

УДК 620.179.16: 620.179.17

**С.Ю. ПЛЕСНЕЦОВ**

## **ВИСОКОЕФЕКТИВНИЙ КОНТРОЛЬ ТРУБ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ**

Розроблено новий метод контролю ультразвуковими імпульсами всього об'єму металу труб. Для реалізації цього методу розроблений електромагнітно-акустичний перетворювач нового типу, який дає можливість виявляти дефекти новим і традиційним методом та вимірювати товщину стінки об'єктів контролю. Розроблений електромагнітно-акустичний перетворювач працює в широкому діапазоні частот та амплітуд сигналу, що дозволяє ефективно виявляти дефекти на різних глибинах, з різними геометричними параметрами. Експериментальні дослідження трубних зразків підтвердили високу ефективність розробленого методу та нових ультразвукових безконтактних перетворювачів.

**Ключові слова:** труба, ультразвуковий контроль, ультразвуковий перетворювач, електромагнітно-акустичний, імпульс, дефект.

Разработан новый метод контроля ультразвуковыми импульсами всего объема металла труб. Для реализации этого метода разработан электромагнитно-акустический преобразователь нового типа, который дает возможность выявлять дефекты новым и традиционным методом и измерять толщину стенки объектов контроля. Разработанный электромагнитно-акустический преобразователь работает в широком диапазоне частот и амплитуд сигнала, что позволяет эффективно выявлять дефекты на разных глубинах, с разными геометрическими параметрами. Экспериментальные исследования трубных образцов подтвердили высокую эффективность разработанного метода и новых ультразвуковых бесконтактных преобразователей.

**Ключевые слова:** труба, ультразвуковой контроль, ультразвуковой преобразователь, электромагнитно-акустический, импульс, дефект.

A new method for controlling pipes with ultrasonic pulses of the total volume of metal is developed. For the implementation of this method, an electromagnetic acoustic converter of a new type has been developed, which makes it possible to detect defects by a new and traditional method and measure the thickness of the wall of control objects. The developed electromagnetic acoustic converter works in a wide range of frequencies and amplitudes of the signal, which allows to effectively detect defects at different depths, with different geometric parameters. The frequency range for developed electromagnetic acoustic transducer varies in the range from 0,5 to 6 MHz, and allows for measurement of wide array of tubular samples, allowing detection of both internal and surface defects. Accordingly wide array of defects can be detected, varying from cracks to air bubbles and caverns. Experimental studies of tube samples confirmed the high efficiency of the developed method and new ultrasonic noncontact transducers. Two transducers are used within given solution to generate and receive the signal, for further processing within hybrid analog/digital system. The magnetic field generated by first transducer emits the acoustic waves for the second transducer to register. Wave set registered includes straight, transverse and Rayleigh waves, which are echoed from defect and other elements of the sample, creating the image which allows to analyze the defect in complex form, including its location and geometry.

**Keywords:** pipe, ultrasonic control, ultrasonic transducer, electromagnetic acoustic, pulse, defect.

**Вступ.** Промисловість України випускає та широко застосовує трубну продукцію. На частині труб, як і при виробництві, так і при експлуатації виникають поверхневі і внутрішні дефекти. Несвоєчасне їх виявлення може привести до аварій з значними матеріальними і людськими втратами. Особливо це стосується нафтогазової, енергетичної, хімічної промисловості. В промисловості використовуються труби зі значним діапазоном діаметрів, сортаменту сталі, товщини стінок. Це накладає на засоби контролю труб значні вимоги, підвищує їх технологічність та збільшує їх вартість.

Найбільш широке застосування для діагностики труб має ультразвуковий метод контролю [1]. Проте, контактний метод ультразвукового контролю (УЗК) не завжди забезпечує високу якість дефектоскопії. Це обумовлено необхідністю використання контактної рідини та виконувати спеціальну підготовку поверхні об'єкту контролю (ОК). В результаті погіршується екологічний стан довкілля, витрачається енергія та метал виробу, зношується інструмент, мають місце значні сумарні втрати часу на проведення контролю.

Вирішити цю проблему можливо за рахунок використання електромагнітно – акустичного контролю [2]. Але, незважаючи на те, що перші публікації про використання ЕМА способу з'явилися ще в 30-х роках двадцятого століття, до цього часу, незважаючи на суттєві переваги, багаторічний об'єм

його ефективного використання в промисловості, незначний. На сьогодні існує упереджене ставлення, що причинами обмеженого використання ЕМА способу є недостатня чутливість до дефектів, значні розміри, несучасні енергетичні показники [3]. Тому дослідження і розробки, направлені на підвищення можливостей ЕМА способу, в тому числі для виявлення дефектів поверхні, є актуальними.

**Основна частина.** Для виконання досліджень з удосконалення ЕМА способу було розроблено ЕМА перетворювачі нового покоління. В ультразвуковому роздільно-поєднаному електромагнітно-акустичному перетворювачі для контролю феромагнітних металовиробів, що має корпус та закріплені в ньому два джерела постійного магнітного поля, дві окремі плоскі високочастотні котушки індуктивності з робочими і неробочими ділянками, розміщені в неелектропровідних неферомагнітних основах. Одна, високочастотна котушка індуктивності, є збуджуючою, а друга – приймаючою. Високочастотні котушки захищені протектором. Робоча ділянка збуджуючої високочастотної котушки індуктивності виконана в вигляді рядом розташованих в площині витків провідників і розміщена між полюсом першого джерела поляризованого магнітного поля та металовиробом. Її неробоча ділянка – поза полюсом першого джерела поляризованого магнітного поля. Робоча ділянка приймаючої високочастотної

катушки індуктивності виконана у вигляді щільно упакованих провідників розміром менше довжини півхвилі акустичних коливань, які повинні збуджуватися в металовиробі, і розміщена між полюсом другого джерела поляризованого магнітного поля та металовиробом. Її неробоча ділянка – поза полюсом другого джерела поляризованого магнітного поля. При цьому відстань  $L$  між робочою ділянкою збуджуючої високочастотної катушки індуктивності і робочою ділянкою приймаючої високочастотної катушки індуктивності визначається за виразом

$$L \geq 1,2 \cdot C \cdot (t_3 + t_p),$$

де  $C$  – швидкість розповсюдження ультразвукової зсувної, поздовжньої або поверхневої хвилі Релея;

$t_3$  – тривалість зондуючого ультразвукового імпульсу;

$t_p$  – тривалість перехідних процесів після впливу зондуючого імпульсу на блоки приладу контролю.

На рис. 1 наведена схематичне зображення ультразвукового роздільно поєднаного електромагнітно-акустичного перетворювача нового

типу для контролю феромагнітних металовиробів, його розміщення на ОК та елементи для пояснення його роботи.

На рис. 1 позначені елементи ЕМАП: 1 – корпус; 2 – перше джерело постійного поляризованого магнітного поля; 3 – друге джерело постійного магнітного поля; 4 – приймаюча високочастотна катушка індуктивності з робочою 6 та неробочою 8 ділянками; 5 – збуджуюча високочастотна катушка індуктивності з робочою 7 та неробочою 9 ділянками; приймаюча високочастотна катушка 4 індуктивності розміщена в неелектропровідній неферомагнітній основі 10; збуджуюча високочастотна катушка 5 індуктивності розміщена в неелектропровідній неферомагнітній основі 11; 12 – протектор; 13 і 14 – з'єднувачі, які можуть бути виконані в одному елементі; 15 і 16 – з'єднувальні провідники; 17 – вісь, яка зв'язує корпуси збуджуючої та приймаючої частини ЕМАП; ОК – об'єкт контролю.

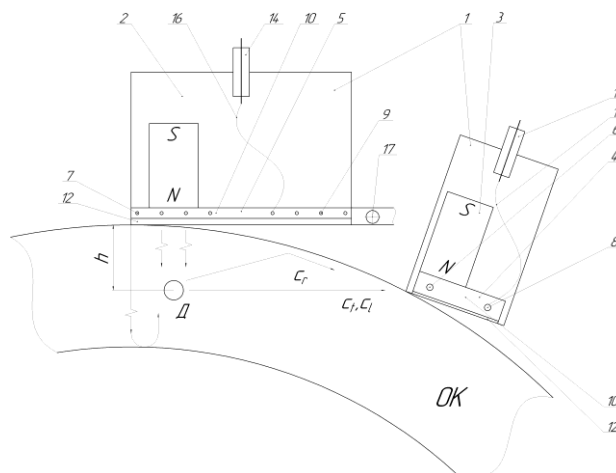


Рис. 1 – Ескізне зображення ЕМАП нового типу на поверхні ОК

ЕМАП функціонує наступним чином. ЕМАП, який має корпуси 1, розташовують на поверхні ОК, як це зображено на фіг.1 так, щоб протектори 12 прилягали до поверхні ОК, захищаючи елементи ЕМАП від пошкоджень. Джерело 2 постійного поляризованого магнітного поля створює в поверхневому шарі феромагнітного ОК поляризоване магнітне поле, силові лінії якого нормальні його поверхні. Імпульси високочастотного струму живлять високочастотну катушку 5 через роз'єм 14 і провідник 16, яка відповідно генерує електромагнітне поле. Взаємодія електромагнітного поля і магнітного поля в поверхневому шарі ОК проходить тільки під полюсом джерела 2 постійного поляризованого магнітного поля, під яким розташована робоча ділянка 7 високочастотної катушки 5 і не проходить під неробочою ділянкою 9 високочастотної катушки 5. В результаті, в ОК збуджуються акустичне поле

імпульсів поперечних хвиль, які розповсюджуються нормально поверхні вглиб виробу зі швидкістю  $C_t$ . Основи 10 виготовлені з неелектропровідного і неферомагнітного матеріалу і необхідні для фіксації високочастотних катушок 4 і 5.

Якщо в зоні збудженого акустичного поля на глибині  $h$  буде знаходитися дефект  $D$ , то за рахунок дифракції та трансформації на його поверхні будуть збуджені хвилі різних типів. В результаті в поверхневому шарі металу ОК під полюсом другого джерела 3 поляризованого постійного магнітного поля можуть з'явитися три типи хвиль: поверхнева (Релея) зі швидкістю розповсюдження  $C_r$ , поперечна зі швидкістю розповсюдження  $C_t$  та поздовжня, зі швидкістю розповсюдження  $C_l$ . Взаємодія вказаних хвиль з магнітним полем другого джерела 3 збудить над поверхнею металу ОК електромагнітне поле. Це поле наведе ЕРС в робочій ділянці 6 приймаючої високочастотної катушки 4 індуктивності і не наведе

ЕРС в неробочій ділянці 8 приймаючої високочастотної котушки 4 індуктивності. Виготовлення робочої ділянки 6 приймаючої високочастотної котушки 4 індуктивності у вигляді щільно упакованих провідників розміром менше довжини півхвилі акустичних коливань, які повинні збуджуватися в металовиробі, гарантує прийом корисних сигналів усіх типів хвиль з максимальною амплітудою. Прийнятий імпульс, який несе інформацію про наявність дефекту  $D$  і його характеристики, через провідник 15 поступає на з'єднувач 13. Відстань  $L$  між робочою ділянкою 7 збуджуючої високочастотної котушки 5 індуктивності і робочою ділянкою 6 приймаючої високочастотної котушки 4 індуктивності визначається виразом

$$L \geq 1,2 \cdot C \cdot (t_3 + t_p),$$

де  $C$  – швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі з найбільшою величиною її значення;

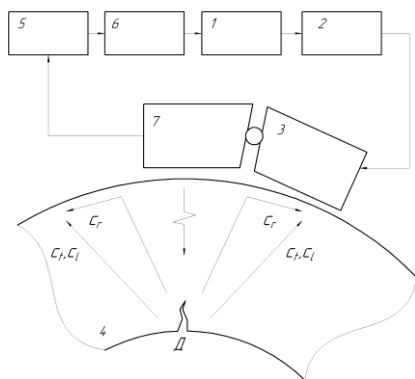
$t_3$  – тривалість зонduючого ультразвукового імпульсу;

$t_p$  – тривалість перехідних процесів після впливу зонduючого імпульсу на блоки приладу ЕМАП контролю.

При такому встановленні величини  $L$  імпульс, який несе інформацію про дефект  $D$ , з'являється в часовій площині після закінчення перехідних процесів в елементах дефектоскопа і буде обов'язково зареєстрований приладом контролю. Експериментально встановлено, що розроблений ЕМАП нового покоління гарантує виявлення дефектів, які знаходяться на глибинах 0...30 мм від

поверхні ОК. Для дослідження можливостей ЕМАП перетворювача нового типу виготовлено стенд, рис. 2. Він складається з формувача 1, який збуджує пакетний імпульс з заданою частотою заповнення, заданою тривалістю імпульсу та заданою частотою зондування. Вихідний імпульс блоку 1 посилюється широкосмуговим блоком 2, який формує збуджуючий сигнал з піковою потужністю до 90 кВт. Підсилений імпульс подається на збуджуючу частину (котушку індуктивності) роздільно суміщеного ЕМАП перетворювача 3. У об'єкті контролю 4 збуджується зсувна хвиля, яка розповсюджується в поверхневому шарі ОК 4. Оскільки виробом є труба, то, при відсутності дефектів, імпульси зсувних хвиль, які досягли протилежної (внутрішньої) сторони труби відбиваються і приймаються тією ж котушкою ЕМАП. Це дає можливість вимірювати товщину ОК.

При наявності дефекту частина енергії імпульсу відбивається, дифрагує та трансформується і реєструється приймаючою частиною ЕМАП перетворювача 7 після часу завершення дії зонduючого та перехідних імпульсів у блоках приладу. Прийнятий імпульс підсилюється вузькосмуговим малошумовим попереднім підсилювачем 5, оброблюється та візуалізується на блоку 6. Робота блоку 6 синхронізована імпульсом формувача 1. Якщо товщина стінки труби значна, то при діагностиці можливо отримувати сигнал безпосередньо відбитий від дефекту. Тобто одночасно можливо проводити дефектоскопію традиційним луна методом.



а



б

Рис. 2 – Стенд для збудження і прийому ультразвукових імпульсів ЕМАП нового типу:  
 а – спрощена блок-схема стенду; б – зображення стенду

Для дослідження перетворювачів нового типу було використано частоти ультразвукових коливань в діапазоні 0,85... 5 МГц, імпульси часовою тривалістю 2...10 періодів частоти заповнення. Піковий струм в збуджуючих котушках ЕМАП досягав 120 А. Досліджено зразки труб різного діаметру, з різними товщинами стінки, виготовлених з різних матеріалів.

Ефективність роботи перетворювачів нового типу визначалось за максимальним відношенням амплітуд луна сигналу від дефекту до амплітуди завод. В якості дефектів використано моделі у вигляді пазів та свердлінг різного розміру. Умови проведення контролю та отримані результати наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Умови та результати контролю

| Исследуемый объект   | Дефект и его параметры:<br>а – довжина, мм;<br>в – рзкриття, мм;<br>с – глибина, мм  | Отношение амплитуд<br>эхо сигнала и шума,<br>раз | Расстояние от<br>поверхности до<br>дефекта, мм |
|--|--|--|--|
| 1.Обточенная обсадная труба<br>Ø 168 мм, стенка- 10,4 мм<br>(сталь по ГОСТ 632-80) | Продольный прямоугольный паз а=16 мм,<br>в=0,3 мм и с=0,82 мм на наружной<br>поверхности                                       | 42   | 0  |
| " – "  | то же на внутренней поверхности  | 41   | толщина стенки                                 |
| " – "  | отверстие диаметром 1,3 мм в середине<br>стенки глубиной 25 мм, просверлено вдоль<br>образующей трубы                          | 8  | 1/2 толщины стенки                             |
| 2.Обсадная труба Ø 168 мм с<br>муфтой Поверхность<br>черновая. Стенка – 10,6 мм    | продольный паз на наружной поверхности<br>с а=16 мм, в=0,15 мм, с=0,8 мм   | 28   | 0  |
| " – " на муфте   | то же с а=16 мм, в=0,15 мм, с=0,6 мм   | 11,5   | 0  |
| " – " на трубе   | продольный паз на внутренней<br>поверхности трубы с а=22 мм, в=0,15 мм,<br>с=1 мм  | 38,9   | толщина стенки                                 |
| " – " на трубе   | поперечный паз на наружной поверхности с<br>а=12 мм в=0,15 мм, с=0,8 мм  | 32   | 0  |
| 3.Обсадная труба Ø168 мм,<br>разнотолщинность стенки от<br>11,7 до 12,3 мм         | продольный паз на наружной поверхности<br>с а =120 мм; в=0, 15 и глубиной, мм:<br>1,20<br>1,05<br>0,83<br>0,56<br>0,37<br>0,22 | 53<br>48<br>46<br>40<br>33<br>21                 | 0<br>0<br>0<br>0<br>0<br>0                     |
| " – "  | поперечный паз на наружной поверхности с<br>а=12,5 мм, в=0,15 мм, с=0,6 мм   | 28   | 0  |
| " – "  | продольный паз на внутренней<br>поверхности с а=32 мм, в=0,15 мм, с=1,7 мм   | 50   | толщина стенки                                 |
| " – "  | продольное отверстие в стенке диаметром 2<br>мм на<br>глубину 34 мм  | 33   | 1/2 толщины стенки                             |
| 4.Чугунная гильза для<br>двигателей грузовиков Ø 132<br>мм, стенка – 7 мм          | продольный паз на наружной поверхности<br>с а=28 мм в=0,15 мм, с=0,3 мм  | 9,4  | 0  |
| 5.Труба сварная (по<br>образующей)<br>Ø 32 мм, стенка –<br>2 мм (сталь 3)          | бездефектный сварной шов   | 5,7  | 0  |
| " – "  | непровар в сварном шве длиной около 6 мм   | 11,8   | 0  |
| 6.Труба сварная (по<br>образующей) Ø 28 мм,<br>стенка –<br>1 мм (сталь 3)          | продольный паз на наружной поверхности<br>с а=21,5, в=0,2 мм, с=0,2 мм   | 7,7  | 0  |
| 7.Труба Ø 51,3 мм, стенка –<br>3,5 мм (сталь 45)                                   | продольный паз на наружной поверхности<br>с а=31 мм, в=0,15 мм,<br>с=0,2 мм  | 54   | 0  |
| " – "  | то же на внутренней поверхности с а=40<br>мм, в=0,15 мм, с=0,2 мм  | 43   | 0  |
| 8.Труба Ø 32 мм, толщина<br>стенки -6,3 мм (легированная<br>сталь)                 | естественная трещина на наружной<br>поверхности с<br>а ≈ 34 мм, в < 0,1 мм,<br>с ≈ 0,2 мм                                      | 8,6  | 0  |
| " – "  | то же на внутренней поверхности с а ≈ 18<br>мм,<br>в < 0,1 мм, с ≈ 0,4 мм  | 28   | 0  |
| 9.Труба Ø 17 мм, стенка-3,5<br>мм (легированная сталь)                             | естественная трещина на наружной<br>поверхности по всей длине, в< 0,1 мм,<br>с ≈ 0,2 мм  | 6  | 0  |
| 10.Труба Ø 24 мм, стенка –<br>2,5 мм (легированная сталь)                          | естественная трещина на наружной<br>поверхности по всей длине с в < 0,1 мм,<br>с ≈ 0,2 мм                                      | 8  | 0  |

**Висновки.** Аналіз наведених результатів виконаних розробок і досліджень дає можливість зробити висновок про те, що при контролі труб ЕМАП нового типу забезпечується виявлення дефектів, які

розташовуються на внутрішній і зовнішній поверхнях стінок труби, а також розташованих в тілі ОК. На поверхні труб без зварних ділянок з допомогою ЕМАП без спеціальної підготовки поверхні впевнено виявляються дефекти в вигляді моделей тріщини глибиною 0,2 мм і більше, а також внутрішні дефекти в стінці труби, еквівалентні отвору діаметром більше 1,3 мм.

ЕМАП нового типу дозволяє одночасно з новим методом контролю виявляти дефекти традиційним методом та вимірювати товщину стінки труби.

#### Список літератури

1. Ермолов И.Н. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.- ISBN 5-217-03224-3 (Т3).
2. Судакова К.В. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции. / К.В. Судакова, И.Л. Казюкевич. – В мире неразрушающего контроля. – 2004. – №3. – С. 8–10.
3. Мигущенко Р.П. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 5. Особенности конструирования и практического применения ЭМА устройств

ультразвукового контроля металлоизделий. / Р.П. Мигущенко, Г.М. Сучков, О.Н. Петрищев, А.В. Десятниченко Монография. Харьков: ТОВ «Планета-принт», 2016 – 230 с.

#### References (transliterated)

1. Ermolov I.N. *Nerazrushayushchiy kontrol: Spravochnik: V 7 t. Pod obshch. red. V.V. Klyuyeva. T.3: Ultrazvukovoy kontrol* [Nondestructive testing: Handbook: In 7 tons. Under general. Ed. V.V. Klyuev. V3: Ultrasonic testing] / I.N. Ermolov. Yu.V. Lange. – Moscow: Mashinostroyeniye. 2004. – 864 p.- ISBN 5-217-03224-3 (T3).
2. Sudakova K.V. *O povyshenii effektivnosti kontrolya kachestva metallurgicheskoy produktsii* [On quality testing efficiency increase for metallurgic product] / K.V. Sudakova. I.L. Kazyukevich. – V mire nerazrushayushchego kontrolya. – 2004. – No3. – P. 8–10.
3. Migushchenko R.P. *Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 5. Osobennosti konstruirovaniya i prakticheskogo primeneniya EMA ustroystv ultrazvukovogo kontrolya metalloizdeliy* [Theory and practice of electromagnetic-acoustic control. Part 5. Features of designing and practical application of EMA devices for ultrasonic inspection of metal products] / R.P. Migushchenko. G.M. Suchkov. O.N. Petrishchev. A.V. Desyatnichenko Monografiya. Kharkov: TOV "Planeta-print". 2016 – 230 p.

Поступила (received) 11.10.2017

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Високоєфективний контроль труб електромагнітно-акустичними перетворювачами / Плєснецов С.Ю.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 44–48 – Библиогр.: 3 назви.– ISSN 2519-2671

**Высокоэффективный контроль труб электромагнитно-акустическими преобразователями / Плєснецов С.Ю.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 44–48 – Библиогр.: 3 назви.– ISSN 2519-2671

**Highly effective electromagnetic-acoustic transducer pipe testing // S.Yu. Plesnetsov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 35(1257). – P. 44–48. – Bibl.:6. – ISSN 2519-2671

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Плєснецов Сергій Юрійович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: (050) 841-30-09; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com.

**Плєснецов Сергей Юрьевич** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Компьютерные и радиоэлектронные системы контроля и диагностики», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: (050) 841-30-09; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com.

**Plesnetsov Sergey Yuriyovich** – PhD, Senior Lecturer of the Department "Computer and Radioelectronic Systems for Testing and Diagnostics", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: (050) 841-30-09; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com.