

УДК 620.179.16

К. С. Паврос, И. Г. Сидоренко

О ПРЕДЕЛЬНОЙ ВЫЯВЛЯЕМОСТИ ПЛОСКОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА МЕТОДАМИ ОТРАЖЕНИЯ

Выполнены исследования предельной выявляемости плоскостных дефектов листового проката в контактном варианте при контроле методами отражения. Получены выражения, позволяющие оценивать границы выявляемости дефектов при различных волновых размерах преобразователей.

Ультразвуковой контроль, листовой прокат, расслоение, эхометод, продольные и поперечные волны

Основными типами несплошностей листового проката, по которым производится их браковка, являются расслоения металла и скопления неметаллических включений. Расслоения – это вытянутые в направлении прокатки плоскостные нарушения сплошности листа, расположенные приблизительно параллельно его граням на разных уровнях по толщине. Они имеют литейное происхождение, т. е. представляют собой раскатанные несплошности, встречающиеся внутри слитков: усадочные раковины, газовые пузыри, неметаллические включения и др. Наиболее распространены расслоения металла, заполненные неметаллическими включениями. Обычно это – частицы шлака, попадающие в расплав при нарушении технологии разливки металла. Расслоение характеризуется величиной его раскрытия (толщиной прослойки включения) и площадью в плоскости листа. Наиболее грубые расслоения, вызванные неметаллическими включениями, могут иметь раскрытие порядка сотен и более микрометров и площадь – несколько сотен квадратных сантиметров и более.

Массовый сдаточный контроль листового проката, к качеству которого в настоящее время предъявляются 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 ультразвукового пучка. При соответствующем перемещении пучка в процессе сканирования листа прозвучивается весь его объем.

Выявляемость несплошностей при ультразвуковой дефектоскопии принято оценивать реальной чувствительностью контроля, которая определяет минимальные размеры дефектов того или иного типа, уверенно выявляемых в изделиях определенного вида. Расслоения в листах характеризуются еще и величиной раскрытия (толщиной в направлении прозвучивания) и размерами в плоскости листов. Поэтому применительно к контролю проката следует использовать два понятия о реальной чувствительности: по отношению к величине раскрытия и к размерам расслоений в плоскости листов.

Реальную чувствительность контроля по отношению к величине раскрытия расслоений будем характеризовать минимальной величиной раскрытия выявляемых протяженных расслоений на максимальной чувствительности, предусмотренной нормативными документами.

При контроле листового проката ее задают амплитудой регистрируемых сигналов, отсчитываемых в децибелах относительно начального уровня отсчета [1], [2]. За начальный уровень отсчета принимают:

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

- амплитуду первого прошедшего сигнала на произвольном участке листа при контроле эхосквозным методом [2];

- амплитуду первого донного импульса на произвольном участке листа при контроле эхо-методом с регистрацией сигналов во втором временном интервале (между первым и вторым донными импульсами) [2];

- амплитуду эхоимпульса от искусственного плоскодонного отражателя диаметром ДЭ контрольного образца при контроле эхометодом.

Временной интервал при контроле контактным способом и с использованием пьезоэлектрических и электромагнитно-акустических преобразователей устанавливается между зондирующим импульсом и первым донным сигналом. 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, $U_{ДI}$ – эхосигнал от дефекта в первом временном интервале, $U_{ДII}$ ($U_{ДII}'$, $U_{ДII}''$), $U_{ДIII}$ – эхосигналы от дефекта во втором временном интервале). При автоматизированном контроле проката с целью сокращения неконтролируемой мертвой зоны используется регистрация сигналов во втором временном интервале [2], а величина порогового уровня в этом случае устанавливается в долях амплитуды донного сигнала на дефектном участке изделия.

Для оценки предельных возможностей эхометода с регистрацией сигналов в первом и втором временном интервалах необходимо:

- рассчитать амплитуду эхосигнала от плоского дефекта, амплитуду донного сигнала на бездефектном участке и их отношение при регистрации сигналов в первом временном интервале;

- амплитуду эхосигнала от дефекта во втором временном интервалах, амплитуду первого донного сигнала на дефектном участке и их отношение.

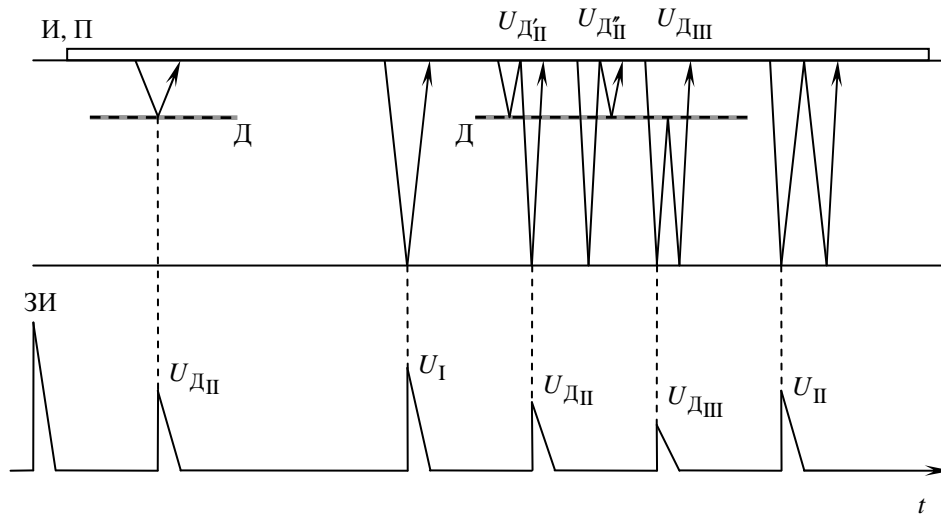


Рис. 1

Для получения расчетных соотношений амплитуд регистрируемых сигналов на дефектном и бездефектном участках изделия достаточно в выражениях для определения амплитуды сигнала дополнительно учесть:

- для расчета амплитуды донного сигнала на бездефектном участке изделия – коэффициент отражения звукового пучка от нижней грани изделия;
- для определения амплитуды эхосигнала от дефекта в первом временном интервале – коэффициент отражения звукового пучка от плоскопараллельного слоя малой толщины;
- для оценки амплитуды донного сигнала на дефектном участке изделия – коэффициент отражения звукового пучка от нижней грани изделия и квадрат коэффициента прозрачности звукового пучка через плоскопараллельную прослойку;
- коэффициент отражения звукового пучка от плоскопараллельного слоя, квадрат коэффициента прозрачности звукового пучка через плоскопараллельную прослойку и квадрат коэффициента отражения звукового пучка от грани изделия.

Чтобы определить амплитуду сигнала для случая продольных волн, используем выражение для упругого напряжения, действующего на преобразователь в режиме приема, вызванного падающей на него продольной волной [3], [4]:

$$\sigma_{zz_{\text{лпр}}} = -(\lambda k_l^2 + 2\mu\zeta^2)\varphi|_{z=H}, \quad (7)$$

где λ, μ – упругие постоянные 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 от принятой продольной волны определяется как среднее значение этого напряжения по площади $S_{\text{п}}$ преобразователя в режиме приема:

$$U_l = \frac{1}{S_{\text{п}}} \left| \iint_{S_{\text{п}}} \sigma_{zz_{\text{лпр}}} dS_{\text{п}} \right|.$$

Подставляя в это выражение формулу для нормальной компоненты упругого напряжения (1) и используя известные выражения для компонент скалярного потенциала, получаем интегральное соотношение для оценки амплитуды электрического сигнала от принятой продольной волны:

$$U_l = \frac{1}{S_{\Pi}} \left| \iint_{S_{\Pi}} \left[\frac{(\lambda k_t^2 + 2\mu\zeta^2) \sigma_0 S_{\Pi}}{(2\pi)^2 \mu k_t^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2J_1(ka)}{ka} \frac{(\eta^2 - k^2)(\eta^2 + k^2)}{F(k)} e^{-j(k_x x + k_y y + \zeta H)} dk_x dk_y \right] dS_{\Pi} \right|,$$

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

После представления проекций волновых чисел в сферической системе координат, аналогично [3], [4], интегрирования по площади преобразователя и выполнения простых преобразований, можно получить:

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

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

Полученное выражение будем рассчитывать численным методом. Для проведения численного интегрирования разобьем (2) на три составляющих. Поскольку α всегда меньше единицы (скорость поперечных волн меньше скорости продольных), то

$$\int_0^{\infty} = \int_0^1 + \int_1^{\alpha} + \int_{\alpha}^{\infty}.$$

$$U_l = \frac{1}{2} (k_l a)^2 \left\{ \int_0^1 \frac{2J_1(k_l a x)}{k_l a x} \frac{2J_1(k_l a \beta x)}{k_l a \beta x} G_1(x) x dx + \int_1^{\alpha} \frac{2J_1(k_l a x)}{k_l a x} \frac{2J_1(k_l a \beta x)}{k_l a \beta x} G_2(x) x dx + \int_{\alpha}^{\infty} \frac{2J_1(k_l a x)}{k_l a x} \frac{2J_1(k_l a \beta x)}{k_l a \beta x} G_3(x) x dx \right\}, \quad (3)$$

где

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

$$G_2(x) = \left[\frac{(\alpha^2 - 2x^2)^4}{(\alpha^2 - 2x^2)^4 + 16x^4(x^2 - 1)(\alpha^2 - x^2)} + j \frac{4x^2\sqrt{x^2 - 1}\sqrt{\alpha^2 - x^2}(\alpha^2 - 2x^2)^2}{(\alpha^2 - 2x^2)^4 + 16x^4(x^2 - 1)(\alpha^2 - x^2)} \right] \times e^{-\frac{1}{2\pi}(k_1 a)^2 s \sqrt{x^2 - 1}},$$

$$G_3(x) = \frac{(\alpha^2 - 2x^2)^2}{(\alpha^2 - 2x^2)^2 - 4x^2\sqrt{x^2 - 1}\sqrt{x^2 - \alpha^2}} e^{-\frac{1}{2\pi}(k_1 a)^2 s \sqrt{x^2 - 1}}.$$

Для определения амплитуды эхосигнала от дефекта $U_{ДI}'$ в первом временном интервале необходимо в подынтегральное выражение (3), подставить коэффициент отражения от дефекта и разбить интеграл на части аналогично тому, как это уже было сделано. Получим следующее интегральное соотношение:

$$U_{ДI}' = \frac{1}{2}(k_1 a)^2 \left\{ \int_0^1 \frac{2J_1(k_1 a x)}{k_1 a x} \frac{2J_1(k_1 a \beta x)}{k_1 a \beta x} G_1(x) R_{\Phi_{II}} x dx + \int_1^{\alpha_{II11}} \frac{2J_1(k_1 a x)}{k_1 a x} \frac{2J_1(k_1 a \beta x)}{k_1 a \beta x} G_2(x) R_{\Phi_{II}} x dx + \int_{\alpha_{II11}}^{\alpha_{II12}} \frac{2J_1(k_1 a x)}{k_1 a x} \frac{2J_1(k_1 a \beta x)}{k_1 a \beta x} G_3(x) R_{\Phi_{II}} x dx + \int_{\alpha_{II12}}^{\infty} \frac{2J_1(k_1 a x)}{k_1 a x} \frac{2J_1(k_1 a \beta x)}{k_1 a \beta x} G_3(x) R_{\Phi_{II}} x dx \right\},$$

где $R_{\Phi_{II}}$ – коэффициент отражения продольной волны от плоскостного дефекта, заполненного твердым веществом (определитель 8-го порядка).

Для определения амплитуды донного эхосигнала U_{II} на бездефектном участке изделия необходимо в подынтегральное выражение (3) подставить коэффициент отражения звукового пучка от нижней грани изделия и разбить интеграл на соответствующие части:

$$U_{II} = \frac{1}{2}(k_1 a)^2 \left\{ \int_0^1 \frac{2J_1(k_1 a x)}{k_1 a x} \frac{2J_1(k_1 a \beta x)}{k_1 a \beta x} G_1(x) R_{\Phi_{\Gamma II}} x dx + \int_1^{\alpha_{II11}} \frac{2J_1(k_1 a x)}{k_1 a x} \frac{2J_1(k_1 a \beta x)}{k_1 a \beta x} \times G_2(x) R_{\Phi_{\Gamma II}} x dx + \int_{\alpha_{II11}}^{\infty} \frac{2J_1(k_1 a x)}{k_1 a x} \frac{2J_1(k_1 a \beta x)}{k_1 a \beta x} G_3(x) R_{\Phi_{\Gamma II}} x dx \right\},$$

где $R_{\Phi_{\Gamma II}}$ – коэффициент отражения продольной волны от нижней грани листа (определитель 8-го порядка).

Аналогичные выражения получены для случаев контроля во втором временном интервале (в статье не приводятся), а также использования поперечных волн.

Для определения границ выявляемости в первом временном интервале необходимо определить отношение сигнала от дефекта к донному сигналу на бездефектном участке:

$$U_{гр1} = 20 \lg \left(\frac{U_{Д1}}{U_{I1}} \right).$$

Для определения границ выявляемости во втором временном интервале, необходимо определить отношение сигнала от дефекта во втором временном интервале к донному сигналу на дефектном участке:

$$U_{гр2} = 20 \lg \left(\frac{U_{Д2}}{U_{Д1}} \right).$$

Расчеты, проведенные по вышеуказанным выражениям, позволяют сделать вывод, что при контроле методами отражения в соответствии с существующей нормативно-технической документацией нижняя граница выявляемости лежит в пределах 5...7 мкм. Выявление расслоений с меньшим раскрытием маловероятно.

В качестве примера на рис. 2 представлены зависимости амплитуды сигнала от несплошности к амплитуде донного сигнала для продольных (кривая 1) и поперечных (кривая 2) волн при одинаковом соотношении величин волнового размера преобразователя ($ka = 40$) при различных значениях раскрытия d дефекта (параметры d , мкм; заполнения несплошности $c_l = 4000$ м/с, $c_t = 1600$ м/с, $\rho = 2500$ кг/м³).

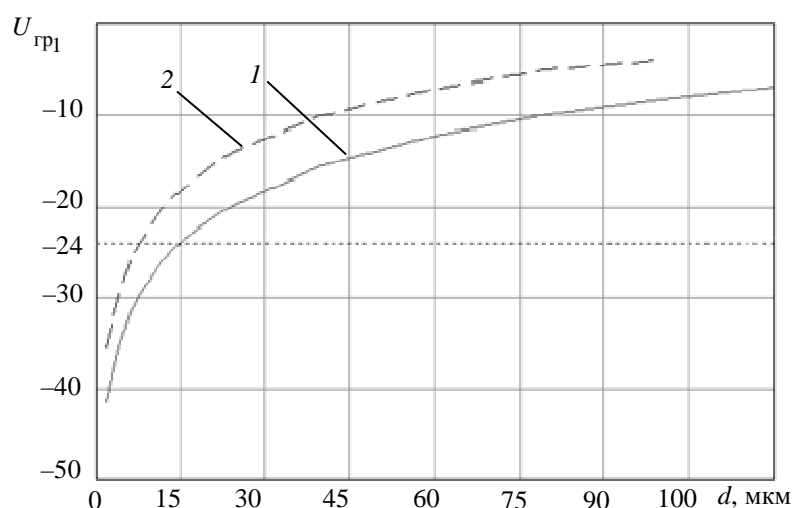


Рис. 2

В соответствии с [1] максимальная чувствительность эхометода соответствует порогу регистрации дефекта на уровне – 24 дБ от амплитуды донного сигнала. Анализируя график, можно видеть, что при таком пороге регистрации продольными волнами можно регистрировать несплошности с раскрытием 15 мкм, поперечными волнами – 7 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 22727–88. Прокат листовой. Методы ультразвукового контроля. Введ. 01.07.88. М.: Изд-во стандартов, 1988.
2. А. с. № 1355925, МКИ G01 29/04. Способ ультразвуковой дефектоскопии / А. С. Голубев, К. С. Паврос, А. В. Топунов № 4058435; Заявл. 16.04.86. Опубл. 30.11.87. Бюл. № 44. 4 с.
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 Рос. конф. по неразрушающим физическим методам и средствам контроля. СПб., 2002.
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

ULTIMATE DETECTABILITY OF LAMINATIONS IN ROLLED SHEET BY REFLECTION METHODS

Ultimate detectability of laminations in rolled sheet by contact reflection methods was investigated. Expressions for estimating the limits of ultimate detectability of defects at the various wave dimensions of transducers were obtained.

Ultrasonic testing, rolled sheet, lamination, echo method, longitudinal and transverse waves