

ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСНОГО ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

С.Ю. Гуревич¹, Ю.В. Петров², Е.В. Голубев³, О.В. Карасев⁴

Приведены результаты экспериментального исследования по выявлению зависимости характеристик направленности импульсного лазерного термоакустического излучателя объемных ультразвуковых волн от его энергетических и геометрических параметров. Описаны экспериментальный стенд и методика измерений. Полученные результаты можно использовать при создании средств бесконтактного у.з. контроля качества металлических материалов и изделий.

Ключевые слова: лазерный термоакустический излучатель; характеристики направленности; широкополосный электромагнитоакустический приемник.

Введение

При лазерной генерации у.з. волн в металлических материалах и изделиях источником у.з. колебаний является нагреваемый световыми импульсами участок поверхности металла [1]. Как показывает опыт, эффективность работы такого лазерного импульсного термоакустического (ТА) излучателя определяется в основном мощностью его теплового излучения и направленностью. От мощности зависит интенсивность возбуждаемых у.з. волн, а от направленности – способность излучать их в одних направлениях в большей степени, чем в других.

Направленность у.з. излучателя обычно описывают характеристикой направленности. Она определяет такие его свойства как чувствительность, погрешности измерения толщины изделия, скоростей у.з. волн или координат дефектов, а также избирательность (по угловым координатам) [2]. Имеется ряд работ [3–5], в которых исследовалась характеристика направленности лазерного импульсного ТА излучателя при *термоупругом* механизме оптоакустического преобразования в металле. При повышении интенсивности возбуждаемого ультразвука за счет увеличения мощности лазерного излучения к термоупругому механизму добавляются *гидродинамический* и *испарительный* [6].

Смена механизма лазерной генерации у.з. волн может оказать существенное влияние как на направленность ТА излучателя, так и на амплитуду, форму, длительность и спектр (амплитудный и фазовый) возбуждаемых у.з. импульсов. Кроме того, в указанных работах недостаточно подробно исследован вопрос о влиянии площади ТА излучателя на его направленность и основные характеристики возбуждаемых упругих импульсов.

Таким образом, проведение исследований зависимости направленности лазерного импульсного ТА излучателя и основных характеристик возбуждаемых излучателем у.з. импульсов от его энергетических и геометрических параметров значительно ускорит внедрение лазерных бесконтактных генераторов ультразвука в практику дефектоскопии металлических материалов и изделий.

Описание экспериментальной установки. Методика проведения исследований

Для проведения экспериментальных исследований использовали установку, схема которой показана на рис. 1. Нагрев поверхности металла осуществляется импульсным лазером Nd: YAG

¹ Гуревич Сергей Юрьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация.

E-mail: gurevichsi@susu.ac.ru

² Петров Юрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, кафедра общей и экспериментальной физики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация.

E-mail: petrovuv@susu.ac.ru

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

E-mail: ev_golubev@mail.ru

⁴ Карасев Олег Викторович – заведующий лабораторией, кафедра общей и экспериментальной физики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация.

Brilliant-B фирмы QUANTEL с модулированной добротностью. Длина волны лазерного излучения – 1064 нм, длительность лазерных импульсов от 4 до 6 нс, их энергия 0,85 Дж. Диаметр лазерного пучка – 9,5 мм, его расхождение – менее чем 0,7 мрад.

Для регулирования и измерения параметров лазерного излучения использовали оптический аттенуатор и прибор ИМО-2Н. Изменение формы и размеров ТА излучателя осуществляли с помощью диафрагм. В качестве образцов, в которых возбуждаются объемные у.з. волны, использовали полудиски из железоникелевого сплава 32НКД и дюралюминиевого сплава Д-16Т. Диаметр и толщина полудисков равны, соответственно, 220 и 50 мм. На боковой поверхности образцов нанесена шкала углов излучения θ с ценой наименьшего деления 5° . Отсчет углов ведется в обе стороны от нормали к центру основания диска.

Для регистрации возбуждаемых у.з. волн использовали широкополосный (от 0,5 до 60 МГц) приемный тракт. Он состоит из последовательно соединенных электромагнитного (ЭМА) приемника, усилителей тока, напряжения и широкополосного цифрового осциллографа GDS-2202. Конструкция ЭМА приемника может обеспечивать наиболее оптимальный прием как продольных, так и поперечных у.з. волн [7]. В осциллографе осуществляли цифровое запоминание регистрируемых ЭМА приемником электрических импульсов, автоматическую

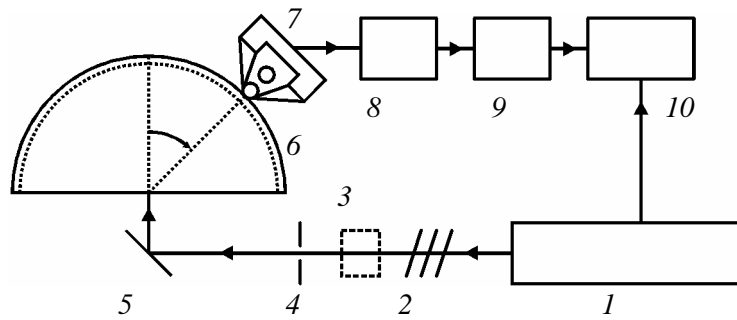


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 – лазер, 2 – оптический аттенуатор, 3 – измеритель мощности лазерного излучения, 4 – диафрагма, 5 – полупрозрачное зеркало, 6 – металлический полудиск со шкалой углов излучения, 7 – ЭМА приемник, 8 – усилитель тока, 9 – усилитель напряжения, 10 – цифровой осциллограф

установку их изображений, автоматическое измерение амплитудно-временных параметров, быстрое преобразование Фурье (БПФ) с выводом результатов на экран дисплея.

На рис. 2 приведена одна из осциллограмм зарегистрированного ЭМА приемником электромагнитного импульса и его амплитудно-частотного спектра при лазерной термоакустической генерации продольных волн в железоникелевом полудиске. Угол излучения ультразвука 0° , средняя мощность лазерных импульсов 7,0 Вт, площадь ТА излучателя – 70,9 мм². Считается, что наблюдаемые и измеряемые на экране осциллографа форма, амплитуда, длительность и спектры электромагнитных импульсов пропорциональны соответствующим величинам в возбуждаемых у.з. импульсах. Предел допускаемых значений относительной погрешности измеряемых величин не превышает $\pm 3\%$.

Результаты исследований и их обсуждение

В качестве образца был выбран железоникелевый полудиск. Лазерное излучение средней мощности $\langle P_T \rangle = 7,0$ Вт с частотой 10,0 Гц направляли в центр основания полудиска. В ходе опыта использовали диафрагму с отверстием, диаметр которого изменяли от 8,0 мм до 1,0 мм с шагом 1,0 мм. При этом соответственно изменялись площадь S и средняя мощность $\langle P_T \rangle$ теплового излучения ТА излучателя.

Таким образом, в первом приближении можно считать, что на поверхности металла действует ТА излучатель со средней мощностью теплового излучения

$$\langle P_T \rangle \approx \langle P_\lambda \rangle (1-k) \frac{S^*}{S},$$

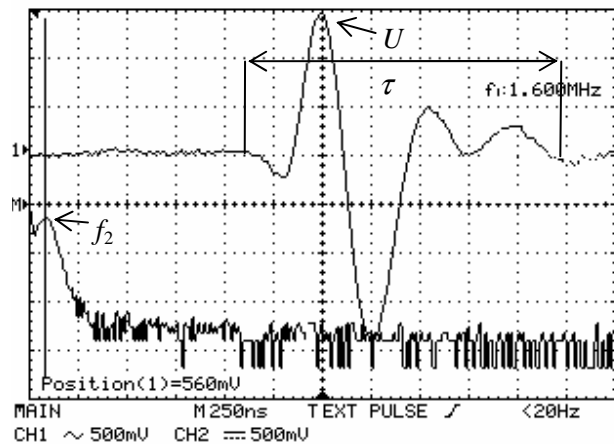


Рис. 2. Осциллограмма электромагнитного импульса и его амплитудно-частотного спектра, зарегистрированного ЭМА приемником. Цена делений масштабной сетки дисплея: по вертикали – CH1 = 500 mV, по горизонтали – M = 250 ns, U – максимальная амплитуда, τ – длительность импульса, f_2 – частота, на которую приходится максимум спектра импульса

где $S^* = \pi D^2 / 4$ – площадь ТА излучателя, $D = 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,5$ мм – его диаметр, $k = 0,6$ – коэффициент отражения лазерного излучения от металла, $S = 70,9 \text{ мм}^2$ – площадь сечения лазерного луча. Средняя поверхностная плотность мощности теплового излучения ТА излучателей оценивалась по формуле

$$\langle q \rangle = \frac{\langle P_T \rangle}{S^* \nu \tau} = \frac{\langle P_\lambda \rangle}{S \nu \tau} (1 - k),$$

где $\tau = 5,0$ нс, $\nu = 10,0$ Гц – длительность и частота следования лазерных импульсов. Подставив числовые значения, получим

$$\langle q \rangle = \frac{7,0 \cdot}{70,9 \cdot 5 \cdot 10^{-9} \cdot 10} (1 - 0,6) = 7,9 \cdot 10^5 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2} \right) = 79 \left(\frac{\text{МВт}}{\text{см}^2} \right).$$

ЭМА приемник, настроенный на регистрацию продольных волн, перемещался по средней линии поверхности полудиска от 0° с шагом 5° до 80° шкалы углов излучения. В результате по полученным осциллограммам были определены как функции площади ТА излучателя:

- характеристики направленности (зависимости максимальной амплитуды у.з. импульса от угла излучения);
- ширина основного «лепестка» характеристики направленности по уровню 0,7;
- форма и длительность у.з. импульса для разных углов излучения.

Кроме того, с помощью БПФ была исследована зависимость амплитудно-частотного спектра у.з. импульсов, возбуждаемых ТА излучателями разной площади S , от угла излучения. Основные результаты исследований отображены на рис. 3–8.

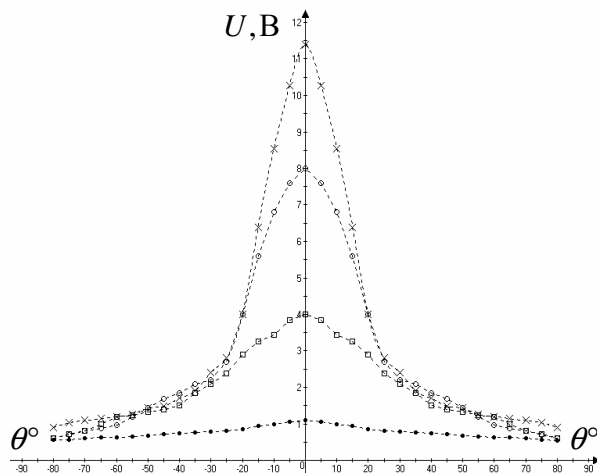


Рис. 3. Характеристики направленности лазерного ТА излучателя продольных волн площадью: $\Delta\theta^\circ$ – $70,9 \text{ мм}^2$; \circ – $28,3 \text{ мм}^2$; \square – $12,6 \text{ мм}^2$; \bullet – $3,1 \text{ мм}^2$

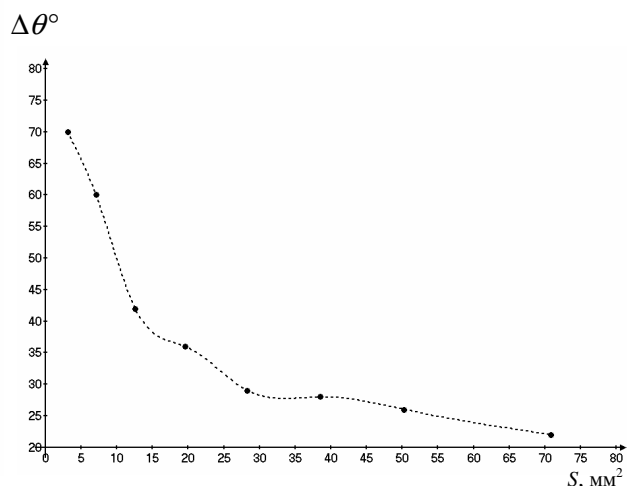


Рис. 4. Зависимость ширины основного «лепестка» $\Delta\theta^\circ$ характеристики направленности ТА излучателя от его площади S

На рис. 3 представлены некоторые результаты экспериментального определения характеристик направленности лазерного импульсного ТА излучателя продольных волн в зависимости от его площади. Из рисунка следует, что излучение у.з. волн сосредоточено в пределах одного (основного) «лепестка» характеристики направленности и его максимум направлен по нормали к центру поверхности ТА излучателя. Боковые «лепестки» характеристик направленности практически отсутствуют. С увеличением площади отчетливо проявляется более эффективное распределение энергии у.з. колебаний (рост амплитуды, уменьшение углов излучения.). Это подтверждается рис. 4, на котором приведена зависимость ширины основного «лепестка» (по уровню 0,7 от максимальной амплитуды) характеристики направленности ТА излучателя от его площади. По мере увеличения площади ширина «лепестка» уменьшается по зависимости, напоминающей экспоненциальную. Для площадей от $3,0$ до $30,0 \text{ мм}^2$ эта «экспонента» более крутая, чем для площадей более $30,0 \text{ мм}^2$.

На рис. 5 представлена зависимость наибольшей амплитуды у.з. импульса от площади ТА излучателя в максимуме основного «лепестка», то есть при угле излучения у.з. волн, равном ну-

лю. Видно, что с увеличением площади амплитуда монотонно увеличивается по экспоненте, но темп её роста разный: для площадей от 3,0 до 30,0 мм² он значительно больше, чем для площадей больших 30,0 мм².

На рис. 6 приведена зависимость длительности у.з. импульса продольных волн, возбуждаемых ТА излучателем разной площади, от угла излучения. Из графиков следует, что, независимо от величины площади ТА излучателя, длительность импульса с увеличением угла излучения растет практически линейно.

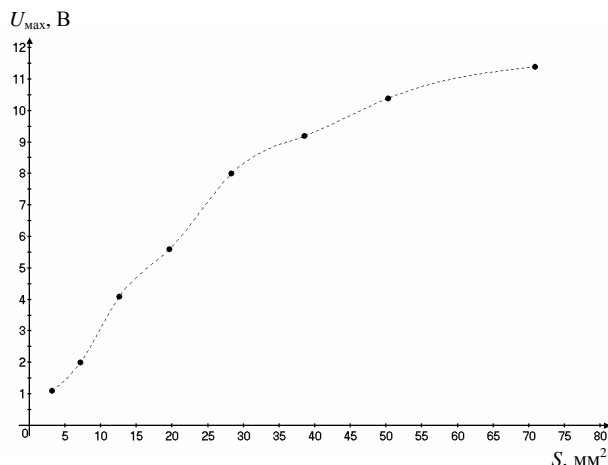


Рис. 5. Зависимость амплитуды U_{\max} акустического импульса в максимуме основного лепестка характеристики направленности ТА излучателя от его площади S

Зависимость длительности у.з. импульса от площади ТА излучателя для разных углов излучения можно увидеть на рис. 7. Для небольших углов (до 20°) эта зависимость практически линейная. С увеличением угла излучения она становится экспоненциальной, и чем больше площадь ТА излучателя, тем больше темп роста экспоненты, а значит и длительности импульса.

Исследование зависимости формы у.з. импульса от площади ТА излучателя для разных углов излучения показало, что начиная с 30°, для площадей от 70,9 до 28,3 мм² он разделяется на два. Для площадей от 19,6 до 12,6 мм² подобное разделение начинается с угла излучения 50°. Для площадей от 7,1 до 3,1 мм² разделение у.з. импульса во всем диапазоне углов излучения не происходит. В качестве примера на рис. 8 приведена осциллограмма у.з. импульса, возбуждаемого ТА излучателем площадью 70,9 мм² под углом 30°. Видно, что первоначальный импульс разделился на два импульса, каждый из которых имеет максимальную амплитуду, длительность и спектр.

Причина разделения заключается в том, что возбуждаемые диаметрально противоположными краями ТА излучателя у.з. импульсы при нулевом угле излучения достигают ЭМА приемника одновременно, и мы наблюдаем моноимпульс (рис. 2). С увеличением угла излучения импульсы от краев проходят до приемника разные расстояния. Максимум импульса от дальнего края регистрируется позже, чем от ближнего. При определенном угле излучения «время запаздывания» у.з. импульсов друг относительно друга становится сравнимым с их длительностью и моноимпульс начинает разделяться. С уменьшением площади ТА излучателя «время запаздывания» становится меньше длительности моноимпульса и тогда независимо от угла излучения его разделение не происходит.

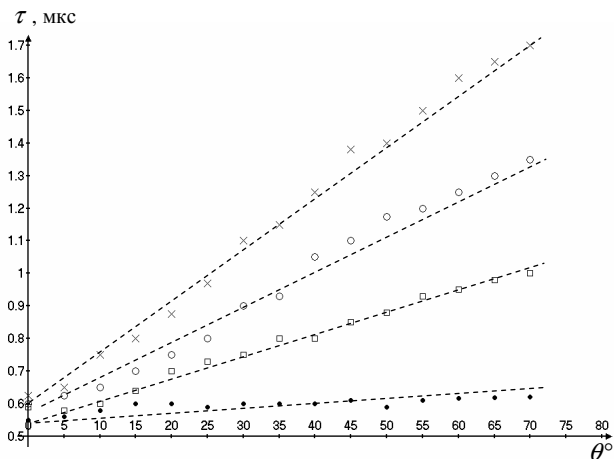


Рис. 6. Зависимость длительности акустического импульса продольных волн от угла излучения для ТА излучателем площадью: × – 70,9; ○ – 28,3; □ – 12,6; ● – 3,1 мм²

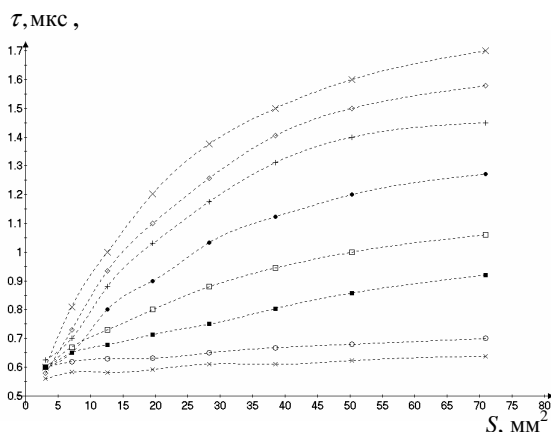


Рис. 7. Зависимость длительности τ акустических импульсов, возбуждаемых ТА излучателем, от его площади для углов излучения: × – 0°, ○ – 10°, ■ – 20°, □ – 30°, ● – 40°, + – 50°, ◇ – 60°, X – 70°

На рис. 9 приведены некоторые результаты по определению зависимости частоты f_1 , на которую приходится максимум амплитуды в спектре у.з. импульсов, возбуждаемых ТА излучателями, от их площади и углов излучения.

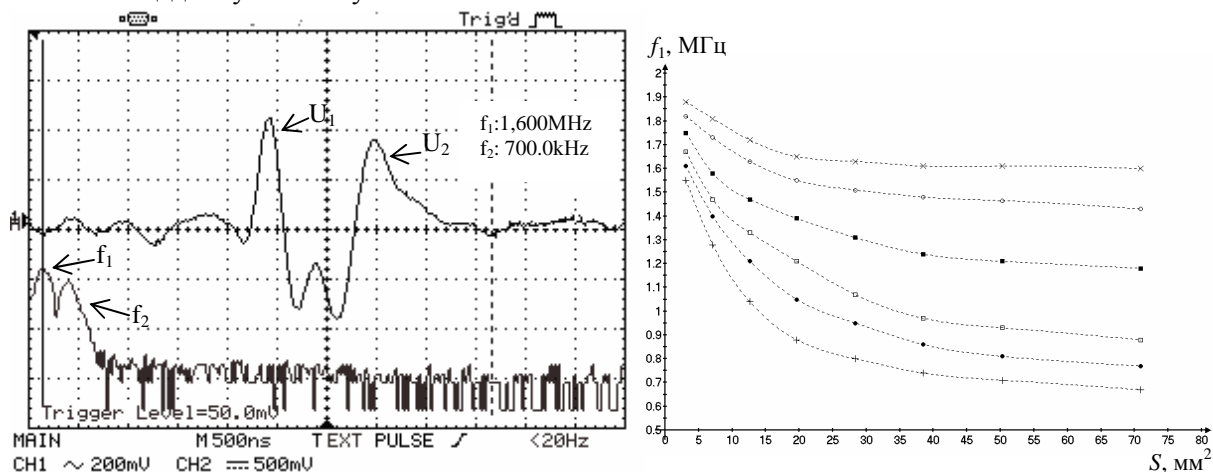


Рис. 8. Осциллограмма разделенного у.з. импульса и его амплитудно-частотного спектра. Цена делений масштабной сетки дисплея: по вертикали – CH1 = 200 mV, по горизонтали – M = 500 ns, U_1 , U_2 – максимальные амплитуды, разделенных импульсов, f_1 , f_2 – частоты, на которые приходятся максимумы их спектров

Рис. 9. Зависимость частоты f_1 , на которую приходится максимум спектра возбуждаемых ТА излучателем импульсов, от его площади для углов излучения: \times – 0°, \circ – 10°, \blacksquare – 20°, \square – 30°, \bullet – 40°, $+$ – 50°

Видно, что полученные зависимости при одних и тех же углах излучения по форме с точностью «до наоборот» совпадают с зависимостями длительности у.з. импульса от площади ТА излучателя (рис. 7). То есть при углах излучения меньше 20° для площадей больше 30 мм² частота f_1 зависит от площади ТА излучателя практически линейно, а с уменьшением площади увеличивается по экспоненте. Для углов излучения больших 20°, эта зависимость становится чисто экспоненциальной, и чем меньше площадь ТА излучателя, тем больше темп роста экспоненты, а значит и частоты f_1 .

Выводы

1. Разработан, изготовлен и испытан в лабораторных условиях стенд для определения характеристик направленности лазерного импульсного термоакустического излучателя.
2. В результате исследований были определены как функции площади ТА излучателя: характеристики направленности, ширина основного «лепестка» характеристик направленности, форма и основные параметры возбуждаемых у.з. импульсов при разных углах излучения.
3. Исследована зависимость амплитудно-частотного спектра у.з. импульсов, возбуждаемых ТА излучателями разной площади, от угла излучения.
4. Результаты исследований позволяют обоснованно выбрать оптимальные геометрические и энергетические параметры лазерного импульсного ТА излучателя при создании аппаратуры для бесконтактного ультразвукового контроля качества металлических материалов и изделий.

Литература

1. Возбуждение ультразвука в железе при фазовом переходе под действием лазерных импульсов / Г.А. Буденков, С.Ю. Гуревич, А.Д. Каунов, А.Ф. Маскаев // Акустич. журнал. – 1983. – Т. 29, № 4. – С. 561–562.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. В 2-х книгах. Кн. 2 / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
3. Электромагнитно-акустический преобразователь для регистрации упругих волн, возбуждаемых лучом лазера / Ю.В. Петров, В.Н. Уманец, В.Ю. Тросман, В.А. Ершов // Дефектоскопия. – 1989. – № 11. – С. 89–91.
4. Гуревич, С.Ю. Стенд для определения характеристик направленности бесконтактных излучателей ультразвука / С.Ю. Гуревич, Ю.Г. Гальцев // Дефектоскопия. – 1991. – № 12. – С. 23–27.

5. Петров, Ю.В. Экспериментальное исследование поперечных волн, возбуждаемых в металле лазерным импульсом / Ю.В. Петров, А.В. Шушарин // Дефектоскопия. – 2000. – № 9. – С. 87–94.

6. О границах механизмов термоакустического преобразования при лазерной генерации ультразвука в металлах / С.Ю. Гуревич, Ю.В. Петров, А.А. Шульгинов, К.В. Прокопьев // Дефектоскопия. – 2001. – № 4. – С. 69–75.

7. ЭМА-регистрация ультразвуковых волн Лэмба, возбуждаемых лазерными нанопульсами / С.Ю. Гуревич, Ю.В. Петров, Е.В. Голубев, А.А. Шульгинов // Дефектоскопия. – 2013. – № 8. – С. 3–8.

Поступила в редакцию 5 сентября 2015 г.

Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2015, vol. 7, no. 4, pp. 68–73

DOI: 10.14529/mmph150409

DIRECTIONAL CHARACTERISTICS OF THE LASER PULSE THERMOACOUSTIC EMITTER

S.Yu. Gurevich¹, Yu.V. Petrov², E.V. Golubev³, O.V. Karasev⁴

Results of experimental studies to identify the dependence of directional characteristics of the laser pulse thermoacoustic emitter of bulk ultrasonic waves on its energy and geometrical parameters are shown. The experimental stand and measurement technique are described. The results obtained can be used to create a non-contact means of the ultrasonic quality control of metallic materials and products.

Keywords: laser thermoacoustic emitter; directional characteristics; broadband; electromagnet acoustic receiver.

References

1. Budenkov G.A., Gurevich S.Yu., Kaunov A.D., Maskaev A.F. *Akusticheskiy zhurnal*, 1983, Vol. 29, no. 4, pp. 561–562. (in Russ.).
2. Klyuev V.V. (Ed.) *Pribory dlya nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdeliy. Spravochnik. V 2-kh knigakh. Kn. 2* [Devices for non-destructive testing of materials and products. Guide. In 2 books. Bk. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 352 p. (in Russ.).
3. Petrov Yu.V., Umanets V.N., Trosman V.Yu., Ershov V.A. *Defektoskopiya*, 1989, no. 11, pp. 89–91. (in Russ.).
4. Gurevich S.Yu., Gal'tsev Yu.G. *Defektoskopiya*, 1991, no. 12, pp. 23–27. (in Russ.).
5. Petrov Yu.V., Shusharin A.V. *Defektoskopiya*, 2000, no. 9, pp. 87–94. (in Russ.).
6. Gurevich S.Yu., Petrov Yu.V., Shul'ginov A.A., Prokop'ev K.V. On Boundaries between Mechanisms of Thermoacoustic Conversion of Laser Pulses to Ultrasound in Metals. *Russian Journal of Non-destructive Testing*, 2001, Vol. 37, Issue 4, pp 296–300. (in Russ.). DOI: 10.1023/A:1012363207713
7. 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.

Received September 5, 2015

¹ Gurevich Sergei Yurevich is Dr. Sc. (Engineering), Professor, General and Experimental Physics Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

E-mail: gurevichsi@susu.ac.ru

² Petrov Yuriy Vladimirovich is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, General and Experimental Physics Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

E-mail: petrovyyv@susu.ac.ru

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

E-mail: ev_golubev@mail.ru

⁴ Karasyev Oleg Viktorovich is Head of the Laboratory, General and Experimental Physics Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.