



*Гурвич Анатолий Константинович*

Д-р техн. наук, профессор ПГУПС, вице-президент РОНКТД, III уровень по акустическому виду НК.

*Кириков Андрей Васильевич*

Начальник департамента НК Компании «Нординкрафт» (Череповец), III уровень по акустическому виду НК.

В порядке обсуждения предлагается

- ввести в число основных параметров эхо-метода УЗК листового проката эффективную площадь электроакустического преобразователя;
- в документацию на УЗК ввести минимальный коэффициент отражения несплошностей, подлежащих выявлению;
- в качестве основного опорного отражателя при настройке чувствительности использовать донную поверхность контролируемого листа.

Вводные замечания

Листовой прокат - основной материал, из которого изготавливаются каркасы зданий и сооружений, автодорожные и железнодорожные мосты. При этом используются листы из углеродистой и низколегированной стали толщиной  $\delta = 6 \div 40$  мм. Качество листового проката предопределяет надежность конструкций. Контроль качества проводится, как правило, ультразвуковым эхо-методом в соответствии с действующими нормативными документами. Отечественные стандарты выгодно отличаются от зарубежных номенклатурой применяемых методов УЗК и конкретизацией способов настройки чувствительности с учетом класса сплошности контролируемых листов. Предусматривается два способа настройки чувствительности по эхо-методу («Э»):

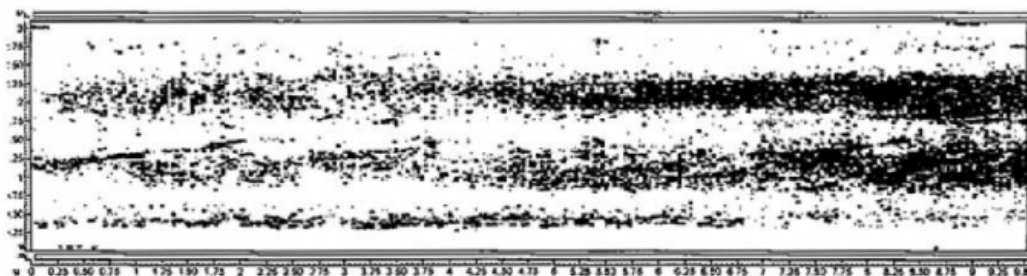
«А» — опорный отражатель - донная поверхность; чувствительность задается числом  $N$  дБ, относительно первого донного (опорного) сигнала на бездефектном участке листа, в пределах значений которого эхо- сигнал признается принадлежащим искомой несплошности; условная запись - «А N Э»;

«D» — опорный отражатель - плоское дно отверстия диаметром  $d$ , мм, нормальное к акустической оси преобразователя; эхо-сигнал признается принадлежащим искомой

несплошности, если его амплитуда равна или превышает амплитуду опорного эхо-сигнала от «плоскодонки»; условная запись – «D d Э».

Так, ГОСТ 22727 для листов класса сплошности 1 предусматривает способы «А16Э» и «D 5Э». Ручной, механизированный и автоматизированный контроль листов в соответствии с этим стандартом широко используется для обеспечения необходимого уровня качества листового проката.

Поводом для написания данной статьи послужил любопытный случай. Партия из 18 стальных листов толщиной 10 мм на одном из заводов была забракована установкой «Север-10» производства компании «Нординкрафт» (частота колебаний  $f \approx 1,6$  МГц). На большей части листов были обнаружены обширные (единицы квадратных метров!) несплошности, предположительно расслоения. Дефекто-грамма одного из этих листов приведена на рис. 1. Заключение: 12 из 18 листов - безусловный брак!



*Рис. 1. Протокол УЗК листа № 7563 на установке «Север-10»: длина листа 12000 мм, ширина 3000 мм, толщина 10 мм; дата контроля 25.09.2003; результат контроля - БРАК*

Однако в ходе дублирующего контроля с помощью дефектоскопической тележки с дефектоскопом УД2-12 ( $f \approx 2,5$  МГц) ни одного квадратного сантиметра несплошности не было зафиксировано. Заключение: все листы - безусловно годные!

Прибыв на место, один из авторов убедился в исправности обеих систем контроля. Измерительный модуль с электромагнитно-акустическими преобразователями (ЭМАП) установки «Север-10», специально остановленный для демонстрации, как раз находился в зоне большой по площади несплошности. На мониторе, практически во всех каналах, наблюдались отчетливые эхо-сигналы, позволяющие уверенно локализовать предполагаемый дефект: несплошность по глубине располагалась в средней трети сечения листа. При этом дефектоскопом УД2-12 с отдельно-совмещенным ПЭП (чувствительность была настроена по плоскодонному отражателю диаметром 5 мм) эти несплошности не фиксировались. Более того, несплошность не регистрировалась системой АСД дефектоскопа даже при настройке по плоскодонному отражателю диаметром 3 мм! При этом на экране ЭЛТ можно было наблюдать эхо-сигнал от несплошности, амплитуда которого существенно «не дотягивала» до заданного уровня (порогового значения).

Налицо - принципиальное различие результатов контроля: обе системы были настроены в соответствии с первым классом ГОСТ 22 727-88 («Север-10» - по способу А16Э, УД2-12 - по способу D5Э). Оба эти способа законны и равноправны,

поэтому столь разный, кардинально разный результат, вызвал недоумение. Неужели поперечные волны, возбуждаемые ЭМАП установки «Север», обеспечивают преимущество в чувствительности?

Автор спросил, нет ли в распоряжении дефектоскопистов завода другого раздельно-совмещенного ПЭП с большим размером пьезоэлементов. Такой преобразователь (фирмы Крауткремер) нашелся. Его диаметр визуально в два раза превышал диаметр преобразователя для УД2-12 (а стало быть, эффективная площадь пьезоэлементов стала примерно в четыре раза больше). Дефектоскоп УД2-12 с этим «новым» ПЭП был вновь настроен по плоскодонному сверлению диаметром 5 мм; и ПЭП, будучи установленным на поверхность листа, немедленно «выдал» эхо-сигнал от дефекта, превышающий заданный (пороговый) уровень! Наконец-то!

Напрашивался вывод, что ни рабочая частота, ни тип применяемых упругих колебаний не оказывают такого влияния на выявляемость реальных дефектов листового проката, как эффективная площадь электроакустического преобразователя, которая не регламентирована как основной параметр контроля ни в одном из стандартов на УЗК листового проката! Попробуем разобраться в причинах этого явления, которое вполне отражает специфику УЗК листового проката.

Специфика УЗК листового проката

Из-за технологических особенностей производства листового проката большая часть внутренних несплошностей имеет выраженную плоскую форму. В подавляющем большинстве случаев их плоскость параллельна плоскости проката. Поэтому дефекты при правильном подходе успешно выявляются с помощью упругих волн, возбуждаемых по нормали к поверхности листа.

Объектом поиска и последующего анализа являются, как правило, дефекты в виде плоскостных протяженных несплошностей, площадь которых составляет от нескольких единиц до нескольких десятков и даже сотен квадратных сантиметров. Плоская форма большей части протяженных несплошностей различного происхождения породила в практике их обобщенное условное название - «расслоения» («laminations» - в терминах международных стандартов и норм). Коэффициент отражения упругих волн от «расслоений» принципиально может принимать любые значения от 0 до 1.

Приведенный в начале статьи факт свидетельствует о том, что при настройке чувствительности дефектоскопа по плоскодонному отверстию (способ «D») в соответствии с действующими стандартами дефекты типа плоскостных протяженных несплошностей («расслоений») могут быть не зафиксированы. В отличие от компактных дефектов, протяженные дефекты полностью перекрывают ультразвуковой пучок и, как показали экспериментальные исследования, в ряде случаев слабо отражают упругие волны (коэффициент отражения  $R_n < 1$ ).

Предварительные экспериментальные исследования по оценке отражающих характеристик протяженных дефектов проводились на образце с «расслоением», вырезанном из листа, забракованного на заводе установкой «Север-10». В процессе эксперимента измерялись: на бездефектном участке - амплитуда донного сигнала  $U_0$ ;

на участке с расслоением - амплитуды донного сигнала и эхо-сигнала от расслоения при использовании ПЭП ( $U_{0п}, U_{дп}, U_{рп}$ ) на частоту 5 и

10 МГц и ЭМАП ( $U_{0э}, U_{дэ}, U_{рэ}$ ) на частоту 5 МГц. При этом длина продольной волны, излучаемой ПЭП на частоту 10 МГц, была близка к длине поперечной волны, излучаемой ЭМАП на частоту 5 МГц.

Сопоставление амплитуд  $U_{0п}, U_{дп}, U_{рп}$  и амплитуд  $U_{0э}, U_{дэ}, U_{рэ}$  позволило заключить, что коэффициент отражения исследуемого «расслоения» по амплитуде слабо зависит от типа волны и частоты колебаний в диапазоне 5 - 10 МГц. На разных участках образца его значение составляло  $R_n \approx 0,05 \div 0,3$ .

Анализ акустического тракта при контроле эхо-методом

Контроль эхо-методом листов толщиной  $\delta = 6 \div 40$  мм ведется отдельно-совмещенными ПЭП или ЭМАП. В показаны возможность и преимущества применения совмещенных ПЭП вместо отдельно-совмещенных. Учитывая это, выполним анализ акустического тракта для совмещенных прямых ПЭП, пренебрегая для наглядности незначительным затуханием упругих колебаний в листе. Оценим длину ближней зоны преобразователей. Рассмотрим для примера контроль листов толщиной  $\delta$  преобразователями диаметром  $2a = 10$  мм на частоту  $f = 5$  МГц (при  $5 < \delta < 20$  мм) и  $2a = 20$  мм на частоту  $f = 2,5$  МГц (при  $\delta > 20$  мм). Преобразователи возбуждают продольную (ПЭП,  $C_l = 5900$  м/с) или сдвиговую (ЭМАП,  $C_t = 3260$  м/с) волну.

При этом протяженность  $g_b = a^2 f / C$  ближней зоны в стали составляет для ПЭП соответственно 21 и 42 мм, а для ЭМАП - 38 и 76 мм. Видно, что искомые дефекты в листах лежат в ближней зоне преобразователей. Тогда амплитуда эхо-сигнала от дефекта в листе без учета затухания упругой волны может быть оценена по выражению:

$$U \approx k R_d S_d / S_a \quad (1)$$

где  $R_d$ , - коэффициент отражения упругой волны от дефекта;  $S_d$  - отражающая площадь дефекта;  $S_a$  - эффективная площадь преобразователя;  $k$  - коэффициент, лежащий в пределах от 1 до 4. В дальнейшем примем  $k = 1$ .

Заметим, что отражающая площадь компактного дефекта всегда меньше эффективной площади преобразователя, т. е.  $S_{dk} < S_a$ , а отражающая площадь протяженного дефекта, полностью перекрывающего ультразвуковой луч, равна эффективной площади преобразователя, т. е.  $S_{dp} = S_a$ .

В общем случае для обеспечения воспроизводимости результатов контроля при настройке чувствительности по способам «А» и «D» площадь преобразователя  $S_a$  целесообразно выбирать так, чтобы амплитуды эхо-сигналов от искомого компактного дефекта  $U_{dk}$  площадью  $S_{dk} < S_a$ , для которого  $R \approx 1$ , и от «расслоения» площадью  $S_{dp} = S_a$ , для которого  $R_{dp} \approx 0,1 \div 0,3$ , были близки, т. е. чтобы  $U_{dk} \approx U_{dp}$ . Данному условию удовлетворяет равенство, вытекающее из (1):

$$S_{dk} / S_a = R_{dp} \cdot S_a / S_a \quad (2)$$

Из (2) следует соотношение для выбора эффективной площади преобразователя:

$$S_a = S_{dk} / R_{dp} \quad (3)$$

Для того, чтобы обеспечить результаты контроля листов при настройке чувствительности дефектоскопа в соответствии с ГОСТ 22727 по способам А N Э и D d Э, площадь преобразователя должна иметь вполне конкретное значение. Принимая за площадь искомого компактного дефекта площадь плоскодонного отверстия диаметром 5 мм ( $S_{dk} = 19,6 \text{ мм}^2$ ) и принимая значение коэффициента отражения «расслоения»  $R_{dp} = 0,1$ , из (3) находим:  $S_a \approx 196 \text{ мм}^2$  и  $2a \approx 16 \text{ мм}$ .

При диаметре преобразователя  $2a \approx 10 \text{ мм}$  амплитуда эхо-сигнала  $U_{dp}$  от «расслоения» в нашем примере была бы в  $(16/10)^2 = 2,56$  раз (приблизительно на 8 дБ) меньше, чем амплитуда эхо- сигнала при диаметре  $2a \approx 16 \text{ мм}$ , что и объясняет природу отмеченного выше несовпадения результатов НК листов.

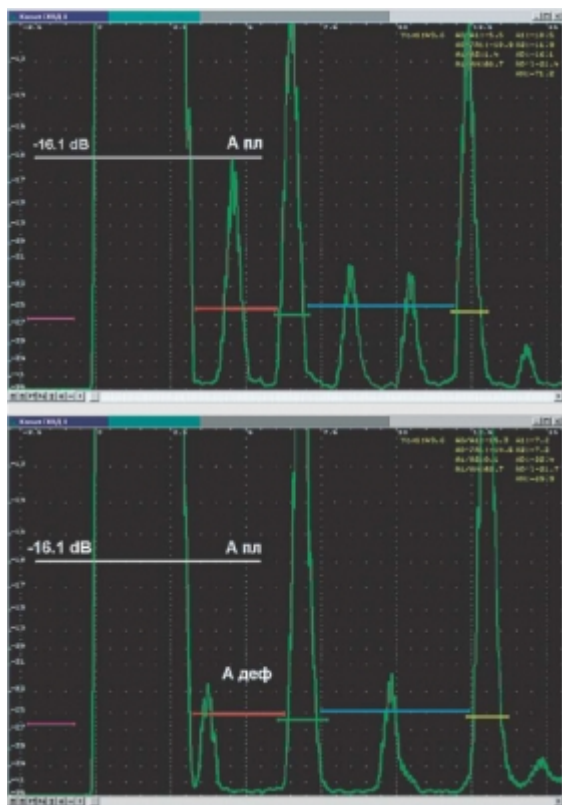


Рис. 2. Осциллограммы при прозвучивании образца листа при расположении ЭМАП размером 8 x 8 мм: а - над плоскодонным отверстием диаметром 5 мм; б - над реальным «расслоением»

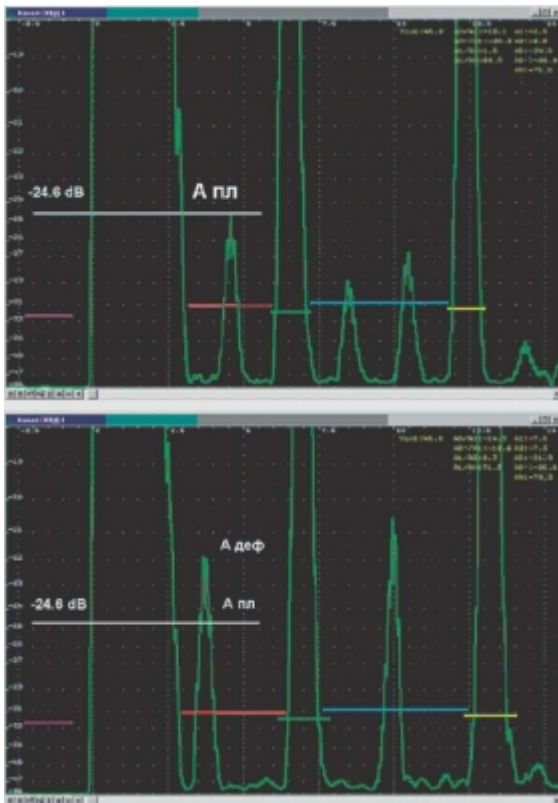


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для ЭМАП размером 12 x 12 мм

На рис. 2 и 3 иллюстрируется пример использования преобразователей с двумя различными размерами активной зоны при обнаружении реального расслоения. В обоих случаях аппаратура настраивалась по плоскодонному сверлению диаметром 5 мм (рис. 2а и 3а, эхо-сигнал Апл). При этом ЭМАП размером 8 x 8 мм ( $S_a = 64 \text{ мм}^2$ ) уверенно «пропускает» «расслоение» (рис. 2б, эхо-сигнал Адеф), а ЭМАП размером 12 x 12 мм ( $S_a = 144 \text{ мм}^2$ ) столь же уверенно его обнаруживает (рис. 3б, эхо-сигнал А деф)!

При использовании раздельно-совмещенных преобразователей необходимо учитывать ряд других факторов, но в целом и здесь должен обязательно приниматься во внимание принцип: размеры и конструкция преобразователя определяют достоверность результатов УЗК листового проката.

#### Заключительные замечания

Естественно, изложенные исследования и предпосылки следует рассматривать как предварительные. Тем не менее, они позволяют заключить, что для повышения надежности обнаружения как протяженных, так и компактных дефектов, а также для обеспечения воспроизводимости результатов УЗК листового проката целесообразно:

1. Ввести в число основных параметров контроля упругими волнами эффективную площадь (размеры) преобразователя, выбирая их с учетом условия (2).
2. При контроле эхо-методом продольными или сдвиговыми волнами, излучаемыми прямыми совмещенными (или РС) преобразователями, перейти на настройку

чувствительности, используя в качестве опорного отражателя поверхность листа (донную поверхность) и, при необходимости, - АРД-диаграммы. Применение плоского дна отверстий при оценке чувствительности сохранить для научных и прикладных исследований и, при необходимости, для НК толстолистного проката.

3. Ввести в нормативные документы на ультразвуковой контроль листового проката минимальное значение коэффициента отражения несплошностей (дефектов), подлежащих выявлению при заданной чувствительности контроля.



*Рис. 4. Участок разрушенного по расслоению трубопровода*