

Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн

УДК 620.179.16

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-6-75-83>

## Сравнительная выявляемость плоскостных протяженных дефектов листового проката методами отражения и прохождения

К. С. Паврос<sup>1</sup>, И. Г. Сидоренко<sup>1✉</sup>, Б. Рокштро<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>GMH Prüftechnik, Нюрнберг, Германия

✉ [irina.sidorenko.spb@gmail.com](mailto:irina.sidorenko.spb@gmail.com)

### Аннотация

**Введение.** В настоящее время листовой прокат является основным конструкционным материалом многоцелевого назначения. Актуальной задачей промышленности является повышение качества толстолистового проката. Это позволяет в дальнейшем обеспечивать необходимую надежность конструкций и изделий особо ответственного назначения. Действующие в настоящее время нормативные документы допускают проведение ультразвукового контроля листового проката методами отражения или прохождения. В силу отсутствия конкретных рекомендаций по применению того или иного метода становится неочевидным, какой из методов использовать предпочтительней.

**Цель работы.** Оценка предельной выявляемости плоскостных несплошностей толстолистового проката методами отражения (эхометод) и методами прохождения (теневой и зеркально-теневой методы).

**Материалы и методы.** На основании анализа уравнений акустических трактов определены соотношения, позволяющие оценивать предельную выявляемость плоскостных несплошностей толстолистового проката эхо-, теневым и зеркально-теневым методами с использованием продольных волн. Теоретические исследования проводились компьютерным моделированием с использованием математического пакета Mathcad.

**Результаты.** Получены интегральные выражения для расчета амплитуд эхосигнала от плоскостного дефекта, донного сигнала на бездефектном и дефектном участках и их соотношение для эхометода. Определены выражения для расчета амплитуд прошедших и донных сигналов на дефектном и бездефектном участках и их соотношение для теневого и зеркально-теневого методов. На основе численного анализа выполнена оценка предельной выявляемости плоскостных дефектов листового проката: методами отражения возможно выявление дефектов раскрытием 5 мкм, методами прохождения – более 100 мкм.

**Заключение.** Установлено, что методы отражения обладают лучшими возможностями по выявлению плоскостных дефектов продольными волнами. Определены условия уменьшения толщины эквивалентной прослойки, связанные с увеличением волнового размера преобразователей. Показано, что с целью выявления дефектов с малым раскрытием при контроле листового проката целесообразнее отдавать предпочтение эхометоду ультразвукового контроля.

**Ключевые слова:** ультразвуковой контроль, листовой прокат, расслоение, методы прохождения и отражения, продольные волны

**Для цитирования:** Паврос К. С., Сидоренко И. Г., Рокштро Б. Сравнительная выявляемость плоскостных протяженных дефектов листового проката методами отражения и прохождения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 6. С. 75–83. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-6-75-83

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.10.2019; принята к публикации после рецензирования 11.11.2019; опубликована онлайн 30.12.2019



## Comparative Detectability of Planar Extended Defects of Sheet Metal by Reflection and Transmission Methods

Kirill S. Pavros<sup>1</sup>, Irina G. Sidorenko<sup>1✉</sup>, Bernd Rockstroh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>GMH Prüftechnik, Numberg, Germany

✉ irina.sidorenko.spb@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** Currently, sheet metal is the main structural material for multi-purpose use. The actual task of the industry is to improve the quality of rolled sheet. It allows to ensure the necessary reliability of structures and products of especially critical use. The regulatory documents currently in force allow an ultrasonic testing of sheet metal by reflection or by transmission method. Due to lack of specific recommendations it becomes unclear which of the methods is preferable to use.

**Aim.** An estimation of the maximum detectability of rolled sheet planar extended defects by reflection methods (echo method) and by transmission methods (shadow and mirror-shadow methods).

**Materials and methods.** Based on analysis of the equations of acoustic paths, formulas were determined. The formulas allow one to evaluate an ultimate detectability of planar discontinuities of plate rolling by echo, shadow and mirror-shadow methods in a contact version by longitudinal waves. Experimental studies were conducted under computer simulation using the Mathcad mathematical package.

**Results.** Integral expressions for calculating of amplitudes of echo signal from a plane defect, of bottom signal in defect-free and defective areas and their ratio for the echo method were obtained. The expressions for calculating of amplitudes of transmitted and bottom signals in defective and defect-free areas and their ratio for shadow and mirror-shadow methods were determined. Based on the numerical analysis, an estimation of the maximum detectability of planar extended defects of sheet metal was realized. It is possible to detect defects with a thickness of 5  $\mu\text{m}$  by reflection methods and with a thickness more than 100  $\mu\text{m}$  by transmission methods.

**Conclusion.** It was established that reflection methods have better capabilities for detecting plane defects by longitudinal waves. The conditions for reducing of the thickness of the equivalent layer associated with an increase in transducers wave size were determined. It was shown that in order to detect defects with a small thickness, it is more expedient to give preference to the echo method of ultrasonic testing.

**Keywords:** ultrasonic testing, sheet metal, layering, transmission and reflection methods, longitudinal waves

**For citation:** Pavros K. S., Sidorenko I. G., Rockstroh B. Comparative Detectability of Planar Extended Defects of Sheet Metal by Reflection and Transmission Methods. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 6, pp. 75–83. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-6-75-83

**Conflict of interest.** Authors declare no conflict of interest.

Submitted 10.10.2019; accepted 11.11.2019; published online 30.12.2019

**Введение.** В настоящее время листовой прокат является основным конструкционным материалом многоцелевого назначения. Высокие качественные и эксплуатационные характеристики материала позволяют широко использовать его в промышленной и строительной индустрии для производства самых различных металлоконструкций. Листовой прокат применяют для изготовления каркасов зданий и сооружений, железнодорожных и автодорожных мостов, стенок сосудов и резервуаров, в качестве элемента обшивки судов и летательных аппаратов.

Одной из важнейших задач промышленности является увеличение качества толстолистого проката, поскольку это позволяет в дальнейшем обеспечивать необходимую надежность конструкций и изделий особо ответственного назначения.

Основным внутренним дефектом листового проката, существенно ослабляющим его прочность, являются расслоения, имеющие литейное происхождение и представляющие собой раскатанные несплошности. Это вытянутые в направлении прокатки плоскостные нарушения сплошно-

сти листа, расположенные преимущественно параллельно его граням на разных уровнях по толщине. Расслоения характеризуются толщиной и площадью в плоскости листа.

На сегодняшний день качество проката контролируется ультразвуковыми методами. Действующие нормативные документы предусматривают применение на выбор как методов отражения, так и методов прохождения. По причине отсутствия конкретных рекомендаций по применению того или иного метода возникает вопрос, какой же из методов использовать предпочтительней. В методах отражения информационным признаком наличия дефекта является появление эхосигнала в зоне наблюдения, в методах прохождения – ослабление или пропадание прошедшего через объект контроля сигнала. К методам отражения относятся эхо- и эхосквозной методы, к методам прохождения – теневой и зеркально-теневой методы.

Проблемы, связанные с контролем листового проката различными методами, рассмотрены авторами многочисленных научных трудов, как отечественных, так и зарубежных [1–12]. Настоящая статья посвящена оценке возможностей этих методов при их применении для ультразвукового контроля листового проката с целью обнаружения характерных для данного вида продукции протяженных плоскостных несплошностей. Целесообразность применения того или иного метода может быть определена благодаря оценке предельной выявляемости плоскостных несплошностей толстолистового проката.

В целях воспроизведения настройки дефектоскопа, обеспечивающей в конкретных условиях необходимую реальную чувствительность контроля к толщине расслоений, используют понятие условной чувствительности контроля. При контроле листового проката ее задают амплитудой регистрируемых сигналов, отсчитываемых в децибелах относительно начального уровня [13–15]. За начальный уровень отсчета принимают:

- при контроле эхометодом, теневым и зеркально-теневым методами: амплитуду первого донного или первого прошедшего сигнала на участках листового проката, не содержащих несплошностей;

- при контроле эхометодом с регистрацией сигналов во втором временном интервале (между первым и вторым донными импульсами): амплитуду первого донного импульса на произвольном участке листа;

- при контроле эхометодом: амплитуду эхоимпульса от искусственного плоскодонного отражателя заданного диаметра в контрольном образце.

Таким образом, для того чтобы оценить предельные возможности эхометода, необходимо рассчитать амплитуду эхосигнала от плоскостного дефекта, амплитуду донного сигнала на бездефектном участке и их отношение.

Для оценки предельных возможностей теневого и зеркально-теневых методов необходимо рассчитать амплитуду прошедшего (донного) сигнала на бездефектном участке и амплитуду прошедшего (донного) сигнала при наличии дефекта и их отношение.

Для получения расчетных соотношений амплитуд регистрируемых сигналов на бездефектном участке изделия и участке с дефектом достаточно в выражениях для определения амплитуды сигнала дополнительно учесть [13–15]:

- коэффициент отражения звукового пучка от нижней грани изделия для расчета амплитуды донного сигнала на бездефектном участке изделия;

- квадрат коэффициента прохождения звукового пучка через плоскопараллельный слой малой толщины, коэффициент отражения звукового пучка от нижней грани изделия для оценки амплитуды донного сигнала на участке с дефектом;

- коэффициент прохождения звукового пучка через плоскопараллельный слой малой толщины для оценки амплитуды прошедшего сигнала на участке с дефектом;

- коэффициент отражения звукового пучка от плоскопараллельного слоя малой толщины для оценки амплитуды отраженного от дефекта эхосигнала.

**Постановка задачи.** Для получения интегрального выражения амплитуды электрического сигнала в случае продольных волн зададимся граничными условиями [1]. Будем считать, что поршневой излучатель И радиуса  $a$  расположен на поверхности тела, совпадающей с плоскостью  $xOy$  прямоугольной системы координат (рис. 1), и совершает гармонические колебания.

**Математическая модель.** Граничные условия на плоскости  $z = 0$  под излучателем в пределах его площади определяются типом возбуждаемых им колебаний. На остальной части поверхности упругие напряжения отсутствуют. В связи с этим граничные условия задавались в виде

$$\sigma_{mn} = \begin{cases} \sigma_0 e^{j\omega t}, & x^2 + y^2 \leq a^2; \\ 0, & x^2 + y^2 > a^2, \end{cases}$$

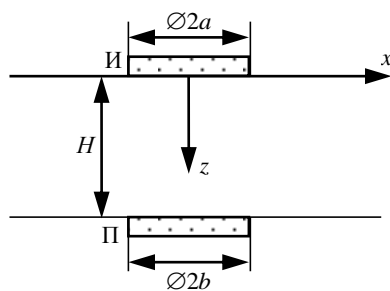


Рис. 1. Модель задачи

Fig. 1. Task model

где  $\sigma_{mn}$  – компоненты тензора упругих напряжений;  $\sigma_0 = \xi_m \rho c$  – амплитуда заданной нормальной компоненты;  $\omega$  – круговая частота ( $\xi_m$  – амплитуда колебательной скорости на поверхности поршня;  $\rho$  и  $c$  – плотность твердого тела и скорость волн в нем соответственно).

Компоненты тензора упругих напряжений определяются законом Гука:

$$\sigma_{mn} = \lambda \varepsilon_{mn} + 2\mu \varepsilon_{mn},$$

где  $\lambda$  и  $\mu$  – упругие постоянные Ламе;  $\varepsilon_{mn}$  – компоненты тензора упругих деформаций.

Амплитуда электрического сигнала от принятой продольной волны определяется как среднее значение напряжения на приемном преобразователе П (рис. 1):

$$U_{lg} = \frac{1}{S_{пр}} \left| \iint_{S_{пр}} \sigma_{zz} dS_{пр} \right|, \quad (1)$$

где  $S_{пр}$  – площадь преобразователя;  $\sigma_{zz}$  – нормальная компонента тензора упругих напряжений.

Подставим в (1) компоненты тензора упругих напряжений

$$\sigma_{zz} = -(\lambda k_{lg}^2 + 2\mu \zeta^2) \phi|_{z=H},$$

где  $k_{lg}$  – волновое число для продольной волны;  $\zeta = \sqrt{k_{lg}^2 - k^2}$ ;  $\phi$  – скалярный потенциал смещения;  $H$  – расстояние от излучателя до приемника, причем  $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$  ( $k_x$ ,  $k_y$  – проекции волнового числа на оси  $x$  и  $y$  соответственно).

В результате получим выражение для амплитуды электрического сигнала от принятой продольной волны:

$$U_{lg} = \frac{1}{S_{\Pi}} \left| \iint_{S_{\Pi}} \left[ (\lambda k_{lg}^2 + 2\mu \zeta^2) \frac{\sigma_0 S_{\Pi}}{(2\pi)^2 \mu k_{tr}^2} \times \right. \right.$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2J_1(ka)}{ka} \frac{(\eta^2 - k^2)(\eta^2 + k^2)}{F(k)} \times \\ \times e^{-j(k_x x + k_y y + \zeta H)} dk_x dk_y \Big] dS_{\Pi} \Big|,$$

где  $k_{tr}$  – волновое число для поперечной волны;  $J_1(ka)$  – цилиндрическая функция Бесселя первого порядка;  $\eta = \sqrt{k_{tr}^2 - k^2}$ ;

$$F(k) = (k^2 - \eta^2)^2 + 4k^2 \zeta \eta.$$

После представления проекций волновых чисел в сферической системе координат, интегрирования по площади преобразователя и выполнения ряда простых преобразований получим:

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

где  $\beta = b/a$ ;  $\alpha = c_{lg}/c_{tr}$ ;  $s = H/(a^2/\lambda_{lg})$ , причем  $c_{lg}$ ,  $c_{tr}$  – скорости продольных и поперечных волн;  $\lambda_{lg}$  – длина продольной волны.

Для проведения численного интегрирования разобьем область интегрирования в (2) на 3 участка:

$$U_{lg}/\sigma_0 = 0.5(k_{lg} a)^2 \times \\ \times \left\{ \int_0^{-1} \frac{2J_1(k_{lg} a x)}{k_{lg} a x} \frac{2J_1(k_{lg} a \beta x)}{k_{lg} a \beta x} Q(x) G_1(x) x dx + \right. \\ + \int_1^{\alpha} \frac{2J_1(k_{lg} a x)}{k_{lg} a x} \frac{2J_1(k_{lg} a \beta x)}{k_{lg} a \beta x} Q(x) G_2(x) x dx + \\ \left. + \int_{\alpha}^{\infty} \frac{2J_1(k_{lg} a x)}{k_{lg} a x} \frac{2J_1(k_{lg} a \beta x)}{k_{lg} a \beta x} Q(x) G_3(x) dx \right\}, \quad (3)$$

где

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

$$G_2(x) = \frac{(\alpha^2 - 2x^2)^2}{(\alpha^2 - 2x^2)^2 - 4jx\sqrt{x^2 - 1}\sqrt{\alpha^2 - x^2}} \times e^{-j\frac{(k_1 d)^2}{2\pi} s\sqrt{x^2 - 1}};$$

$$G_3(x) = \frac{(\alpha^2 - 2x^2)^2}{(\alpha^2 - 2x^2)^2 - 4jx^2\sqrt{x^2 - 1}\sqrt{\alpha^2 - x^2}} \times e^{-\frac{(k_1 d)^2}{2\pi} s\sqrt{x^2 - 1}};$$

$Q(x)$  – функция, зависящая от коэффициентов отражения и прохождения волны.

Коэффициенты отражения и прохождения продольной волны определяются решением задачи отражения и преломления волн на свободной поверхности твердого полупространства и на плоском слое дефекта толщиной  $d$  с использованием скалярного и векторного потенциалов смещения.

Коэффициент отражения от свободной поверхности твердого тела определялся выражением

$$\Delta = \begin{vmatrix} xe^{-j\alpha} & \alpha e^{-j\beta} & \alpha b e^{j\delta} & -xe^{-j\gamma} & -xe^{-j\gamma} & -\alpha b e^{-j\delta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_b & x & x & \alpha_b & p & -x \\ \alpha_c e^{-j\alpha} & -xe^{-j\beta} & xe^{j\delta} & \alpha_d e^{-j\gamma} & -\alpha_d e^{-j\gamma} & xe^{-j\delta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -x & -\alpha_d & \alpha_d & -x & x & \alpha_c \\ A_x e^{-j\alpha} & A_c e^{-j\beta} & -\rho A_d e^{j\delta} & \rho A_y e^{-j\gamma} & -\rho A_y e^{-j\gamma} & -\rho A_d e^{-j\delta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho A_d & -\rho A_y & \rho A_y & \rho A_d & -A_c & A_x \\ -A_c e^{-j\alpha} & A_{z\alpha} e^{-j\beta} & \rho A_{w\alpha} e^{j\delta} & \rho A_d e^{j\gamma} & \rho A_d e^{-j\gamma} & -\rho A_{w\alpha} e^{-j\delta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho A_{w\alpha} & \rho A_d & \rho A_d & -\rho A_{w\alpha} & -A_{z\alpha} & -A_c \end{vmatrix}$$

где

$$\beta = k_{lg1} \sqrt{1 - x^2} d; \quad \delta = k_{lg2} \frac{c_{lg2}}{c_{lg1}} \sqrt{\alpha_{lg12}^2 - x^2} d;$$

$$\gamma = k_{ltr2} \frac{c_{ltr2}}{c_{lg1}} \sqrt{\alpha_{ltr12}^2 - x^2} d; \quad \alpha_b = \sqrt{\alpha_{ltr11}^2 - x^2};$$

$$p = \sqrt{1 - x^2}; \quad \alpha_c = \sqrt{\alpha_{ltr11}^2 - x^2}; \quad \alpha_d = \sqrt{\alpha_{ltr12}^2 - x^2};$$

$$A_x = 2 \frac{x}{\alpha_{ltr11}^2} \sqrt{\alpha_{ltr11}^2 - x^2}; \quad A_c = 1 - 2 \frac{x^2}{\alpha_{ltr11}^2};$$

$$A_d = 1 - 2 \frac{x^2}{\alpha_{ltr12}^2}; \quad A_y = 2 \frac{x}{\alpha_{ltr12}^2} \sqrt{\alpha_{ltr12}^2 - x^2};$$

$$A_{z\alpha} = 2 \frac{x}{\alpha_{ltr11}^2} \sqrt{1 - x^2}; \quad A_{w\alpha} = 2 \frac{x}{\alpha_{ltr12}^2} \sqrt{\alpha_{lg12}^2 - x^2},$$

$$R_{lg1g_{rp}} = N_1 - N_2 / N_1 + N_2, \quad (4)$$

где

$$N_1 = 4 \frac{x^2}{\alpha_{ltr11}^4} \sqrt{\alpha_{ltr11}^2 - x^2};$$

$$N_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - x^2}} \left( 1 - 2 \frac{x^2}{\alpha_{ltr11}^2} \right)^2,$$

причем  $\alpha_{ltr11} = c_{lg1} / c_{ltr1}$  ( $c_{lg1}$ ,  $c_{ltr1}$  – скорости продольной (lg) и поперечной (tr) волн в первой (1) среде соответственно).

Коэффициенты отражения от слоя дефекта и прохождения через него имеют вид:

$$R_{lg1g_d} = \Delta_2 / \Delta; \quad T_{lg1g_d} = \Delta_7 / \Delta, \quad (5)$$

где  $\Delta$  – определитель;  $\Delta_i$  – алгебраические дополнения, получаемые заменой соответствующего столбца определителя столбцом свободных членов  $\Delta_0$ .

Определитель имеет вид

причем  $\alpha_{lg1g_{12}} = c_{lg1} / c_{lg2}$ ;  $\alpha_{ltr12} = c_{lg1} / c_{ltr2}$  ( $c_{lg1}$ ,  $c_{lg2}$ ,  $c_{ltr2}$  – скорости продольной (lg) и поперечной (tr) волн в первой (1) и второй (2) средах соответственно).

Вектор-столбец свободных членов описывается следующим образом:

$$\Delta_0 = [\alpha e^{j\beta}, 0, x e^{j\beta}, 0, -A_c e^{j\beta}, 0, A_{z\alpha} e^{j\beta}, 0]^T.$$

В зависимости от применяемого метода функция  $Q(x)$  определяется следующим образом:

- при эхометод  $Q(x) = R_{lg1g_d}(x)$ ;
- при теневом методе  $Q(x) = T_{lg1g_d}(x)$ ;
- при зеркально-теневом методе

$$Q(x) = R_{lg1g_{rp}}(x) T_{lg1g_d}(x).$$

**Математическое моделирование.** Подставив в (3) коэффициенты отражения и прохождения (4), (5), определим отношение  $A$  амплитуды эхосигнала на участке с дефектом к амплитуде эхосигнала на бездефектном участке. Все расчеты произведены для случая заполнения несплошности шлаком 48-АФ-1 с параметрами:  $c_l = 4000$  м/с;  $c_t = 1600$  м/с;  $\rho = 2500$  кг/м<sup>3</sup>.

На рис. 2 представлены зависимости указанного отношения от толщины дефекта  $d$  для прошедших сквозных сигналов продольных волн для теневого метода ультразвукового контроля при различных волновых размерах преобразователя.

На рис. 3 представлена аналогичная зависимость для донных эхосигналов продольных волн для зеркально-теневого метода ультразвукового контроля при тех же волновых размерах преобразователя.

В соответствии с ГОСТ 22727–88<sup>1</sup> максимальная чувствительность теневого и зеркально-теневого методов соответствует порогу регистрации дефекта на уровне –8 дБ от амплитуды прошедшего (донного) сигнала (линии 1 на рис. 2–4). Как и следовало ожидать, за счет двукратного прохождения через дефект выявляемость зеркально-теневого метода выше, чем выявляемость теневого метода.

Следует отметить, что при увеличении волнового числа излучающего и приемного преобразователей предельная выявляемость ухудшается, и при контроле теньевым методом обнаружение плоскостных дефектов, заполненных твердым веществом, не может быть гарантировано. Видно, что при таком пороге регистрации продольными волнами можно регистрировать несплошности раскрытием от 100 мкм.

На рис. 4 представлена зависимость отношения амплитуды эхосигнала от плоскостного дефекта к амплитуде донного эхосигнала на бездефектном участке для продольных волн (эхометод ультразвуковой дефектоскопии) от толщины дефекта  $d$  для различных волновых размеров преобразователя.

В соответствии с ГОСТ 22727–88 максимальная чувствительность эхометода соответствует порогу регистрации дефекта на уровне –24 дБ от амплитуды донного сигнала. Видно, что при таком пороге регистрации продольными волнами можно обнаруживать несплошности раскрытием от 5 мкм.

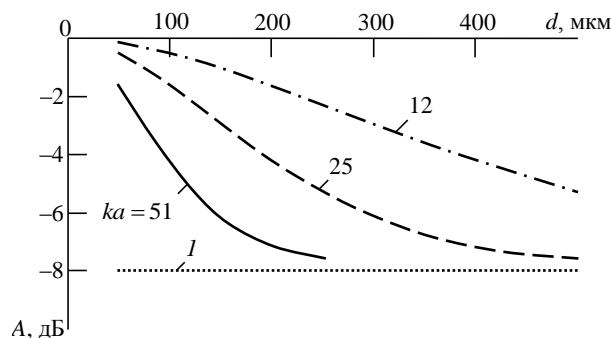


Рис. 2. Соотношение амплитуд прошедших сквозных сигналов на участке с дефектом и на бездефектном участке для продольных волн при теньевом методе ультразвукового контроля

Fig. 2. The ratio of the amplitudes of transmitted through signals in a section with a defect and in a defect-free section for longitudinal waves with the shadow method of ultrasonic testing ( $I$  – standard registration threshold)

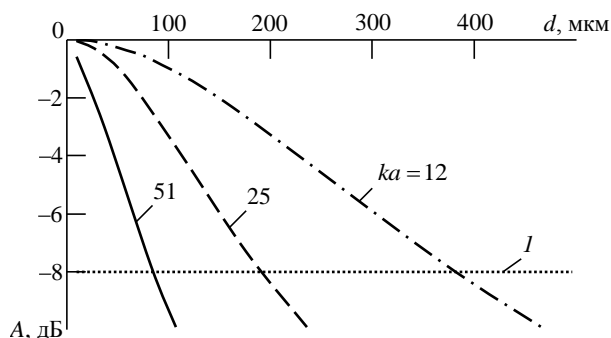


Рис. 3. Соотношение амплитуд донных эхосигналов на участке с дефектом и на бездефектном участке для продольных волн при зеркально-теновом методе ультразвукового контроля

Fig. 3. The ratio of the amplitudes of the bottom echo signals in the area with the defect and in the defect-free area for longitudinal waves with the mirror-shadow method of ultrasonic testing ( $I$  – standard registration threshold)

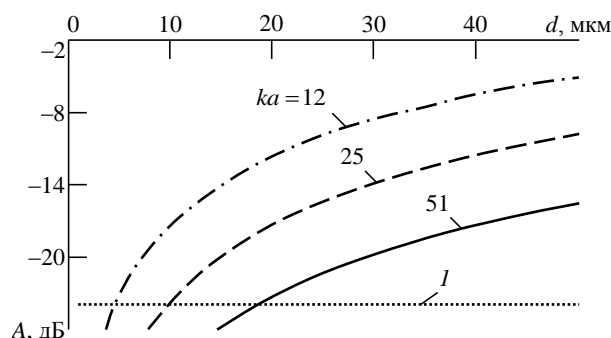


Рис. 4. Соотношение амплитуд донных эхосигналов на участке с дефектом и на бездефектном участке для продольных волн при эхометод ультразвукового контроля

Fig. 4. The ratio of the amplitudes of the bottom echo signals in the area with the defect and in the defect-free area for longitudinal waves with the echo method of ultrasonic testing ( $I$  – standard registration threshold)

<sup>1</sup> ГОСТ 22727–88. Прокат листовой. Методы ультразвукового контроля. Введен в действие 01.07.88. М.: Изд-во стандартов, 1988. 14 с.

**Закключение.** Получены аналитические зависимости, позволяющие производить оценку предельной выявляемости плоскостных протяженных дефектов листового проката ультразвуковыми методами контроля. В результате сравнения эхо-, теневого и зеркально-теневого методов ультразвукового контроля авторами было показано,

что методами отражения возможно выявление плоскостных дефектов раскрытием 5 мкм, методами прохождения – только более 100 мкм. Следовательно, для выявления дефектов с малым раскрытием при контроле листового проката целесообразнее отдавать предпочтение эхометоду ультразвукового контроля.

### Список литературы

1. Ахмадиев Р. Р., Афанасенко В. Г. Ультразвуковой контроль границы сплавления двухслойного листового проката // Теория. Практика. Инновации. 2017. № 12 (24). С. 88–94.
2. Яцышен В. В., Слюсарев М. В. Ультразвуковая диагностика дефектов зоны сплавления в слоистых композиционных материалах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14, № 4. С. 103–105.
3. Розина М. В., Трофимова Г. А. Некоторые "болезненные" вопросы ультразвукового контроля традиционными методами // В мире неразрушающего контроля. 2013. № 2. С. 18–20.
4. Мобильная многоканальная установка "ЛИСТ-4" для ультразвукового контроля листа / В. Г. Щербинский, С. А. Артемьев, Н. М. Антонова, К. В. Панферов, А. Ю. Грачев, А. П. Копылов, А. Ф. Захаров, С. А. Мирошин // Дефектоскопия. 2014. № 5. С. 3–8.
5. Мелешко Н. В., Петров А. А. Зарубка и боковое цилиндрическое отверстие // MEGATECH. Новые технологии в промышленной диагностике и безопасности. 2013. № 1. С. 68–71.
6. Баев А., Майоров А., Коновалов Г. Ультразвуковой контроль объектов со слоистой и неоднородной структурой // Наука и инновации. 2015. № 2 (144). С. 14–18.
7. Гурвич А. К., Кириков А. В. О чувствительности ультразвукового контроля листового проката // В мире неразрушающего контроля. 2004. № 1. С. 43–46.
8. Паврос С. К., Лапин Ю. В., Иванова Т. А. Ультразвуковой контроль листового проката при высоких температурах // В мире неразрушающего контроля. 2004. № 3. С. 16–17.
9. L. Qin, J. Liu, B. Jiang. Simulation and Experimental Research of Sheet Metal Defect Detection based on Ultrasonic Lock-In Thermography // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 602–604: Progress in Materials and Processes. P. 2283–2286. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.602-604.2283
10. Ultrasonic Based Non-destructive Testing Technique for Predicting Shape Defects in Rolled Steel Sheets / S. S. Rajendran, S. S. Indimath, B. Srinivasagan, M. Dutta, A. Pandit // ISIJ International. 2019. Vol. 59, № 1. P. 93–97. doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-499
11. Murashov V. Non-destructive testing and evaluation designs by the acoustic methods. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2017. 167 p.
12. Данилевич С. Б., Третьяк В. В. Метрологическое обеспечение достоверности результатов контроля // Контроль. Диагностика. 2018. № 7. С. 56–60. doi: 10.14489/td.2018.07.pp.056-060
13. 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". 2002. № 1. С. 25–32.
14. Паврос К. С., Сидоренко И. Г. Предельная выявляемость плоскостных дефектов листового проката зеркально-теневым методом // Вестн. современных исследований. 2017. №10-1 (13). С. 95–100.
15. Паврос К. С., Сидоренко И. Г. О предельной выявляемости плоскостных дефектов листового проката методами отражения // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2013. № 6. С. 103–109.

### Информация об авторах

**Паврос Кирилл Сергеевич** – старший преподаватель кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – неразрушающий контроль, акустика, техническая диагностика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия.

E-mail: qnet@inbox.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6160-6899>

**Сидоренко Ирина Геннадьевна** – инженер по направлению "Приборостроение", ассистент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) (2010). Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – неразрушающий контроль, акустика, техническая диагностика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия.  
E-mail: irina.sidorenko.spb@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-6462-1485>

**Бернд Рокштро** – инженер по сварке, Технологический институт в Россвейне (Германия, 1974) инженер GMH Prüftechnik. Автор 10 научных публикаций. Сфера научных интересов – неразрушающий контроль, техническая диагностика, системы ультразвукового контроля.  
Адрес: GMH Prüftechnik, ул. Томаса Манна, д. 63, Нюрнберг, 90471, Германия  
E-mail: b\_rockstroh@t-online.de

## References

1. Akhmadiev R. R., Afanasenko V. G. Ultrasonic Control of the Border of Two-Layer Sheets. *Teoria. Praktika. Innovacii* [Theory. Practice. Innovation]. 2017, no. 12 (24), pp. 88–94. (In Russ.)
2. Yacishen V. V., Slusarev M. V. Ultrasonic Diagnostics of Defects in the Fusion Zone in Layered Composite Materials. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*. 2011, vol. 14, no. 4, pp. 103–105. (In Russ.)
3. Rozina M. V., Trofimova G. A. Some of the «Painful» Issues of Traditional Ultrasonic Testing. *V mire NK* [In the world of NT]. 2013, no. 2, pp. 18–20. (In Russ.)
4. Sherbinskii V. G., Artemiev S. A., Antonova N. M., Panferov K. V., Grachev A. U., Kopylov A. P., Zaharov A. F., Mitroshin S. A. Mobile Multi-Channel Installation "LIST-4" for Ultrasonic Control of Sheet Metal. *Defektoskopy*. 2014, no. 5, pp. 3–8. (In Russ.)
5. Meleshko N. V., Petrov A. A. Angular Reflector and Side Cylindrical Hole. *MEGATECH Novye tehnologii v promyshlennoi diagnostike i bezopasnosti* [MEGATECH New Technologies in Industrial Diagnostics and Safety]. 2013, no. 1, pp. 68–71. (In Russ.)
6. Baev A., Mayorov A., Konovalov G. Ultrasonic Inspection of with Layered and Inhomogeneous Structure Objects. *Nauka i innovacii* [Science and Innovation]. 2015, no. 2 (144), pp. 14–18. (In Russ.)
7. Gurvich A. K., Kirikov A. V. About sensitivity of ultrasonic testing of rolled steel. *V mire NK* [In the world of NT]. 2004, no. 1, pp. 43–46. (In Russ.)
8. Pavros S. K., Lapin U. V., Ivanova T. A. Ultrasonic Testing of Rolled Steel in the High Temperatures. *V mire NK* [In the world of NT]. 2004, no. 3, pp. 16–17. (In Russ.)
9. L. Qin, J. Liu, B. Jiang. Simulation and experimental research of sheet metal defect detection based on ultrasonic lock-in thermography. *Progress in Materials and Processes, Advanced materials research*. 2013, vol. 602–604, pp. 2283–2286.
10. Rajendran S. S., Indimath S. S., Srinivasagan B., Dutta M., Pandit A. Ultrasonic Based Non-destructive Testing Technique for Predicting Shape Defects in Rolled Steel Sheets. *ISIJ International*. 2019, vol. 59, no. 1, pp. 93–97.
11. Murashov V. Non-Destructive Testing and Evaluation Designs by the Acoustic Methods. Saarbrücken, Lambert Academic Publishing, 2017, 167 p.
12. Danilevich S. B., Tretyak V. V. Metrological Supervision of Control Results Validity. *Control. Diagnostika* [Control. Diagnostics]. 2018, no. 7, pp. 56–60. doi: 10.14489/td.2018.07.pp.056-060 (In Russ.)
13. Pavros S. K., Pavros K. S., Romanovich V. A. Analysis of Diffraction Errors in Measuring the Attenuation Coefficients of Longitudinal and Transverse Waves in Solids. *Proc. of Saint Petersburg Electrotechnical University*. 2002, no. 1, pp. 25–32. (In Russ.)
14. Pavros K. S., Sidorenko I. G. Ultimate Detectability of Laminations in Rolled Sheet by Mirror-Shadow Method. *Vestnik sovremennyh issledovaniy* [Bulletin of Modern Research]. 2017, no. 10-1 (13), pp. 95–100. (In Russ.)
15. Pavros K. S., Sidorenko I. G. About Ultimate Detectability of Laminations in Rolled Sheet by Mirror-Shadow Method. *Proc. of Saint Petersburg Electrotechnical University*. 2013, no. 6, pp. 103–109. (In Russ.)

## Information about the authors

**Kirill S. Pavros** – Senior Lecturer of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Engineering. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: non-destructive testing, acoustics, technical diagnostics.  
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia  
E-mail: qnet@inbox.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6160-6899>

**Irina G. Sidorenko** – Engineer in Instrument Engineering (2010), Assistant of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: non-destructive testing, acoustics, technical diagnostics.  
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia  
E-mail: irina.sidorenko.spb@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-6462-1485>



**Bernd Rockstroch** – Welding engineer of Institute of Technology, Rosswein (Germany, 1974), Engineer of GMH Prüftechnik, Germany. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: non-destructive testing, ultrasound systems.

Address: GMH Prüftechnik, 63 Thomas-Mann-Street, Numberg 90471, Germany

E-mail: b\_rockstroh@t-online.de



## Книжные новинки

Кузнецов В. В., Москвин П. П.

### МЕЖФАЗНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ГЕТЕРОЭПИТАКСИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ

ISBN 978-5-8114-3809-9

СПб: Лань, 2019. 376 с. : ил.

Издательство "ЛАНЬ": [lan@lanbook.ru](mailto:lan@lanbook.ru); [www.lanbook.com](http://www.lanbook.com)

Магазин электронных книг Global F5: <http://globalf5.com>

В книге на основе различных приближений теории регулярных растворов и модели диффузионного массопереноса рассмотрены особенности эпитаксии твердых растворов на основе полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  и  $A^2B^6$ . Проанализировано влияние упругих деформаций на смещение фазовых равновесий в многокомпонентных системах. Изложены методики расчета равновесных и когерентных диаграмм состояния многокомпонентных систем. Дано математическое описание эффекта стабилизации периода решетки и кинетики кристаллизации многокомпонентных твердых растворов. Рассмотрены критические явления и термодинамическая устойчивость подложки в неравновесной жидкой фазе. Особое внимание уделено процессам получения изопериодических гетероструктур на основе четверных и пятерных твердых растворов, которые широко применяются в различных приборах полупроводниковой оптоэлектроники.