

## ДИФРАКЦИЯ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН, ВОЗБУЖДЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

**С.Ю. Гуревич, Ю.В. Петров**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация*

*E-mail: gurevichsi@susu.ru*

Цель работы – создание методики и средств выявления несплошностей в металле с помощью теневого и зеркально-теневого методов контроля ультразвуковой дефектоскопии с использованием бесконтактных способов генерации и регистрации УЗ волн. Для достижения этой цели на специальном стенде проведены исследования по дифракции объемных упругих волн на цилиндрической полости. Для возбуждения ультразвука и приема дифрагированных волн используются импульсный лазер и широкополосный ЭМА приемник. Установлено, что наряду с уменьшением амплитуды УЗ импульсов продольных и поперечных волн, прошедших через несплошность, количественными оценками брака могут служить изменение длительности импульсов и частоты, на которую приходится максимум их спектра

*Ключевые слова: лазерное возбуждение ультразвука; ЭМА-приемник; объемный дефект; теневой метод лазерно-акустического контроля; спектр импульса ультразвуковых волн.*

### Введение

Неразрушающий контроль качества металлических материалов и изделий основан, как правило, на применении акустических методов. При этом ввод и прием упругих волн в изделие осуществляется пьезопреобразователями через контактные среды. Однако, при больших скоростях движения, высоких и низких температурах, шероховатой и загрязненной поверхности объекта контроля, а также, когда механический контакт и контактные жидкости применять недопустимо, указанные методы должны быть преимущественно бесконтактными. Одним из таких методов является генерация ультразвуковых (УЗ) волн наносекундными лазерными импульсами и их регистрация на основе обратного электромагнитоакустического (ЭМА) преобразования с помощью широкополосных (ШП) ЭМА приёмников [1–2]. В этом случае отпадает необходимость в пьезопреобразователях и контактных средах, так как источником ультразвука становится освещаемая поверхность контролируемого изделия. Размеры и форма такого термоакустического (ТА) источника легко регулируются с помощью линз, а сам лазер может быть достаточно удален от объекта контроля. Кроме того, появляется возможность генерировать в изделии относительно короткие импульсы, с непрерывным спектром частот. Поскольку ШП ЭМА приемник регистрирует такие импульсы практически без искажений, то анализ амплитудно-частотных спектров импульсов дифрагированных УЗ волн может существенно расширить информацию о структуре, природе, форме выявляемых дефектов, величине «мертвой зоны» и т. п.

В практике традиционной УЗ дефектоскопии металлических материалов и изделий нашли широкое применение теневой и зеркально-теневого методы УЗ контроля [3]. Однако сведения о методике и средствах выявления несплошностей с использованием бесконтактных способов возбуждения и приема ультразвука в литературе практически отсутствуют [4, 5].

В данной работе были проведены исследования по дифракции УЗ волн на дефекте типа «цилиндрическая полость». Возбуждение волн осуществлялось лазерными импульсами наносекундной длительности, прием дифрагированных УЗ волн – ЭМА приемником.

Так как полоса пропускания частоты электрических колебаний ЭМА приемника достаточно велика (до 200 МГц), то форма, амплитуда, длительность и амплитудно-частотный спектр *регу-*

стрируемых ЭМА приёмником электрических импульсов отличаются от соответствующих параметров возбуждаемых в металле ультразвуковых импульсов, незначительно. В дальнейшем электрические импульсы, наблюдаемые на экране осциллографа, будем называть «псевдо» упругими. Признаками обнаружения дефектов в этом случае могут служить уменьшение амплитуды УЗ волн, прошедших через контролируемое изделие, увеличение времени их прохождения, изменение длительности и амплитудно-частотного спектра УЗ импульсов.

### Методика проведения исследований

Для проведения экспериментальных исследований была разработана и изготовлена установка, структурная схема которой приведена на рис. 1. Источником УЗ импульсов служит термоакустический излучатель (ТА) – нагреваемый лазерными импульсами участок поверхности контролируемого изделия (7). Возбуждаемые в нем УЗ импульсы регистрируются бесконтактным широкополосным ЭМА приемником (8) и поступают на вход цифрового осциллографа (11). В осциллографе осуществляется запоминание формы импульсов, измерение их амплитудно-временных параметров, быстрое преобразование Фурье (БПФ). Результаты наблюдений и измерений выводятся на экран дисплея. Кроме того, в состав установки входят оптический аттенюатор (2) для плавной регулировки мощности лазерного излучения, измеритель мощности излучения (3), набор диафрагм (4), оптическая линза (5) для изменения формы и размеров ТА излучателя, поворотное зеркало (6).

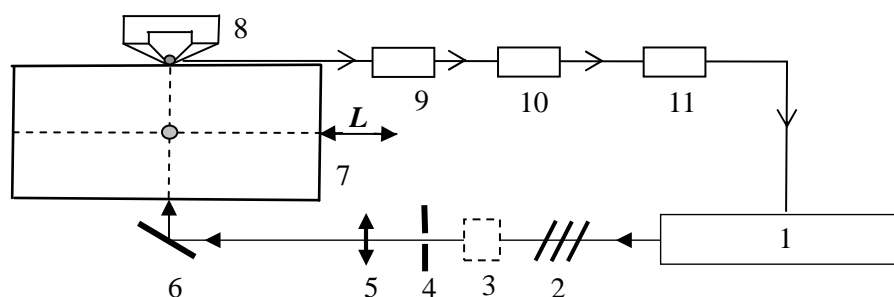


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки:

1 – лазер; 2 – оптический аттенюатор; 3 – измеритель мощности лазерного излучения; 4 – диафрагма; 5 – линза; 6 – поворотное зеркало; 7 – объект контроля с дефектом; L – миллиметровая шкала; 8 – ЭМА приемник; 9 – усилитель тока; 10 – усилитель напряжения; 11 – цифровой осциллограф

Для отработки методики контроля на стенде были проведены исследования по выявлению объёмного дефекта в дюралюминиевом прямоугольном образце размерами 100×45×25 мм. Дефект имел вид сквозного полого цилиндра с осью симметрии, ориентированной параллельно облучаемой поверхности бруска.

Положение ЭМА приемника на поверхности контролируемого изделия определялось в зависимости от выбранного метода ультразвукового контроля. При теновом методе он располагается на поверхности образца противоположной той, где действует ТА излучатель. При зеркально-теновом методе ЭМА приемник размещается на облучаемой поверхности образца. Конструкция стенда предусматривает перемещение образца с дефектом относительно неподвижных ТА излучателя и ЭМА приемника в обе стороны от оси симметрии дефекта.

Нагрев поверхности металла осуществлялся импульсным лазером Brilliant-B фирмы QUANTEL. Длина волны лазерного излучения – 1064 нм, длительность световых импульсов 4 – 6 нс, их максимальная энергия 0,85 Дж. Диаметры ТА излучателя и моделируемого дефекта были соответственно равны 9 и 5 мм. Считается, что упругие колебания, возбуждаемые таким ТА излучателем в образце, ограничены «ближней» зоной (область действия) в форме прямого цилиндра [6]. Площадь основания такого цилиндра определяется площадью лазерного пятна, а его высота – шириной образца

### Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 2 приведены осциллограммы «псевдо» упругих импульсов при «прозвучивании» образца теневым методом: *а)* без дефекта и *б)* с дефектом. Эксперимент показал, что в образце возбуждаются достаточно интенсивные импульсы поперечных (3) и продольных (2) УЗ волн, причем если в качестве критерия рассматривать размах колебаний, то последние являются более «чувствительными» к дефекту.

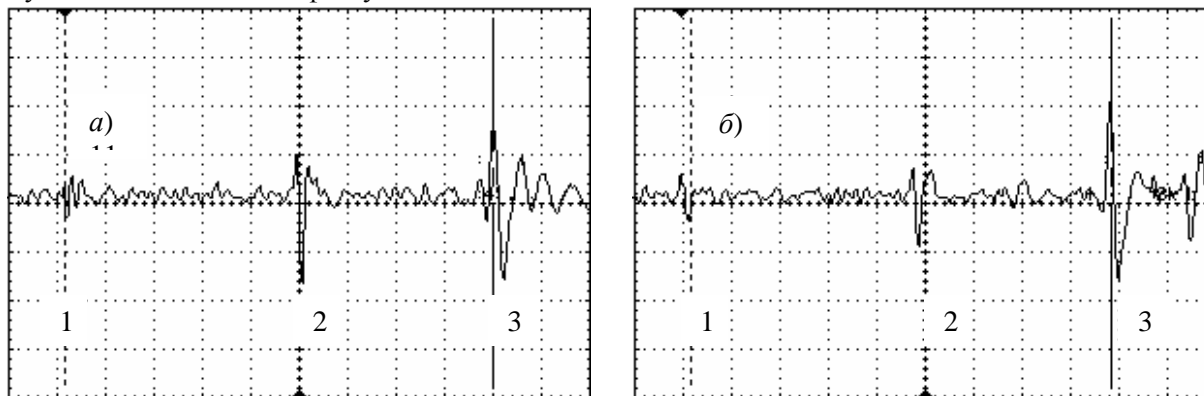


Рис. 2. Осциллограммы «псевдо» упругих импульсов, прошедших от излучателя к приемнику в контролируемом образце: *а)* – без дефекта; *б)* – с дефектом.  
1 – «зондирующий»; 2 – продольной волны; 3 – поперечной волны.  
Цена деления шкалы по вертикали – 1,0 В/дел, по горизонтали – 2,5 мкс/дел

На рис. 3 отражены результаты измерений амплитуд «псевдо» упругих импульсов поперечных и продольных волн в зависимости от расстояния  $L$  между осью симметрии дефекта и прямой, проходящей через центры ТА излучателя и ЭМА приемника  $U = f(L)$ .

Диапазон сканирования образца с дефектом относительно ТА излучателя  $\pm 10$  мм, шаг сканирования – 1 мм. Видно, что по мере выхода дефекта из области действия ТА излучателя интенсивность импульсов заметно увеличивается. Минимальные значения амплитуд волн обоих типов приходятся на ось симметрии моделируемого дефекта. За пределами дефекта амплитуды изменяются незначительно. По результатам измерений можно оценить средний коэффициент выявляемости дефекта [3]  $k_c = U_d / U_0$ , где  $U_0$  – амплитуда сигнала при отсутствии дефекта,  $U_d$  – минимальная амплитуда сигнала при наличии дефекта. Для продольных волн он равен 0,53, для поперечных – 0,46.

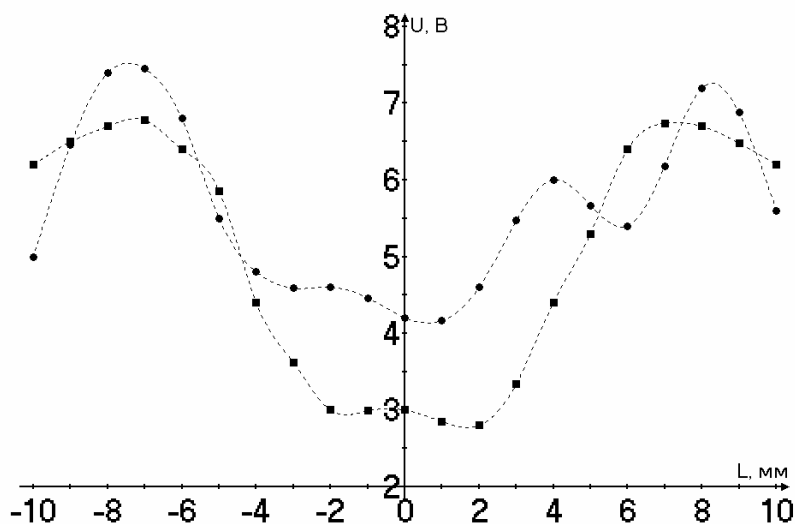


Рис. 3. Зависимость амплитуд «псевдо» упругих импульсов от расстояния между осью симметрии дефекта и прямой, соединяющей центры ТА излучателя и ЭМА-приемника:  
● – продольные волны; ■ – поперечные волны

На рис. 4 приведена зависимость  $t = f(L)$ , где  $t$  – длительность «псевдо» упругих импульсов поперечных и продольных волн.

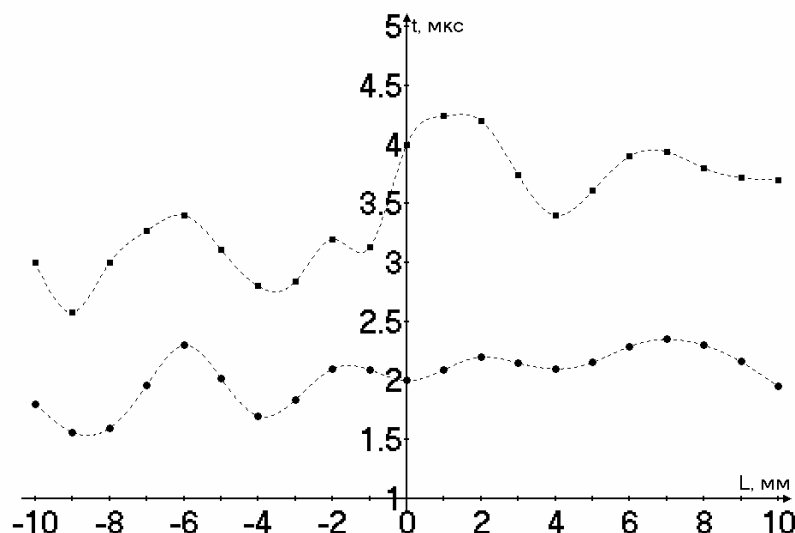


Рис. 4. Зависимость длительности «псевдо» упругих импульсов от расстояния между осью симметрии дефекта и прямой, соединяющей центры ТА излучателя и ЭМА-приемника: ● – продольные волны; ■ – поперечные волны

За длительность импульсов принято время  $t$  от начала и до конца основного колебательного процесса (см. рис. 6, 7). Из графика следует, что длительность импульсов упругих волн, прошедших через контролируемое изделие с дефектом, изменяется, причем для поперечных волн это изменение более существенно, чем для продольных.

На рис. 5 приведены результаты исследования зависимости  $F = f(L)$ , где  $F$  – частота, на которую приходится максимум амплитуды в спектре «псевдо» упругих импульсов поперечных и продольных волн.

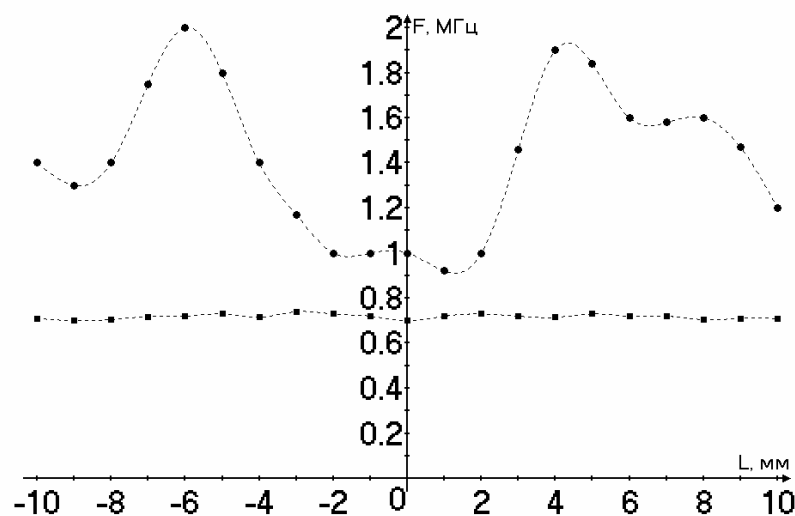


Рис. 5. Зависимость частоты, на которую приходится максимум амплитуды в спектре «псевдо» упругих импульсов, от расстояния между осью симметрии дефекта и прямой, соединяющей центры ТА излучателя и ЭМА приемника: ● – продольные волны; ■ – поперечные волны

Эта зависимость определялась по полученным осциллограммам, форма которых показана на рис. 6 и 7. Приведенные осциллограммы относятся к случаю, когда прямая, соединяющая центры ТА излучателя и ЭМА приемника совпадает с осью симметрии дефекта ( $L = 0$  мм) и когда она находится за его пределами ( $L = \pm 10$  мм).

Из анализа рис. 5 следует, что для поперечных волн частота  $F$  практически не зависит от наличия дефекта. Для продольных волн, после того как дефект вышел за область действия ТА излучателя, наблюдается её существенное увеличение.

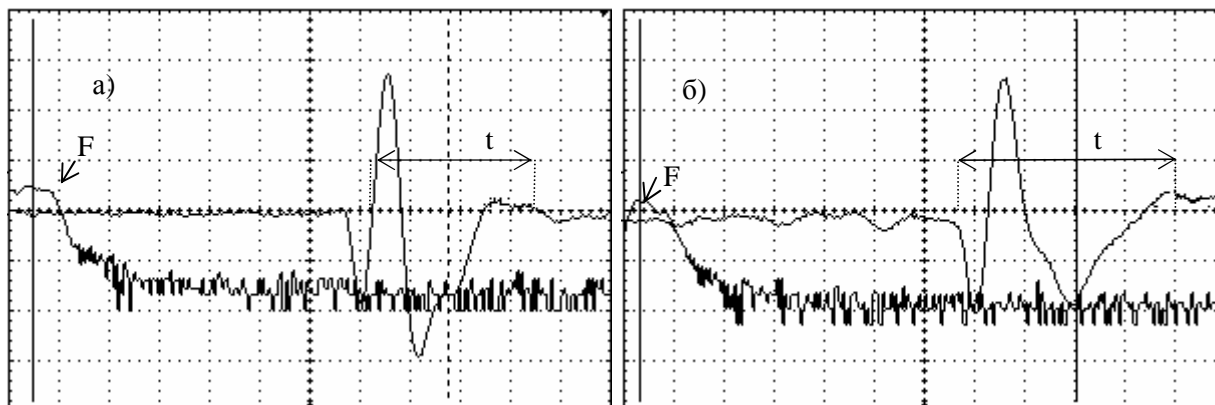


Рис. 6. Осциллограммы «псевдо» упругих импульсов продольных волн и их спектров, прошедших через контролируемый образец с дефектом: а)  $L = \pm 10$  мм,  $F = 1,2$  МГц, б)  $L = 0$  мм,  $F = 0,8$  МГц.  
Цена деления шкалы по вертикали – 1,0 В/дел, по горизонтали – 500 нс/дел

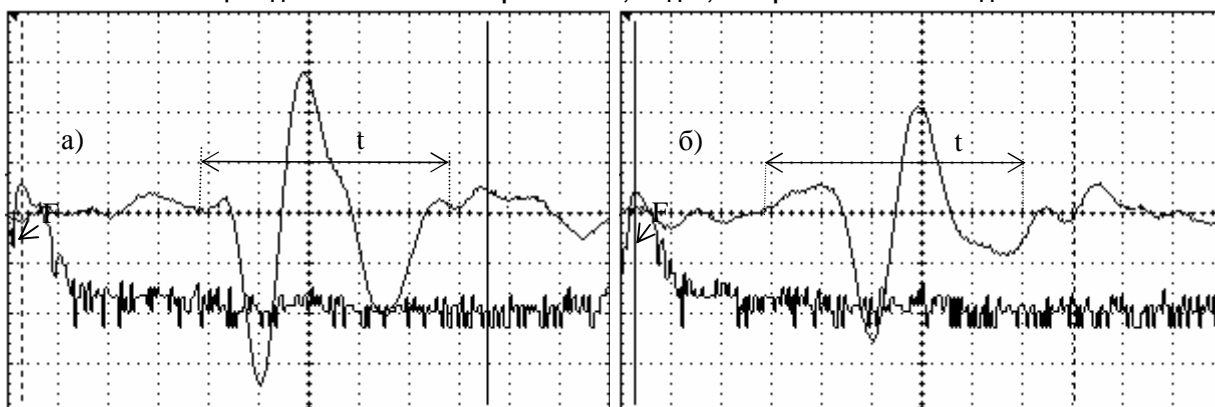


Рис. 7. Осциллограммы «псевдо» упругих импульсов поперечных волн и их спектров, прошедших через контролируемый образец с дефектом: а)  $L = \pm 10$  мм,  $F = 1,2$  МГц, б)  $L = 0$  мм,  $F = 0,7$  МГц.  
Цена деления шкалы по вертикали – 1,0 В/дел, по горизонтали – 500 нс/дел

## Выводы

1. Установлено, что для практической реализации теневого и зеркально-теневого методов УЗ дефектоскопии металлических материалов и изделий можно успешно использовать бесконтактные способы возбуждения и приема УЗ волн с помощью наносекундного лазера и широкополосного ЭМА приемника.

2. Из результатов исследований по выявлению искусственного объемного дефекта в дюралюминии с помощью теневого метода следует, что для количественной оценки качества материалов и изделий можно использовать такие параметры, как: отношение минимальной амплитуды сигнала при наличии дефекта к амплитуде сигнала при отсутствии дефекта; увеличение длительности импульсов поперечных волн, увеличение частоты, на которую приходится максимум спектра импульсов продольных волн.

## Литература

1. Лямшев, Л.М. Лазерное термооптическое возбуждение звука / Л.М. Лямшев. – М.: Наука, 1989. – 237 с.
2. Гуревич, С.Ю. Лазерная генерация и электромагнитная регистрация нормальных акустических волн в ферромагнитных материалах / С.Ю. Гуревич, Ю.В. Петров // Журнал технической физики. – 2016. – Том 86. – Вып. 3. – С.114–117.
3. Ермолов, И.Н. Неразрушающий контроль. Кн. 2. Акустические методы контроля / И.Н. Ермолов, И.П. Алешин, А.И. Потапов. – М.: Высшая школа, 1991. – 283 с.
4. Лазерно-акустический метод контроля дефектов в металлах и металлизированных покрытиях диэлектриков / В.А. Голенищев-Кутузов, Р.И. Калимуллин, С.А. Мигачев и др. // Дефектоскопия. – 2011. – № 2. – С. 40–44.

5. Обнаружение поверхностных и объемных дефектов в металлах лазерно-акустическим способом / И.П. Исмагилов, В.А. Голенищев-Кутузов, Р.И. Калимуллин и др. // Дефектоскопия. – 2014. – № 6. – С. 16–24.

6. Гуревич, С.Ю. Характеристики направленности лазерного импульсного термоакустического излучателя в немагнитных металлах / С.Ю. Гуревич, Ю.В. Петров, Е.В. Голубев // Дефектоскопия. – 2017. – № 4. – С. 22–26.

*Поступила в редакцию 21 мая 2019 г.*

---

*Bulletin of the South Ural State University  
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"  
2020, vol. 12, no. 2, pp. 31–36*

---

DOI: 10.14529/mmph200104

## **DIFFRACTION ON THE CYLINDRICAL CAVITY OF ULTRASONIC WAVES EXCITED BY PULSE LASER RADIATION**

**S. Yu. Gurevich, Yu. V. Petrov**

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

*E-mail: gurevichsi@susu.ru*

The goal of the research is to create techniques and tools for detecting the discontinuities in metal with the help of the shadow and shadow-mirror methods of monitoring the ultrasonic flaw detection using the non-contact methods of ultrasonic wave generation and registration. To achieve this goal, studies on the diffraction of bulk elastic waves in a cylindrical cavity have been carried out on a special stand. A pulsed laser and a broadband EMA receiver are used to excite ultrasound and receive the diffracted waves. It is established that along with a decrease in the amplitude of the ultrasound pulses of longitudinal and shear waves transmitted through a discontinuity, a change in the pulse duration and frequency, which accounts for the maximum of their spectrum, can be used as the quantitative estimate of the defects.

*Keywords: laser excitation of ultrasound; EMA receiver; volumetric defect; shadow method of laser-acoustic control; pulse spectrum of ultrasonic waves.*

### **References**

1. Lyamshev L.M. *Lazernoe termoopticheskoe vozbuзhdenie zvuka* (Laser thermo-optical sound excitation). Moscow, Nauka Publ., 1989, 237 p. (in Russ.).

2. Gurevich S. Yu., Petrov Yu. V. Laser generation and electromagnetic detection of normal acoustic waves in ferromagnetic metals. *Technical Physics*, 2016, Vol. 61, p. 432–435. DOI: 10.1134/S1063784216030099

3. Ermolov I.N., Aleshin I.P., Potapov A.I. *Nerazrushayushchiy kontrol'. Kn. 2. Akusticheskie metody kontrolya* (Nondestructive testing. Vol. 2. Acoustic methods of control.). Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991, 283 p.

4. Golenishchev-Kutuzov V.A., Kalimullin R.I., Migachev S.A., Petrushenko Yu.Ya., Khasanov A.A. Laser acoustic method for the inspection of flaws in metals and the metallized coatings of dielectrics. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, Vol. 47, no. 2, pp. 118–121. DOI: 10.1134/s1061830911020069

5. Ismagilov I.R., Golenishchev-Kutuzov V.A., Kalimullin R.I., Migachev S.A., Khasanov A.A. Detecting surface and volume defects in metals by the laser-acoustic method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, Vol. 50, no. 6, pp. 318–324. DOI: 10.1134/s1061830914060060

6. Gurevich S.Y., Petrov Y.V., Golubev E.V. Directional Characteristics of a Laser Pulsed Thermoacoustic Emitter in Nonmagnetic Metals. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, Vol. 53, no. 4, pp. 260–264. DOI: 10.1134/s1061830917040027

*Received May 21, 2019*