

6. Darienko T., Hoffmann L. Algal grows on cultural monuments in Ukraine // *Biologia*. 2003. Vol. 58, № 4. P. 575–587.

7. The Cell Walls of Green Algae: A Journey through Evolution and Diversity / D. S. Domozych, M. Ciancia, J. U. Fangel, M. D. Mikkelsen, P. Ulvskov, W. G. T. Willats // *Front Plant Sci*. 2012. Vol. 3, № 00082.

O. N. Boldina

Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences

A. N. Gerashchenko

Tel Aviv University (Tel Aviv, Israel)

V. A. Parfenov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

REMOVAL OF BIODETERIORATION FROM SURFACE OF STONE MONUMENTS BY MEANS OF LASER TREATMENT. LASER REMOVAL OF MICROSCOPIC ALGAE

Results of experimental studies on development of laser technology for removal of microalgae from stone surfaces are presented. In the work pulsed solid-state Nd:YAG laser with wavelength of 1064 nm and model samples from marble and sandstone were used. The task on the optimization of laser output parameters for achievement of exposure doses requiring for mechanical ejection and inactivation of different aerial algae species was successfully performed.

Biological destruction of monuments, microscopic fungi, laser cleaning, restoration

УДК 620.179.16

К. С. Паврос, И. Г. Сидоренко, А. В. Теплякова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Анализ акустической помехи при ультразвуковом контроле листов поперечными волнами

Проведен анализ амплитуды акустической помехи при ультразвуковом контроле листового проката поперечными волнами в контактном варианте. В качестве помехи при проведении расчетов использовано явление излучения преобразователем продольных волн.

Ультразвуковой неразрушающий контроль, листовый прокат, эхометод ультразвукового контроля, акустическая помеха

Массовый сдаточный контроль листового проката, к качеству которого в настоящее время предъявляют весьма высокие требования, осуществляют путем прозвучивания узким ультразвуковым пучком продольных или поперечных волн, формируемых пьезоэлектрическими или электромагнитно-акустическими преобразователями конечных размеров. В каждом положении преобразователя прозвучивается небольшой объем металла листа. Приблизительно его можно рассматривать как цилиндр, высота которого равна толщине листа, а его основание – сечению ультра-

тразвукового пучка. При соответствующем перемещении пучка в процессе сканирования листа прозвучивается весь его объем.

При контроле листов эхометодом продольными волнами пьезоэлектрический преобразователь, совершающий колебания по толщине, помимо основной продольной волны, одновременно излучает и поперечные волны, являющиеся источником помех. Из-за существенно меньшей скорости распространения поперечных волн по сравнению с продольными такая помеха попадает только во временной интервал между первым и

вторым донными импульсами. При контроле изделий малой толщины, а также с целью сокращения величины неконтролируемой мертвой зоны указанный временной интервал может быть использован для регистрации дефектов [1]. В этом случае амплитуда импульса помехи ограничивает предельную чувствительность контроля. Подробно оценка предельных возможностей эхо-метода при ультразвуковом контроле продольными волнами была рассмотрена в [2].

В данной статье остановимся на рассмотрении контроля листового проката поперечными волнами. Известно [3], что кроме основной поперечной волны преобразователь излучает одновременно и продольные волны, являющиеся при проведении контроля источниками помех. Поскольку скорость распространения этих волн в материалах существенно выше скорости поперечных волн, то при контроле эхометодом такая помеха попадает как в первый, так и во второй рабочие интервалы, что может приводить к ограничению предельной чувствительности контроля (рис. 1).

На рис. 1 приведена диаграмма эхометода: И – излучатель; П – приемник; ЗИ – зондирующий импульс; Д – дефект; U_I – первый донный сигнал; U_{II} – второй донный сигнал; U_{DI} – эхосигнал от дефекта в первом временном интервале; U_{DII} (U'_{DII} , U''_{DII}), U_{DI} – эхосигналы от дефекта во втором временном интервале; U_I^I и U_{II}^I – эхосигналы от побочно-излученной продольной волны.

Для определения амплитуд сигналов акустических помех U_I^I и U_{II}^I используем выражение для упругого напряжения, действующего на приемный преобразователь в режиме приема, вызванного падающей на него продольной волной [3]:

$$\sigma_{\text{пр } xz}^{tl} = -2\mu k_x \zeta \phi|_{z=H}, \quad (1)$$

где μ – упругая постоянная Ламе; $\zeta = \sqrt{k_l^2 - k^2}$ (k_l – волновое число для продольной волны; $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$); ϕ – скалярный потенциал смещения; H – расстояние от излучателя до приемника.

Амплитуда электрического сигнала акустической помехи от принятой продольной волны определяется средним значением касательной компоненты упругого напряжения $\sigma_{\text{пр } xz}^{tl}$ по площади преобразователя S_n в режиме приема:

$$U_{tl} = \frac{1}{S_n} \left| \iint_{S_n} \sigma_{\text{пр } xz}^{tl} dS_n \right|. \quad (2)$$

Подставив в (2) формулу (1) и используя выражение для скалярного потенциала [4], получим интегральное соотношение для оценки амплитуды электрического сигнала акустической помехи от распространяющейся продольной волны:

$$U_{tl} = \frac{1}{S_n} \left| \iint_{S_n} \left(\frac{4\sigma_0 S_n \mu}{(2\pi)^2 \mu} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2J_1(ka)}{ka} \frac{k_x \eta}{F(k)} k_x \zeta \times \right. \right. \\ \left. \left. \times e^{-j(k_x x + k_y y + \zeta H)} dk_x dk_y \right) dS_n \right|,$$

где σ_0 – амплитуда заданной нормальной компоненты напряжения; k – волновое число для поперечной волны; $J_1(ka)$ – цилиндрическая функция Бесселя первого порядка; a – радиус излучателя; $\eta = \sqrt{k_l^2 - k^2}$; $F(k) = (k^2 - \eta^2)^2 + 4k^2 \zeta \eta$.

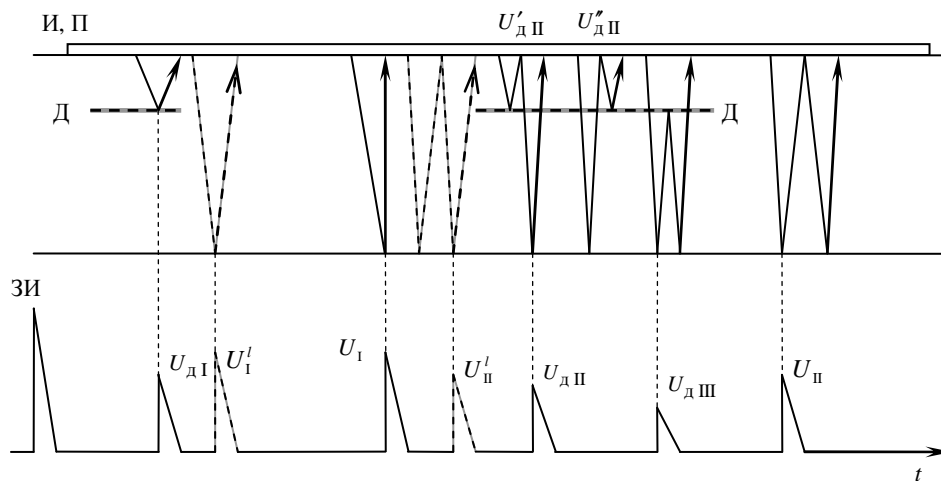


Рис. 1

После представления проекций волновых чисел в сферической системе координат аналогично [4], интегрирования по площади преобразователя и выполнения простых преобразований можно получить:

$$\frac{U_{tl}}{\sigma_0} = (k_l a)^2 \left| \int_0^\infty \frac{2J_1(k_l a x)}{k_l a x} \frac{2J_1(k_l a \beta x)}{k_l a \beta x} \times \frac{x^2 \sqrt{1-x^2} \sqrt{\alpha^2 - x^2}}{(\alpha^2 - 2x^2)^2 + 4x^2 \sqrt{1-x^2} \sqrt{\alpha^2 - x^2}} \times e^{-j \frac{1}{2\pi} (k_l a)^2 s \sqrt{1-x^2}} x dx \right|, \quad (3)$$

где $\alpha = c_l / c_t$ (c_l , c_t – скорости продольных и поперечных волн); $\beta = b/a$; $s = H/a^2 / \lambda_l$ (λ_l – длина продольной волны).

Полученное выражение рассчитаем численным методом. Для численного интегрирования разобьем (3) на три составляющие. Поскольку α всегда больше единицы (скорость продольных волн больше скорости поперечных), то

$$\int_0^\infty = \int_0^1 + \int_1^\alpha + \int_\alpha^\infty;$$

$$U_{tl} = (k_l a)^2 \left\{ \int_0^1 \frac{2J_1(k_l a x)}{k_l a x} \frac{2J_1(k_l a \beta x)}{k_l a \beta x} G_1(x) x dx + \int_1^\alpha \frac{2J_1(k_l a x)}{k_l a x} \frac{2J_1(k_l a \beta x)}{k_l a \beta x} G_2(x) x dx + \int_\alpha^\infty \frac{2J_1(k_l a x)}{k_l a x} \frac{2J_1(k_l a \beta x)}{k_l a \beta x} G_3(x) x dx \right\},$$

где

$$G_1(x) = \frac{x^2 \sqrt{1-x^2} \sqrt{\alpha^2 - x^2}}{(\alpha^2 - 2x^2)^2 + 4x^2 \sqrt{1-x^2} \sqrt{\alpha^2 - x^2}} \times e^{-j \frac{1}{2\pi} (k_l a)^2 s \sqrt{1-x^2}};$$

$$G_2(x) = \left[\frac{4x^4 (x^2 - 1)(\alpha^2 - x^2)}{(\alpha^2 - 2x^2)^4 + 16x^4 (x^2 - 1)(\alpha^2 - x^2)} - j \frac{x^2 \sqrt{x^2 - 1} \sqrt{\alpha^2 - x^2} (\alpha^2 - 2x^2)^2}{(\alpha^2 - 2x^2)^4 + 16x^4 (x^2 - 1)(\alpha^2 - x^2)} \right] \times e^{-\frac{1}{2\pi} (k_l a)^2 s \sqrt{x^2 - 1}};$$

$$G_3(x) = \frac{-x^2 \sqrt{x^2 - 1} \sqrt{x^2 - \alpha^2}}{(\alpha^2 - 2x^2)^2 - 4x^2 \sqrt{x^2 - 1} \sqrt{x^2 - \alpha^2}} \times e^{-\frac{1}{2\pi} (k_l a)^2 s \sqrt{x^2 - 1}}.$$

С учетом коэффициента отражения звукового пучка продольных волн от граней листа получим:

$$U_{tl} = (k_l a)^2 \left\{ \int_0^1 \frac{2J_1(k_l a x)}{k_l a x} \frac{2J_1(k_l a \beta x)}{k_l a \beta x} G_1(x) R_{ll \Gamma} \times e^{-j \frac{1}{2\pi} (k_l a)^2 s \sqrt{1-x^2}} x dx + \int_1^\alpha \frac{2J_1(k_l a x)}{k_l a x} \frac{2J_1(k_l a \beta x)}{k_l a \beta x} G_2(x) \times R_{ll \Gamma} e^{-\frac{1}{2\pi} (k_l a)^2 s \sqrt{1-x^2}} x dx + \int_\alpha^\infty \frac{2J_1(k_l a x)}{k_l a x} \frac{2J_1(k_l a \beta x)}{k_l a \beta x} G_3(x) \times R_{ll \Gamma} e^{-\frac{1}{2\pi} (k_l a)^2 s \sqrt{1-x^2}} x dx \right\}$$

– для акустической помехи U_I^l в первом временном интервале;

$$U_{tl} = (k_l a)^2 \left\{ \int_0^1 \frac{2J_1(k_l a x)}{k_l a x} \frac{2J_1(k_l a \beta x)}{k_l a \beta x} G_1(x) \times (R_{ll \Gamma})^3 e^{-j \frac{1}{2\pi} (k_l a)^2 s \sqrt{1-x^2}} x dx + \int_1^\alpha \frac{2J_1(k_l a x)}{k_l a x} \frac{2J_1(k_l a \beta x)}{k_l a \beta x} G_2(x) (R_{ll \Gamma})^3 \times e^{-\frac{1}{2\pi} (k_l a)^2 s \sqrt{1-x^2}} x dx + \int_\alpha^\infty \frac{2J_1(k_l a x)}{k_l a x} \frac{2J_1(k_l a \beta x)}{k_l a \beta x} G_3(x) (R_{ll \Gamma})^3 \times e^{-\frac{1}{2\pi} (k_l a)^2 s \sqrt{1-x^2}} x dx \right\}$$

– для акустической помехи U_{II}^l во втором временном интервале ($R_{ll \Gamma}$ – коэффициент отражения звукового пучка продольных волн от граней листа).

На рис. 2–4 представлены зависимости амплитуды побочно излученной продольной волны U_{tl} сигнала U_I^l , регистрируемого приемником, от

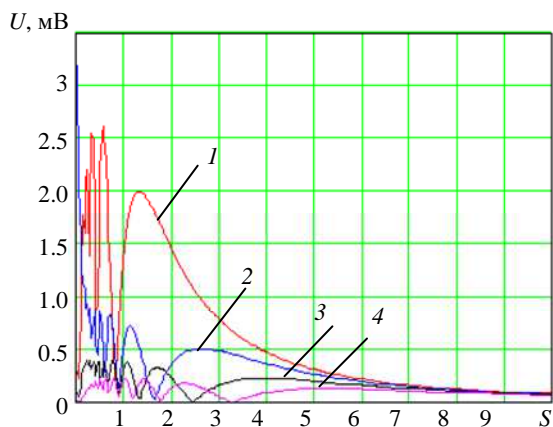


Рис. 2

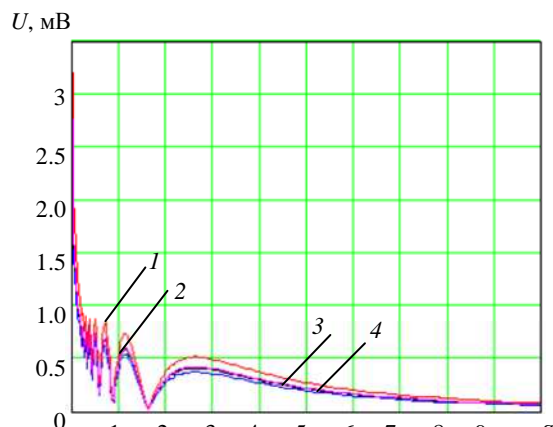


Рис. 4

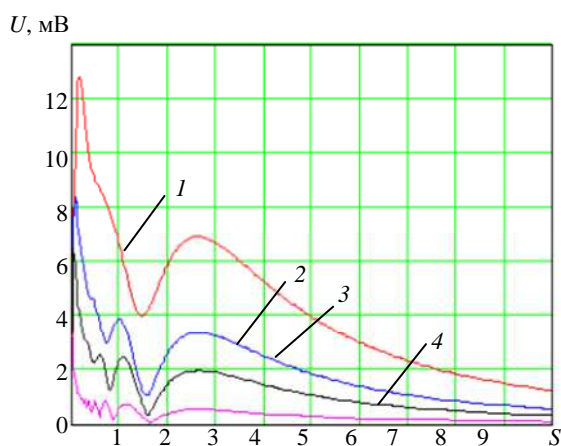


Рис. 3

обобщенного расстояния S (безразмерная величина) для различных соотношений размеров излучатель-приемник β (1 – для $\beta = 0.5$; 2 – для $\beta = 1$; 3 – для $\beta = 1.5$; 4 – для $\beta = 2$) (рис. 2), различных волновых размеров преобразователя $k_{11}a$ (1 – для $k_{11}a = 10$; 2 – для $k_{11}a = 15$; 3 – для $k_{11}a = 20$; 4 – для $k_{11}a = 40$) (рис. 3) и соотношений скоростей продольных и поперечных волн α_{l11} (рис. 4).

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод, что амплитуда побочно излученной продольной волны при контроле листового проката поперечными волнами зависит от волнового размера излучателя, соотношения размеров излучатель-приемник и от материала контролируемого изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. № 1355925, МКИ G01 29/04. Способ ультразвуковой дефектоскопии / Голубев А. С., Паврос С. К., Топунов А. В.; № 4058435; заявл. 16.04.86, опубл. 30.11.87. Бюл. № 44. 4 с.
2. Паврос К. С. О предельной чувствительности ультразвукового контроля листового проката эхометодом в контактном варианте // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Приборостроение и информационные технологии. 2007. Вып. 1. С. 11–14.
3. Паврос С. К., Паврос К. С., Романович В. А. Анализ дифракционных погрешностей при измерении

- коэффициентов затухания продольных и поперечных волн в твердых средах // Тр. XVI Российской конф. по неразрушающим физ. методам и средствам контроля. СПб., 2002. С. 21–25.
4. Паврос С. К., Паврос К. С., Романович В. А. Анализ дифракционных погрешностей при измерении коэффициентов затухания продольных и поперечных волн в твердых телах // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Приборостроение и информационные технологии. 2002. Вып. 1. С. 25–32.

K. S. Pavros, I. G. Sidorenko, A. V. Teplyakova
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

THE ANALYSIS OF THE ACOUSTIC NOISE FOR THE ROLLED METAL SHEET TESTING BY ULTRASOUND SHEAR WAVE

The analysis amplitude of the acoustic noise for the rolled metal sheet testing by ultrasound shear wave is conducted. Co-emitting of a longitudinal wave along with a transversal wave by conventional transducer was taken up as the sensitivity restrictive factor.

Ultrasound non-destructive testing, rolled metal sheet, echo method of ultrasound testing, acoustical noise