощности: ■ – симметричные волны, × – антисимметричные волны

Из результатов эксперимента следует, что изменение амплитуд в зависимости от $\langle q \rangle$ и диаметра ТО-излучателя почти симметрично относительно фокуса линзы. По этой причине формировать ТО-излучатели на поверхности образца с помощью линзы можно как до, так и после её фокуса. Максимумы упругих смещений в импульсах волн Лэмба при данной мощности лазерного импульса достигаются при значении поверхностной плотности мощности теплового излучения 126,8 МВт/см². Это соответствует диаметру ТО-излучателя 2,0 мм.

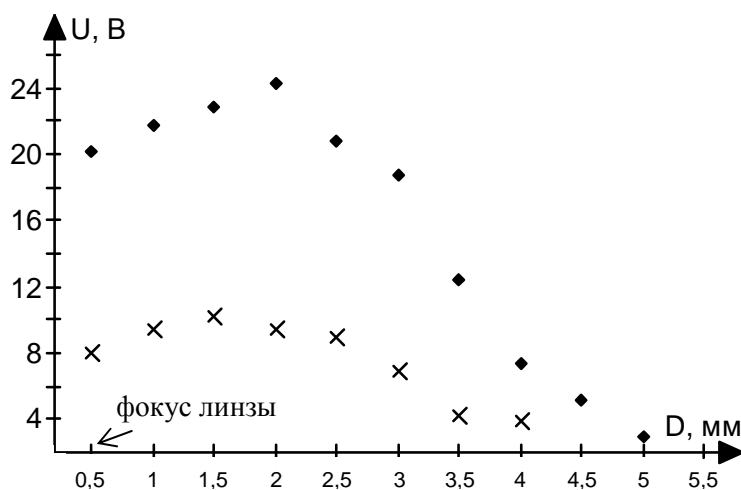


Рис. 7. Зависимость максимальных амплитуд импульсов волн Лэмба, возбуждаемых термооптическим излучателем, от его диаметра: ■ – симметричные волны, × – антисимметричные волны

Увеличение плотности мощности теплового излучения до максимальной (1140 МВт/см²) или уменьшение диаметра ТО-излучателя до минимального (0,5 мм), снижает амплитуду смещений примерно на 18 %. Причина этого заключается в том, что в механизм лазерной генерации ультразвука включается испарительный процесс и возникающая при этом плазма экранирует поверхность образца от лазерного излучения. Как следует из опыта, при этом начинается заметное разрушение поверхности образца.

Зависимость амплитуды смещений от диаметра ТО-излучателя является довольно критичной. Так, его увеличение от 2,0 мм до 4,0 мм приводит к уменьшению амплитуды в три раза. Это соответствует уменьшению $\langle q \rangle$ от 71 до 18 МВт/см². Таким образом, для целей дефектоскопии наиболее оптимальной для ТО-излучателя является поверхностная плотность мощности теплового излучения $\langle q \rangle$ от 32 до 71 МВт/см². Это соответствует его диаметру от 2,0 до 3,0 мм.

На рис. 8 приведены зависимости длительности τ импульсов волн Лэмба и средней частоты $\langle \nu \rangle$ колебаний в них от средней поверхностной плотности мощности теплового излучения $\langle q \rangle$ ТО-излучателя. Анализ полученных зависимостей удобнее проводить вместе с экспериментальными графиками, приведенными на рис. 9.

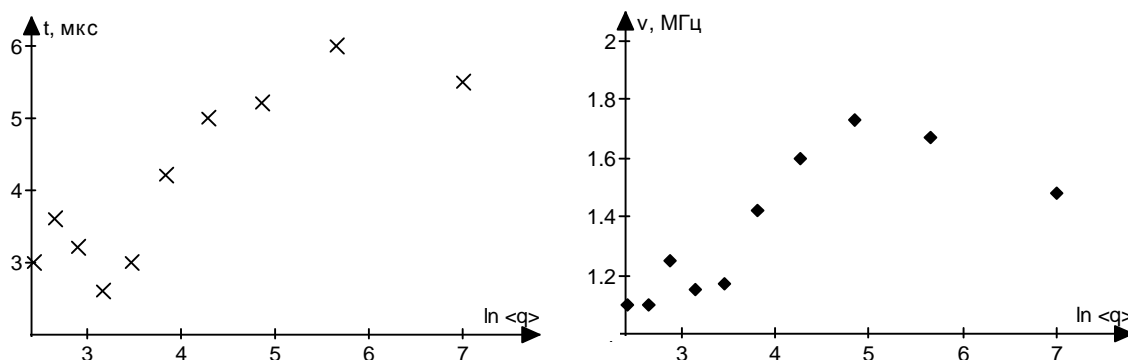


Рис. 8. Зависимость параметров импульсов симметричных волн Лэмба, возбуждаемых термооптическим излучателем, от его поверхностной плотности тепловой мощности: x – длительность, ■ – средняя частота колебаний

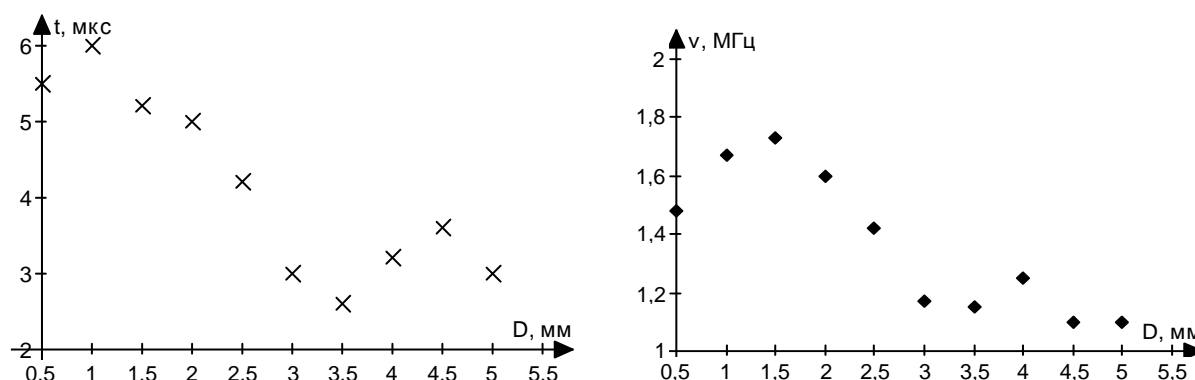


Рис. 9. Зависимость параметров импульсов симметричных волн Лэмба возбуждаемых термооптическим излучателем, от его диаметра: x — длительность импульса, ■ – средняя частота колебаний

Видно, что с увеличением $\langle q \rangle$ (уменьшением диаметра ТО-излучателя) частота колебаний в упругих импульсах и их длительность увеличиваются. Излучатели с $\langle q \rangle =$ от 20,0 до 55,0 МВт/см² (диаметром $3 \pm 0,5$ мм) генерируют короткие импульсы. Частота колебаний в этих импульсах минимальна. Импульсы, генерируемые ТО-излучателями с $\langle q \rangle =$ от 90,0 до 1140 МВт/см² (диаметром $1 \pm 0,5$ мм), имеют наибольшие длительность и частоту. На рис. 10 приведены осциллограммы соответствующих импульсов.

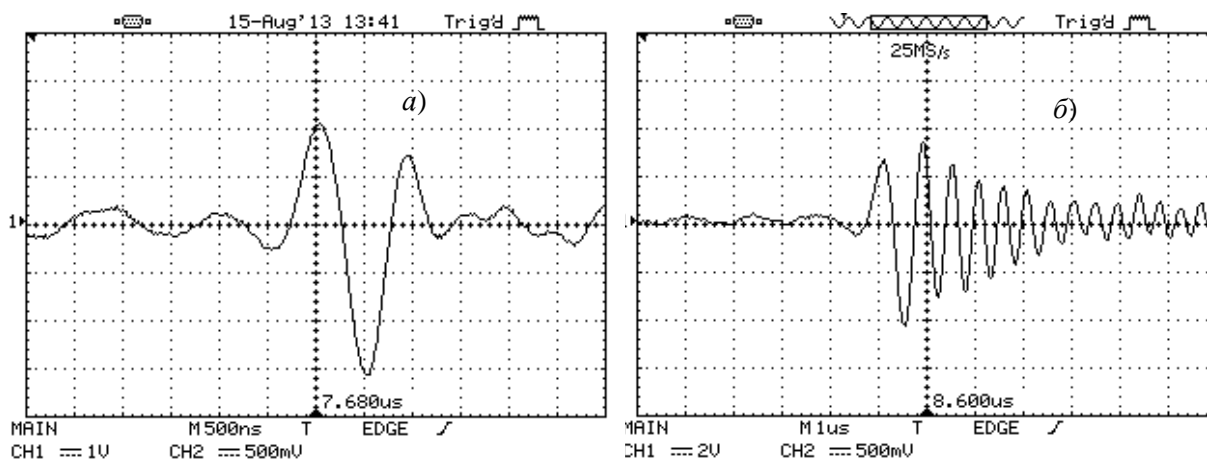


Рис. 10. Импульс симметричной волны Лэмба, возбуждаемый термооптическим излучателем:
а) $\langle q \rangle = 32 \text{ МВт/см}^2$, $(D = 3,0 \text{ мм})$; б) $\langle q \rangle = 1140 \text{ МВт/см}^2$, $D = 0,5 \text{ мм}$

Выводы

1. Разработан, изготовлен и испытан в лабораторных условиях широкополосный ЭМА-приемник симметричных и антисимметричных ультразвуковых волн Лэмба, обладающий достаточной для практических целей чувствительностью и надежностью.

2. С помощью ЭМА-приемника проведены исследования по выявлению зависимостей основных характеристик волн Лэмба, генерируемых в металлических пластинах ТО-излучателем – нагретой частью металла в зоне поглощения наносекундных лазерных импульсов:

- от диаметра ТО-излучателя при его постоянной мощности теплового излучения;
- от мощности теплового излучения ТО-излучателя при его постоянном диаметре;
- от поверхностной плотности мощности теплового излучения ТО-излучателя.

3. Из полученных результатов, в зависимости от поставленных задач, выработаны рекомендации по выбору оптимальных геометрических и энергетических параметров ТО-излучателя ультразвука при создании приборов для контроля качества тонких металлоизделий. Базой таких приборов служит импульсный лазер, с помощью которого формируется ТО-излучатель и широкополосный ЭМА-приемник.

Литература

1. Анализ ультразвуковых волн, возбуждаемых в металлической пластине лазерными импульсами наносекундной длительности / С.Ю. Гуревич, Ю.В. Петров, А.В. Шушарин, Е.В. Голубев // Дефектоскопия. – 2009. – № 4. – С. 35–40.
2. Шушарин, А.В. Экспериментальное исследование волн Лэмба при лазерной генерации / А.В. Шушарин // Дефектоскопия. – 2009. – № 10. – С. 4–15.
3. Петров, Ю.В. Экспериментальное определение параметров волн Лэмба при их лазерной генерации / Ю.В. Петров, С.Ю. Гуревич, Е.В. Голубев // Дефектоскопия. – 2010. – № 3. – С. 45–49.
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. 3–8.
5. Петров, Ю.В. Экспериментальное исследование ультразвуковых волн, возбуждаемых в металле лучом лазера / Ю.В. Петров, А.В. Шушарин // Дефектоскопия. – 1994. – № 8. – С. 90–92.
6. Викторов, И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Релея и Лэмба в технике / И.А. Викторов. – М.: Наука, 1966. – 168 с.
7. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1005 с.

Поступила в редакцию 20 мая 2014 г.

THE TRANSMITTER AND ULTRASOUND RECEIVER FOR NON-CONTACT QUALITY CONTROL OF THIN-SHEET METAL PRODUCTS

Yu.V. Petrov¹, S.Yu. Gurevich², E.V. Golubev³

A broadband EMA receiver with symmetric and antisymmetric ultrasound Lamb waves with sufficient for practical purposes sensitivity and reliability was designed, manufactured and tested in the laboratory.

Research has been conducted to identify dependences of main characteristics of ultrasonic Lamb waves excited in metal plates on geometrical and energy parameters of thermal-optic emitter (TO) – the heated zone of the metal surface during its radiation by nanosecond optical pulses.

According to the research and based on the tasks, recommendations were made to select optimal geometric and energy parameters of the TO ultrasound emitter in creating devices for the quality control of thin-sheet metal products. The basis of such devices is a pulsed laser which enables to produce a TO transmitter and a wideband EMA receiver.

Keywords: ultrasonic Lamb waves; laser excitation; the thermo-optical transducer; broadband EMA receiver.

References

1. Gurevich S.Yu., Petrov Yu.V., Shusharin A.V., Golubev E.V. Analysis of ultrasonic waves excited in a metal plate by nanosecond laser pulses. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2009. Vol. 45, no. 4. pp. 247–251. doi: 10.1134/S1061830909040044.
2. Shusharin A.V. *Defektoskopiya*. 2009. no. 10. pp. 4–15. (in Russ.).
3. Petrov Yu.V., Gurevich S.Yu., Golubev E.V. Experimental determination of parameters of laser-generated Lamb waves. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2010. Vol. 46, no. 3. pp. 185–188. doi: 10.1134/S1061830910030058.
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. Petrov Yu.V., Shusharin A.V. *Defektoskopiya*. 1994. no. 8. pp. 90–92. (in Russ.).
6. Viktorov I.A. *Fizicheskie osnovy primeneniya ul'trazvukovykh voln Releya i Lemba v tekhnike* (Physical Fundamentals of Applying Rayleigh and Lamb Ultrasonic Waves in Engineering). Moscow, Nauka Publ., 1966. 168 p. (in Russ.).
7. Kikoin I.K. (ed.) *Tablitsy fizicheskikh velichin. Spravochnik* (Tables of physical quantities. A handbook). Moscow, Atomizdat Publ., 1976. 1005 p. (in Russ.).

Received 20 May 2014

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

E-mail: petrovvv@susu.ac.ru

² Gurevich Sergei Yurevich is Dr. Sc. (Engineering), Professor, General and Experimental Physics Department, South Ural State University.

E-mail: gurevichsi@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