

УДК 534-8 + 620.179.16

ИЗЛУЧАТЕЛЬ И ПРИЕМНИК УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТОНКОЛИ- СТОВЫХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

С.Ю. Гуревич, Е.В. Голубев, Ю.В. Петров

Проведены исследования по выявлению зависимости основных характеристик ультразвуковых волн Лэмба, возбуждаемых в металлических пластинах «термо-оптическим» излучателем от его геометрических и энергетических параметров. В качестве «термо-оптического» излучателя ультразвука принят нагретый под действием коротких лазерных импульсов участок поверхности металла. Для регистрации возбуждаемых волн Лэмба разработан и изготовлен широкополосный ЭМА-приемник. Полученные результаты исследования рекомендуется использовать при создании приборов для бесконтактного ультразвукового контроля качества тонких металлоизделий.

Ключевые слова: у.з. волны Лэмба, лазерное возбуждение, термо-оптический 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. Эффективность такого контроля можно существенно повысить, если использовать бесконтактные способы возбуждения и приема ультразвука. Наиболее перспективным из них является генерация волн Лэмба в изделии с помощью наносекундных лазерных импульсов и их регистрация электромагнитно-акустическим (ЭМА) приемником [1–4].

При облучении наносекундными лазерными импульсами листовых металлоизделий нагретая часть поверхности металла становится источником ультразвуковых волн Лэмба. Эффективность такого термо-оптического излучателя (в дальнейшем – ТО-излучатель) определяется теплофизическими свойствами металла, его толщиной и поверхностной плотностью мощности теплового излучения, которая, в свою очередь, зависит от мощности лазерного излучения. Перечисленные параметры ТО-излучателя определяют тип возбуждаемых волн Лэмба, величину амплитуды, форму и длительность ультразвуковых импульсов, а также частоту их заполнения.

В работах [4, 5] бесконтактная регистрации ультразвуковых волн, возбуждаемых в пластине лазерными импульсами, осуществлялась ЭМА-приемником объемных волн. Можно существенно повысить чувствительность такого приемника, если учесть 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.

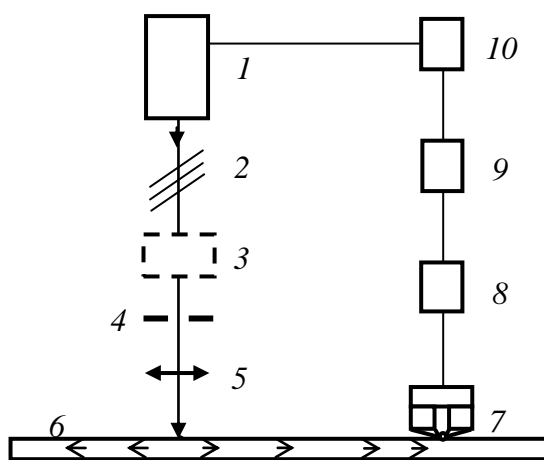


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – лазер,
- 2 – оптический аттенюатор,
- 3 – измеритель мощности,
- 4 – диафрагма, 5 – линза,
- 6 – металлическая пластина,
- 7 – ЭМА-приемник,
- 8 – усилитель тока,
- 9 – усилитель напряжения,
- 10 – цифровой осциллограф

Она состоит из импульсного лазера 1, оптического аттенюатора 2, измерителя мощности лазерного излучения 3, диафрагмы 4, фокусирующей линзы 5, исследуемых образцов в виде металлических пластин 6, ЭМА-приемника волн Лэмба 7, усилителя тока 8, усилителя напряжения 9, цифрового осциллографа 10.

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 аттенюатор 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 металлические (ферромагнитные и неферромагнитные) пластины размерами 270x60 мм и толщиной от 0,6 до 2,5 мм.

Для регистрации возбуждаемых волн Лэмба использовался широкополосный (от 20 до 200 МГц) приемный тракт, состоящий из последовательно соединенных ЭМА-приемника, усилителей тока, напряжения и цифрового осциллографа. Конструкция ЭМА-приемника обеспечивала наиболее оптимальный прием симметричных и антисимметричных ультразвуковых волн. Достигалось это соответствующей ориентацией поляризирующего магнитного поля относительно образца (за счет изменения формы концентраторов полюсов постоянного магнита) и расположения высокочастотного индуктора в этом поле. Амплитуда, форма, длительность и частота колебаний в электрических импульсах, наблюдаемых на экране дисплея осциллографа, считаются пропорциональными соответствующим величинам в импульсах волн Лэмба.

Результаты исследований и их обсуждение

1. Зависимость характеристик импульсов волн Лэмба от диаметра и площади ТО-излучателя при его постоянной мощности 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]. Тогда для нашего случая:

$$P_T = 0,4 \cdot P_\lambda.$$

Лазерный луч мощностью 7,0 Вт направлялся 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 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, форма, длительность и частота 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 с разными скоростями. 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 65 мм²). Кроме того, из графиков следует, что для получения волн Лэмба достаточно большой амплитуды, диаметр ТО-излучателя должен быть не менее 4,0 мм.

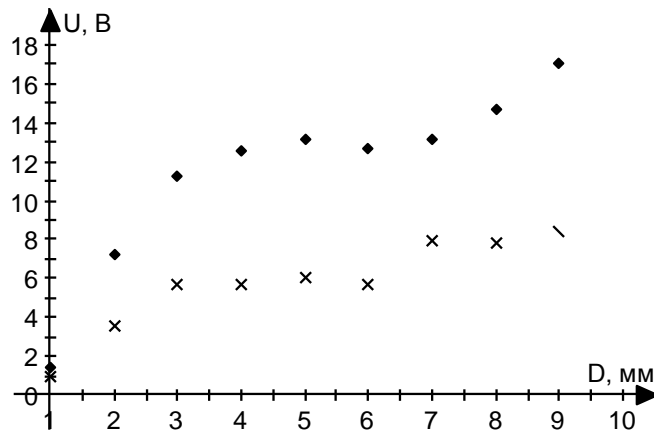


Рис. 2. Зависимость максимальных амплитуд импульсов волн Лэмба от диаметра «термо-акустического» излучателя.

Мощность лазерного излучения 7,0 Вт:

— ■ — симметричные волны, — × — антисимметричные волны

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

Дальнейшее увеличение диаметра (площади) ТО-излучателя приводит к изменениям формы и некоторых характеристик регистрируемого импульса. 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 отличается примерно в два раза (у первого 0,7 у второго 1,3 МГц). В случае, когда по каким-либо причинам разделение ультразвукового импульса нежелательно, то диаметр ТО-излучателя не должен превышать 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 9,5 мм, направлялся на образец через оптический аттенюатор. В результате на поверхности металла начинает действовать ТО-излучатель такого же диаметра. В ходе эксперимента диаметр оставался постоянным, а мощность теплового излучения изменялась с помощью оптического аттенюатора. Ее величина рассчитывалась по формуле:

$$P_T = 0,4 \cdot P_\lambda^*$$

где P_λ^* – мощность лазерного излучения, измеренная на выходе аттенюатора. По полученным осциллограммам были определены зависимости макси-

мальной амплитуды, формы, длительности и частоты колебаний импульсов симметричных и антисимметричных волн Лэмба от мощности теплового излучения ТО-излучателя. На рис. 4 приведены графики такой зависимости для максимальных амплитуд симметричных волн. Поскольку диаметр ТО-излучателя больше 3,0 мм, то 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, скорости роста 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 от ТО-излучателя с максимальной тепловой мощностью – 2,8 Вт. Видно, что 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. По мере уменьшения мощности теплового излучения, значение этих параметров не изменялось.

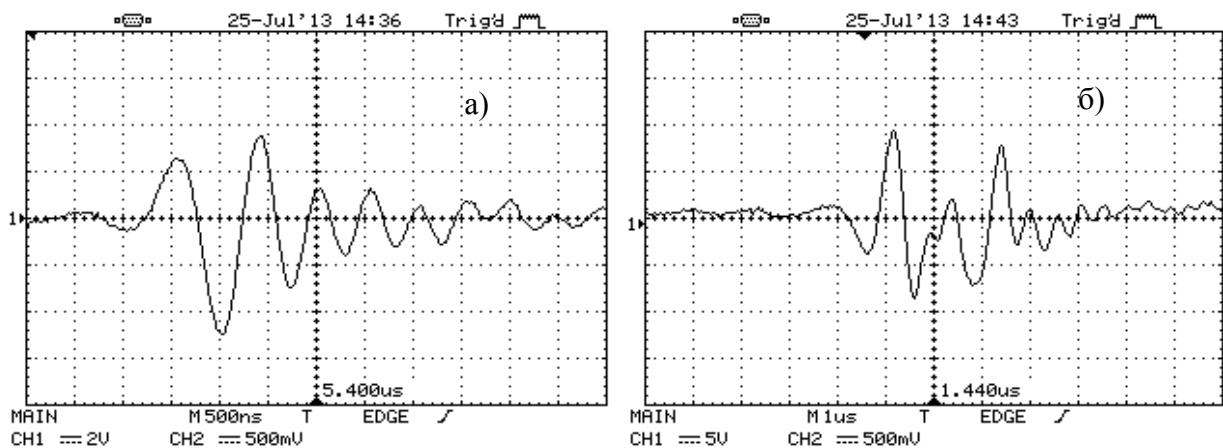


Рис. 3. Импульсы симметричных волн Лэмба генерируемые термо-оптическим излучателем:

а) $D = 1,0$ мм ($S = 0,8$ мм²); б) $D = 9,0$ мм ($S = 63,4$ мм²)

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

Лазерный луч мощностью $\langle P_\lambda \rangle = 0,28$ Вт направлялся на металлическую пластину через собирающую линзу с фокусным расстоянием $F = 12,0$ см. 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 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.

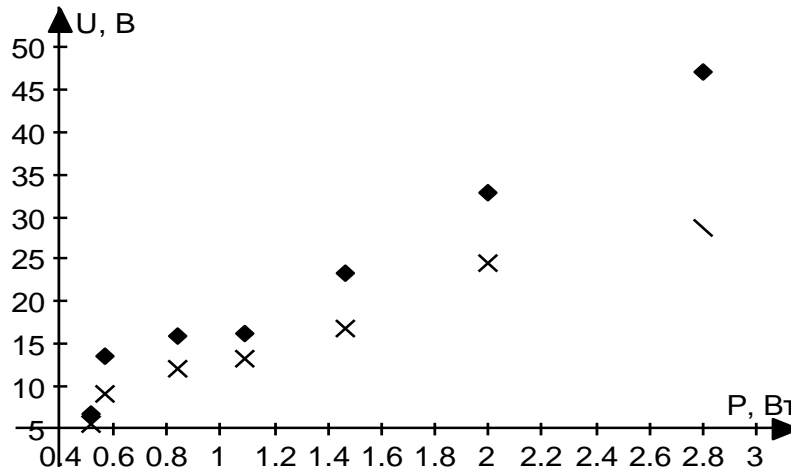


Рис. 4. Зависимость максимальных амплитуд импульсов волн Лэмба от средней тепловой мощности «термо-акустического» излучателя:
— ■ — симметричные волны, — × — антисимметричные волны

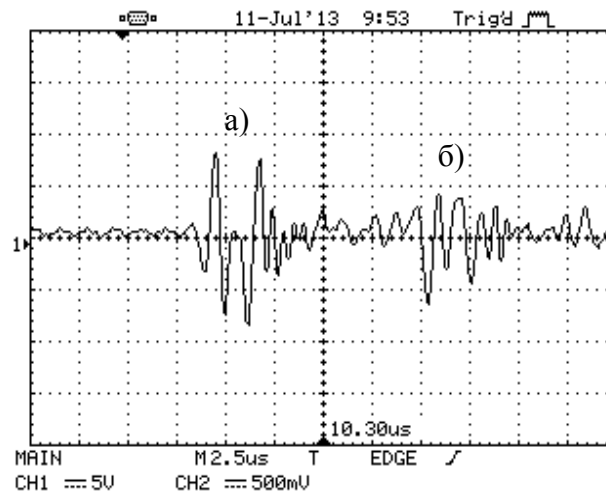


Рис. 5. Импульсы волн Лэмба, генерируемые «термо-оптическим» излучателем, тепловая мощность которого 2,8 Вт ($D = 9,5$ мм):
а) – симметричные волны; б) – антисимметричные волны

По полученным осциллограммам были найдены зависимости характеристик симметричных и антисимметричных волн Лэмба от средней по-

верхностной 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.

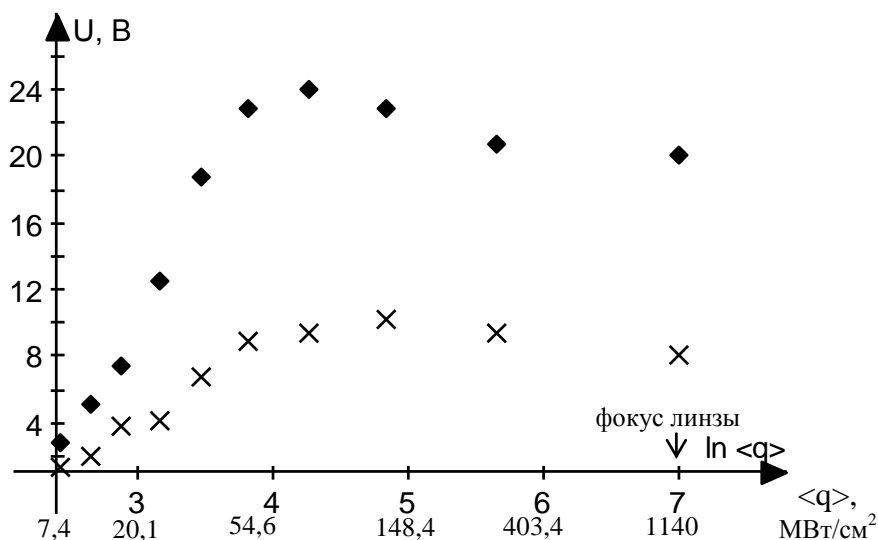


Рис. 6. Зависимость максимальных амплитуд импульсов волн Лэмба от средней поверхностной плотности тепловой мощности «термо-оптического» излучателя. Мощность лазерного излучения 0,28 Вт:
— ■ — симметричные волны, — × — антисимметричные волны

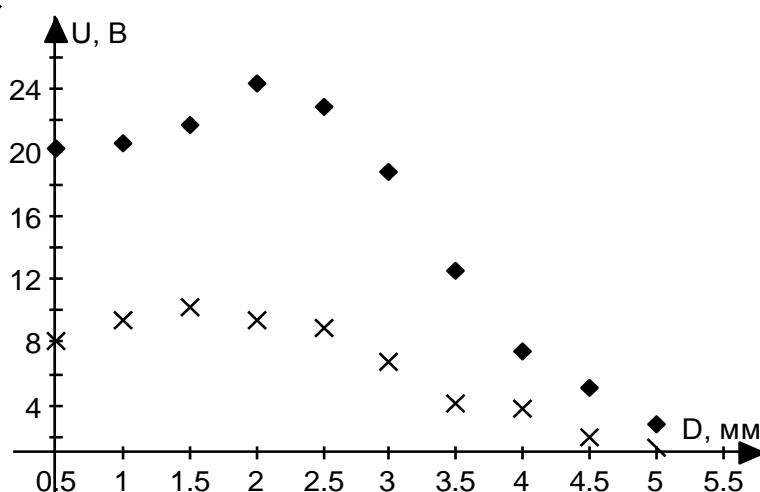


Рис. 7. Зависимость максимальных амплитуд импульсов волн Лэмба от диаметра «термо-оптического» излучателя.

Из результатов эксперимента следует, что изменение амплитуд в зависимости от $\ln \langle q \rangle$ 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 $126,8 \text{ МВт/см}^2$. Это соответствует диаметру ТО-излучателя $2,0 \text{ мм}$. Увеличение плотности мощности теплового излучения до максимальной (1140 МВт/см^2) или уменьшение диаметра ТО-излучателя до минимального ($0,5 \text{ мм}$), 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 $2,0 \text{ мм}$ до $4,0 \text{ мм}$ приводит к уменьшению амплитуды в три раза. Это соответствует уменьшению $\langle q \rangle$ от 71 до 18 МВт/см^2 . Таким образом, для целей дефектоскопии наиболее оптимальной для ТО-излучателя является поверхностная плотность мощности теплового излучения $\langle q \rangle$ от 32 до 71 МВт/см^2 . Это соответствует его диаметру D от $2,0$ до $3,0 \text{ мм}$.

На рис. 8 и 9 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. 10.

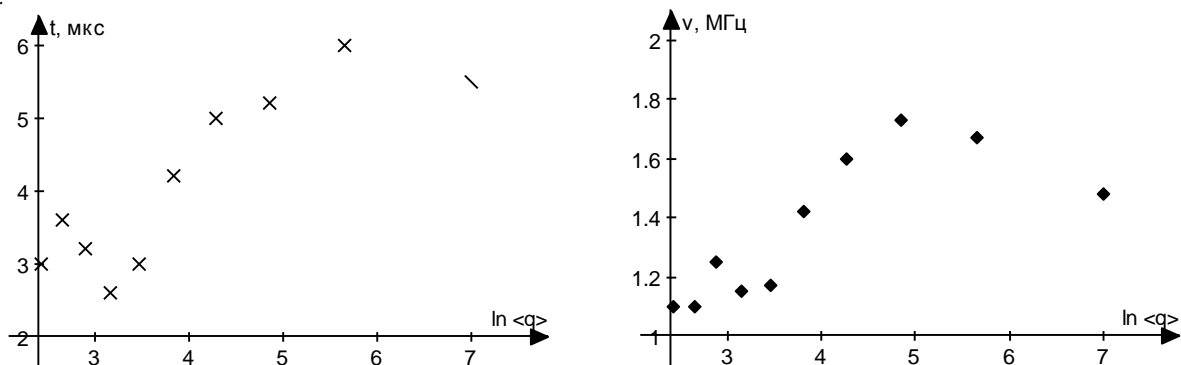
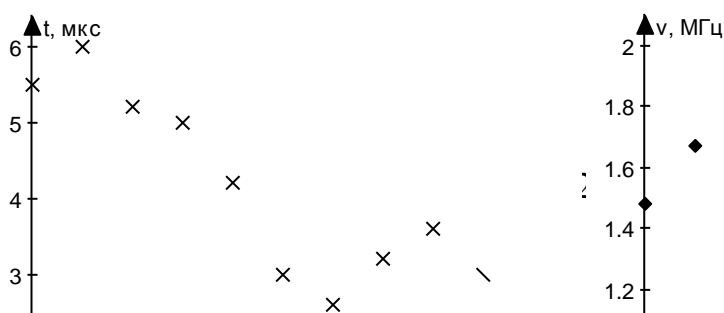


Рис. 8. Зависимость параметров импульсов симметричных волн Лэмба от поверхностной плотности тепловой мощности «термо-оптического» излучателя. Мощность лазерного излучения $0,28 \text{ Вт}$:
— \times — длительность, — \blacksquare — средняя частота колебаний



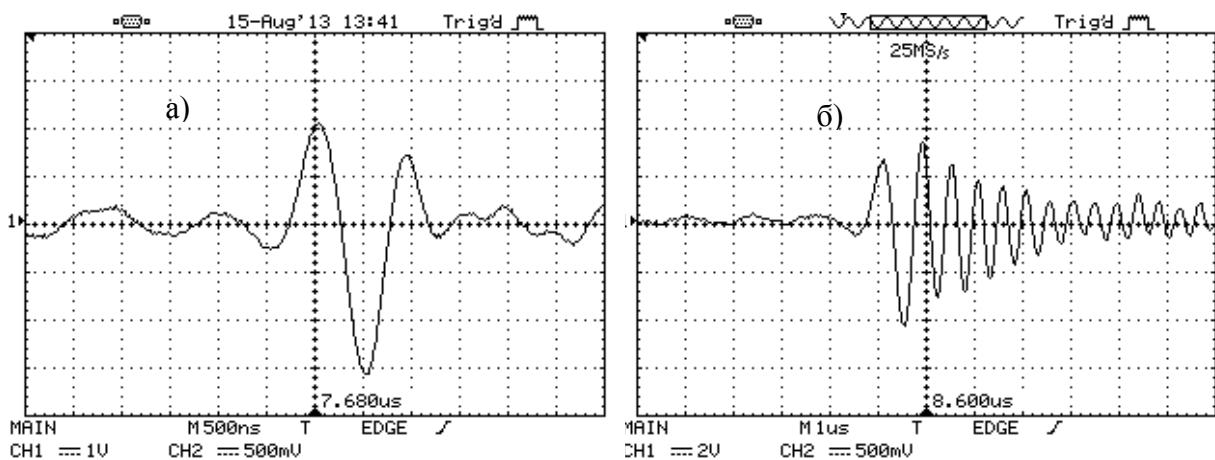


Рис. 10. Импульс симметричной волны Лэмба, генерируемый «термо-оптическим излучателем»:

а) $\langle q \rangle = 32 \text{ МВт/см}^2$, ($D = 3,0 \text{ мм}$); б) $\langle q \rangle = 1140 \text{ МВт/см}^2$, ($D = 0,5 \text{ мм}$)

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

Выводы

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

2. С помощью ЭМА-приемника проведены исследования по выявлению зависимостей основных характеристик волн Лэмба, генерируемых в ме-

таллических 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, следуют 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.

Библиографический список

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. 46–49.

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. 4–8.

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. Викторov, И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Релея и Лэмба в технике // И.А. Викторov. – М.: Наука, 1966. – 168 с.

7. Таблицы физических величин. Справочник // под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1005 с.

[К содержанию](#)

УДК 539.162 + 539.165