

Исследование структуры и свойств

Физические методы исследования и контроля

УДК 620.179.162

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ ПОКОВОК УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ЭХО-МЕТОДОМ

© А. Н. Киреев¹*Статья поступила 3 ноября 2015 г.*

Предложен метод, позволяющий определять углы наклона плоскостных точечных несплошностей к поверхности ввода ультразвуковой (УЗ) волны, коэффициент корректировки чувствительности УЗ аппаратуры и эквивалентного размера несплошности при диагностировании стальных поковок. Экспериментально исследованы параметры отражения УЗ волны от плоскостных отражателей, расположенных под разным углом к поверхности ввода ультразвука. Получены аналитические зависимости для определения угла наклона и коэффициента корректировки. Разработан алгоритм оценки плоскостных точечных несплошностей, расположенных под углом к поверхности ввода УЗ волны по амплитудной характеристике. Для автоматизации расчетов при дефектометрии использовали программу NDTRT-15. Представленный метод и программное обеспечение апробированы при диагностировании элементов экипажной части тепловозов 2ТЭ116У, 2ТЭ116УД, 3ТЭ116У УЗ эхо-методом.

Ключевые слова: техническое диагностирование; неразрушающий контроль; ультразвуковой контроль; импульсный эхо-метод; дефектоскоп; дефектометрия.

Стальные изделия, изготовленные методами пластической деформации (ковка, прокат, штамповка), получили широкое распространение в различных отраслях промышленности, поскольку они обладают высокими механическими и прочностными характеристиками, позволяют выдерживать значительные статические и динамические нагрузки. Во избежание производственных и эксплуатационных отказов проводят их комплексную техническую диагностику. Прежде всего это касается изделий транспортного машиностроения, нефтегазовой отрасли и строительной индустрии.

Комплексная диагностика включает и ультразвуковой (УЗ) неразрушающий контроль стальных поковок на наличие в них внутренних недопустимых несплошностей (дефектов). Наиболее широко используют УЗ импульсный эхо-метод, обладающий следующими преимуществами: наибольшая чувствительность и помехоустойчивость, хорошая разрешающая способность, возможность контроля при одностороннем доступе к изделию, небольшие размеры и мобильность аппаратуры [1].

Особенности технологии изготовления стальных поковок обуславливают то, что возникающие в них несплошности имеют преимущественно плоскостную

форму, однако их ориентация при этом может быть различной. Для определения формы и ориентации несплошностей применяют методы УЗ дефектометрии.

Максимальное отражение УЗ волны при контроле эхо-методом наблюдают при расположении несплошности параллельно поверхности ввода волны, т.е. перпендикулярно акустической оси преобразователя. При расположении под углом к поверхности ввода амплитуда эхо-сигнала вследствие ухода УЗ волны в сторону уменьшается, что может привести к недостоверной оценке несплошности и допуску в эксплуатацию дефектных изделий.

Хорошие результаты по определению ориентации плоскостной несплошности дает контроль в двух и трех взаимно ортогональных плоскостях. Однако он не всегда возможен, так как существуют объекты, имеющие только одну плоскость для ввода УЗ волны (остальные плоскости имеют либо сложную форму, либо недостаточную чистоту поверхности, либо различные конструктивные элементы, препятствующие установке преобразователя на поверхности ввода и процессу сканирования).

Контроль во взаимно ортогональных плоскостях также позволяет определять относительно большие углы наклона несплошностей, поскольку при малых

¹ ПАО «Лугансктепловоз», г. Луганск, Украина.



Рис. 1. УЗ импульсный дефектоскоп УД2-70 (а) и комбинированный пьезоэлектрический преобразователь П131-2,5-0и18-BO-04 (б)

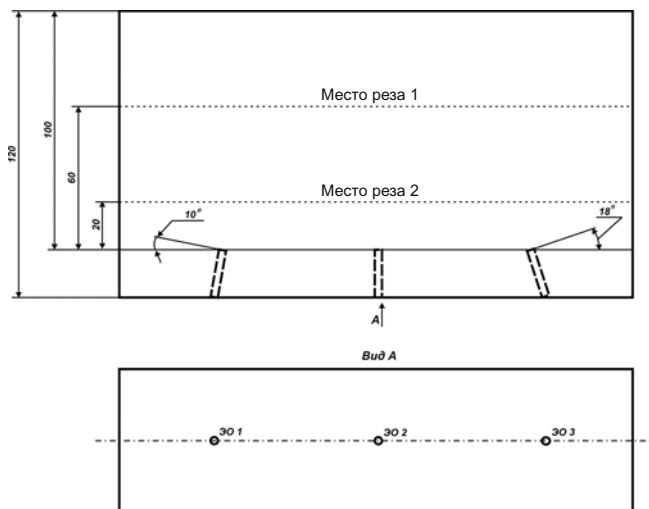


Рис. 2. Схема расположения ЭО на образце

углах максимальное отражение фиксируют только в плоскости, близкой к фронту волны, а отражение в остальных плоскостях обусловлено рассеянием волны краями несплошности. Эхо-сигналы, вызванные таким рассеянием, могут не регистрироваться на фоне шумов УЗ аппаратуры.

Цель работы — разработка метода определения углов наклона плоскостных несплошностей к поверхности ввода УЗ волны при УЗ диагностировании

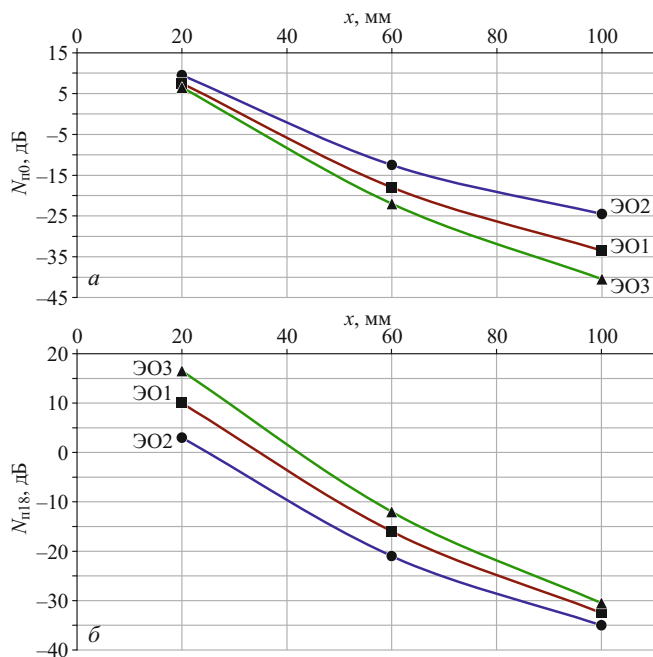


Рис. 3. Зависимость амплитудной характеристики эхо-сигнала от расстояния x до ЭО для углов ввода 0 (а) и 18° (б)

стальных поковок импульсным эхо-методом, коэффициента корректировки чувствительности УЗ аппаратуры и эквивалентного размера несплошностей.

В образце из стали 45 исследовали характеристики отражения УЗ волны от плоскостных отражателей, расположенных под разными углами к поверхности ввода ультразвука. Для этого использовали УЗ импульсный дефектоскоп УД2-70 и комбинированный пьезоэлектрический преобразователь П131-2,5-0и18-BO-04 с двумя преобразователями (углы ввода продольной УЗ волны — 0 и 18° , диаметр пьезоэлектрических элементов — 12 мм) (рис. 1). В качестве контактной жидкости для передачи акустического сигнала от преобразователя в образец применяли масло промышленное И-40 (кинематическая вязкость — 65 сСт).

В образце выполнили три эталонных отражателя (ЭО) диаметром 3 мм (рис. 2). Плоскостные цилиндрические отражатели располагались параллельно поверхности ввода ультразвука (ЭО 2), под углами 10° (ЭО 1) и 18° (ЭО 3) к ней. Расстояние от поверхности ввода до ЭО составляло 100, 60 и 20 мм.

При углах ввода 0 и 18° измеряли амплитудную характеристику $N_{\text{дБ}}$ УЗ эхо-сигналов от ЭО. Результаты представлены на рис. 3. Амплитудную характеристику $N_{\text{дБ}}$ определяли с использованием соотношения

$$N = 20 \lg \frac{A_1}{A_0} = N_1 - N_0,$$

где N_1 и N_0 — амплитудные характеристики эхо-сигналов от ЭО и бокового цилиндрического отражателя (диаметр — 6 мм) в стандартном образце СО-2, расположенного на глубине 40 мм [2].

Видно, что изменение угла наклона плоскостного отражателя к поверхности ввода УЗ волны ведет к уменьшению (с 3 до 16 дБ) амплитудной характеристики эхо-сигнала (при контроле прямым преобразователем — угол ввода 0°) в диапазоне 20 – 100 мм.

По полученным данным $N_{п0}$ и $N_{п18}$ рассчитывали угловые коэффициенты γ по формуле:

$$\gamma = N_{п18} - N_{п0}. \quad (1)$$

На рис. 4, а представлена экспериментальная зависимость угла наклона плоскостного отражателя к поверхности ввода α от углового коэффициента γ .

Аппроксимируя полученную зависимость методом наименьших квадратов и учитывая погрешность измерений, получим

$$\alpha = \frac{363,64\gamma + 2000,02 + 18,182x}{313,821 + x}. \quad (2)$$

Выражение (2) позволяет рассчитать угол наклона плоскостной несплошности к поверхности ввода α по угловому коэффициенту γ (находим из выражения (1)) и расстоянию от поверхности ввода УЗ волны до ЭО x (определяем глубиномерным устройством дефектоскопа). Результаты расчета приведены на рис. 4, б.

Для нахождения изменения амплитудной характеристики эхо-сигнала от плоскостных отражателей с разными углами наклона (параллельного и наклоненного к поверхности ввода на угол 18°) необходимо определить изменение коэффициента ослабления УЗ волны, т.е.

$$\Delta\delta_{0-18} = \delta_{18} - \delta_0, \quad (3)$$

где δ_0 и δ_{18} — коэффициенты ослабления УЗ волны при отражении от плоскостного отражателя, параллельного поверхности ввода и наклоненного к ней на угол 18° .

Коэффициент ослабления [3] рассчитывали по формуле:

$$\delta = -\frac{1}{2x} \ln \frac{\lambda^2 x^2 10^{N/20}}{S_a S_b}, \quad (4)$$

где λ — длина УЗ волны, мм; x — расстояние до отражателя, мм; N — амплитудная характеристика эхо-сигнала от несплошности, дБ; S_a и S_b — площади преобразователя и отражателя, мм².

Из выражений (3) и (4) получаем:

$$\Delta\delta_{0-18} = \frac{1}{2x} \ln 10^{(N_{п0-0} - N_{п0-18})/20}, \quad (5)$$

где $N_{п0-0}$ и $N_{п0-18}$ — амплитудные характеристики эхо-сигнала (при применении преобразователя) от отражателя, параллельного поверхности ввода УЗ волны и наклоненного к ней на угол 18° .

По экспериментальным данным $\Delta\delta_{0-18}$ составило 0,008986478 Нп/мм.

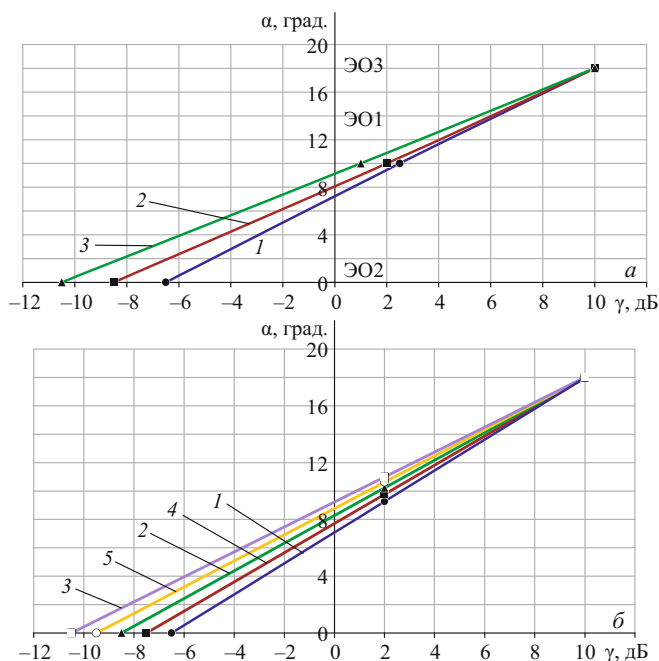


Рис. 4. Экспериментальная (а) и расчетная (б) зависимости угла наклона плоскостного отражателя α от углового коэффициента γ при расстоянии $x = 20$ (1), 40 (4), 60 (2), 80 (5) и 100 (3) мм

Для амплитудной характеристики эхо-сигнала от плоскостного цилиндрического отражателя (модель плоскостной точечной несплошности) с учетом (3) имеем

$$N = 20 \lg \left(\frac{S_a S_b}{\lambda^2 x^2} e^{-2\delta x} \right). \quad (6)$$

Из выражений (3), (6) находим аналитическую зависимость для определения разницы амплитудной характеристики эхо-сигналов от плоскостных отражателей с углами наклона 0 и 18° :

$$\Delta N_{0-18} = N_{18} - N_0 = 20 \lg [\exp(-2x\Delta\delta_{0-18})]. \quad (7)$$

Разница амплитудной характеристики, приходящаяся на 1° угла наклона ΔN_{1° , описывается выражением

$$\Delta N_{1^\circ} = \Delta \frac{N_{0-18}}{18} = \frac{20}{18} \lg [\exp(-2x\Delta\delta_{0-18})]. \quad (8)$$

Полученная зависимость для расчета разницы между амплитудной характеристикой эхо-сигнала от плоскостной несплошности, наклоненной к поверхности ввода УЗ волны на угол α и параллельной ей, — коэффициент корректировки чувствительности УЗ аппаратуры:

$$K_\alpha = \Delta N_{1^\circ} \alpha = \frac{20,202(20\gamma + x + 110) \lg [\exp(-2x\Delta\delta_{0-18})]}{313,821 + x}. \quad (9)$$

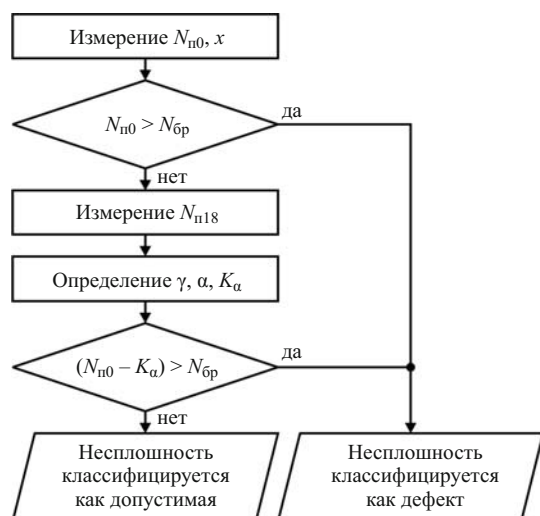


Рис. 5. Схема оценки плоскостных точечных несплошностей при УЗ контроле стальных поковок

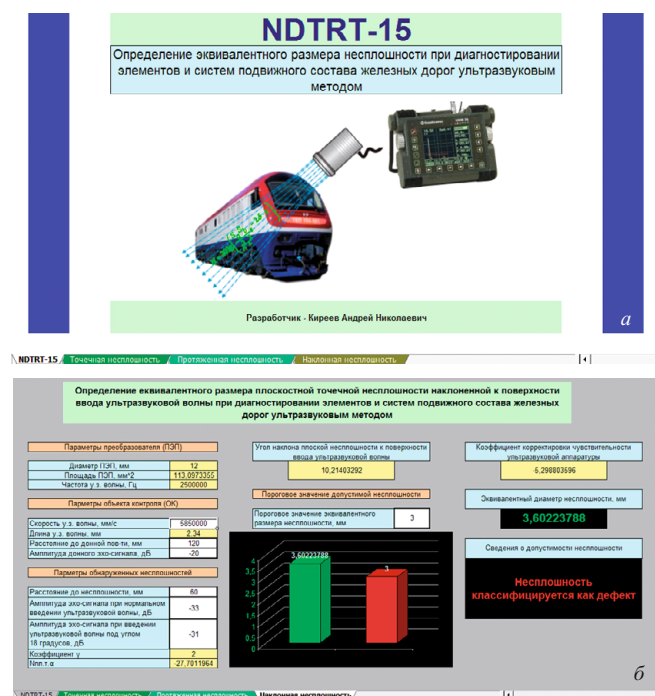


Рис. 6. NDTRT-15: а — стартовое окно; б — раздел «Наклонная несплошность»

Схема оценки плоскостных несплошностей при УЗ контроле стальных поковок по амплитудной характеристике представлена на рис. 5.

Из выражения (6) находим зависимость для определения эквивалентного размера плоскостной точечной несплошности, параллельной поверхности ввода УЗ волны:

$$d_{\text{пл.т.0}} = \frac{2\lambda x 10^{N_{\text{п0}}-0/40}}{(2\lambda x_{\text{д}} 10^{N_0/20} / S_a)^{x/(2x_{\text{д}})} \sqrt{S_a \pi}}, \quad (10)$$

где $x_{\text{д}}$ — расстояние от поверхности ввода ультразвука до донной поверхности, мм.

Для амплитудной характеристики (при зеркальном отражении) при наклонной к поверхности ввода точечной плоскостной несплошности запишем

$$N_{\text{пл.т.}\alpha} = N_{\text{п0}} - 0 - K_{\alpha}. \quad (11)$$

Из выражений (9) – (11) находим зависимость для эквивалентного размера наклонной несплошности:

$$d_{\text{пл.т.}\alpha} = \frac{4\lambda x 10^{N_{\text{пл.т.}\alpha}/40}}{\pi d_a (2\lambda x_{\text{д}} 10^{N_0/20} / S_a)^{x/(2x_{\text{д}})}}, \quad (12)$$

где d_a — диаметр преобразователя, мм; $N_{\text{пл.т.}\alpha} = [N_{\text{п0}}(313,821 + x + 404,04 \lg(e^{-0,017972956x})) - 20,202 \times [20N_{\text{п18}} + x + 110) \lg(e^{-0,017972956x})]/(313,821 + x)$.

Для автоматизации расчетов при определении угла наклона плоскостной несплошности, ее эквивалентного размера и оценке ее допустимости путем сравнения с пороговым значением эквивалентного размера (задается технической документацией) использовали программное обеспечение NDTRT-15 (рис. 6), разработанное для диагностирования элементов и систем подвижного состава железных дорог. Однако оно может применяться и в других отраслях промышленности.

Таким образом, предложенный метод дефектометрии позволяет определять небольшие углы наклона плоскостных точечных несплошностей к поверхности ввода УЗ волны, коэффициент корректировки чувствительности УЗ аппаратуры и эквивалентный размер несплошности данного типа при УЗ диагностике стальных поковок.

Расчеты можно автоматизировать с помощью программы NDTRT-15. Программное обеспечение и разработанный подход апробированы при УЗ диагностике элементов экипажной части тепловозов 2ТЭ116У, 2ТЭ116УД, 3ТЭ116У.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кірсєв А. М. Наукові основи та практична реалізація вдосконалення ультразвукового контролю елементів та систем рухомого складу залізниць. — Луганськ: Ноулідж, 2012. — 142 с.
2. ГОСТ 14782–86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. — М.: Изд-во стандартов, 1988. — 38 с.
3. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. — М.: Машиностроение, 1981. — 240 с.

REFERENCES

1. Kireev A. M. Naukovi osnovi ta praktichna realizatsiya vdoskonalennya ul'trazvukovogo kontrolyu elementiv ta sistem rukhomogo skladu zaliznits' [Scientific bases and practical implementation of improvement ultrasonic testing of components and systems for rolling stock of railways: Monograph]. — Lugans'k: Noulidzh, 2012. — 142 p. [in Ukrainian].
2. RF State Standard GOST 14782–86. Kontrol' nerazrushayushchii. Soedineniya svarnye. Metody ul'trazvukovyie [Nondestructive control. Welded Connections. Ultrasonic methods]. — Moscow: Izd-vo standartov, 1988. — 38 p. [in Russian].
3. Ermolov I. N. Teoriya i praktika ul'trazvukovogo kontrolya [Theory and practice of ultrasonic testing]. — Moscow: Mashinostroyeniye, 1981. — 240 p. [in Russian].