

## МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 620.179.16: 620.179.17

### КОНТРОЛЬ ВИРОБІВ З РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ ЗБУДЖЕНИМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО–АКУСТИЧНИМ СПОСОБОМ ХВИЛЯМИ РЕЛЕЯ

Г. М. Сучков, О. М. Петрищев, С. В. Хащіна

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, тел. (057) 707–63–80, (098)–595–00–58,  
e-mail: suchkov@kpi.kharkov.ua

Наведені результати експериментальних досліджень та розробок, спрямованих на підвищення можливостей ультразвукового контролю виробів із значною площею поверхні імпульсами хвиль Релея, які збуджуються і приймаються електромагнітно–акустичними (ЕМА) перетворювачами. Доведена висока ефективність розробок щодо виявлення дефектів поверхні труб, листів та аналогічних виробів. Експериментально досліджено можливість випромінювання хвиль Релея в одному напрямку, що дозволяє зменшити завади для корисного інформативного сигналу. Описаний стенд для генерування хвиль Релея ЕМА перетворювачами. Приведені графічні залежності відношення амплітуд луно–сигналів від дефектів до амплітуди завад, а також форми сигналів хвиль Релея.

Ключові слова: хвиля Релея, дефект, металевий виріб, контроль, електромагнітно–акустичний перетворювач.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований и разработок, направленных на повышение возможностей ультразвукового контроля изделий с большой площадью поверхности импульсами волн Рэлея, которые возбуждаются и принимаются электромагнитно–акустическими (ЭМА) преобразователями. Доказана высокая эффективность разработок по обнаружению дефектов поверхности труб, листов и аналогичных изделий. Экспериментально исследована возможность излучения волн Рэлея в одном направлении, что позволяет уменьшить помехи для полезного информативного сигнала. Описанный стенд для генерирования волн Рэлея ЭМА преобразователями. Приведенные графические зависимости отношения амплитуд эхо–сигналов от дефектов в амплитуды помех, а также формы сигналов волн Рэлея.

Ключевые слова: волна Релея, дефект, металлическое изделие, контроль, электромагнитно–акустический преобразователь.

The results of experimental research and development aimed at improving the capabilities of ultrasonic testing of products with a large surface area of the pulses of Rayleigh waves, which excited and accepted the electromagnetic acoustic transducers (EAT). Developments proved highly effective in identifying defects in the surface of the tube sheets and the like. Experimentally investigated the possibility of radiation Rayleigh waves in one direction, which reduces interference for useful informative signal. Booth described to generate Rayleigh waves EAT transducers. Resulted image depending on the ratio of amplitudes of echo signals from defects to the noise amplitude and shape of the Rayleigh signal.

Keywords: Rayleigh wave, defect, metal product, control, electromagneto–acoustic transducer.

Промисловість України випускає велику кількість виробів, які мають розвинену поверхню: листи, труби великого діаметру, сляби та інші. Такі ж вироби, або виготовлені з них об'єкти, конструкції, обладнання часто експлуатуються в досить складних умовах. Тому на поверхні виробів можуть бути або виникати в процесі експлуатації поверхневі дефекти, що

іноді приводить до аварій із значними економічними втратами.

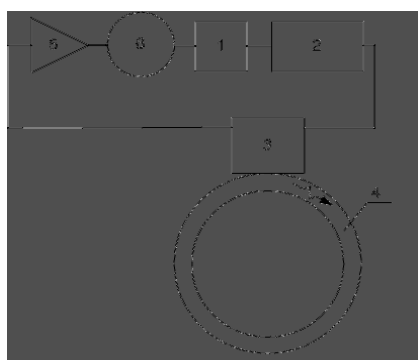
Значно зменшити втрати, що пов'язані з такими дефектами, можна за рахунок використання неруйнівних методів контролю. Серед них найчастіше використовують візуально–оптичний, капілярний, магнітний, вихрострумний, ультразвуковий методи

контролю. Проте, традиційні методи виявлення поверхневих дефектів потребують спеціальної підготовки поверхні виробів та мають низьку продуктивність контролю. В результаті погіршується екологічний стан довкілля, зношується інструмент, мають місце значні сумарні втрати часу на проведення контролю. Покращити ситуацію можливо за рахунок використання нових засобів безконтактного ультразвукового контролю, найбільш розвиненим з яких є електромагнітно-акустичний (ЕМА) [1]. 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 [2], багаторічний об'єм його ефективного використання в промисловості (товщинометрія [3], дефектоскопія рейок [3–4]) незначний. На сьогодні існує упереджене ставлення, що причинами обмеженого використання ЕМА способу є недостатня чутливість до дефектів, значні розміри, несучасні енергетичні показники [5]. Тому дослідження і розробки, направлені на підвищення можливостей ЕМА способу, в тому числі для виявлення дефектів поверхні, є актуальними.

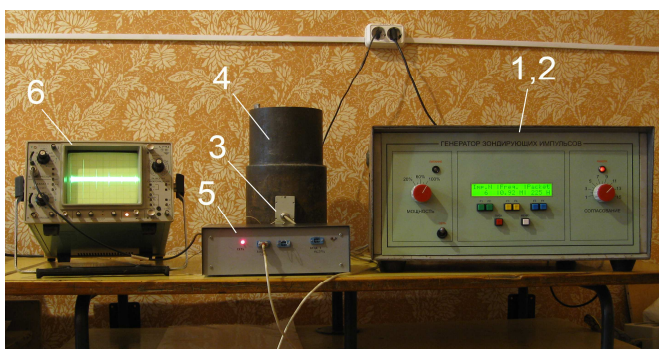
Для виконання досліджень було розроблено стенд для збудження і прийому поверхневих ультразвукових імпульсів ЕМА способом. Стенд (рис. 1) складається з формувача 1, який збуджує пакетний імпульс з заданими частотою заповнення, тривалістю імпульсу та частотою зондування. Вихідний імпульс блоку 1 посилюється ширококутовим блоком 2, який формує вихідний сигнал з піковою потужністю більше 60 кВт. Підсилений імпульс подається на збуджуючу частину (котушку індуктивності) роздільно суміщеного ЕМА перетворювача

(ЕМАП) 3. У об'єкті контролю (ОК) 4 збуджується поверхнева хвиля, яка розповсюджується в поверхневому шарі виробу 4. Якщо виробом є труба (в даному випадку кінцева частина обсадної труби з муфтою), то при відсутності дефектів імпульс поверхневих хвиль, які оббігають всю поверхню, приймається другою (приймальною) котушкою роздільно сполученого ЕМАП 4. При наявності дефекту частина енергії імпульсу відбивається і приймається ЕМА перетворювачем 4 в проміжок часу між імпульсом, який зондує, і імпульсом, який оббіг поверхню труби. Прийнятий імпульс підсилюється вузькосмуговим малошумним попереднім підсилювачем 5 ( $\kappa = 60$  дБ) і візуалізується на екрані осцилографа 6. Робота осцилографа 6 синхронізується імпульсом формувача 1.

Котушки ЕМАП виконані у вигляді зигзагоподібної структури із заданим кроком [6]. Для досліджень були виготовлені ЕМАП, що дозволяють збуджувати і приймати поверхневі хвилі тільки в одному напрямі, або в двох напрямках. Дослідження перетворювачів показало, що використання більш високої частоти ультразвукових коливань прийнятніше для виявлення дефектів з меншою глибиною. Проте реально виготовити ефективні ЕМАП на частоту більше 1 МГц важко. Вже для частоти 1 МГц крок рамки індуктора складає близько 1,6 мм, а ширина намотування провідників – близько 0,2 мм. При цьому діаметр дроту для намотування необхідно зменшити до 0,04 мм, що ускладнює технологічність виготовлення перетворювачів. Загальне число витків в збуджуючих секціях 10, а в прийомних – 20 для робочої частоти ультразвукових коливань 0,92 МГц.



а)



б)

а – блок-схема стенду; б – зображення стенду

**Рисунок 1 – Стенд для збудження і прийому поверхневих ультразвукових імпульсів ЕМА способом**

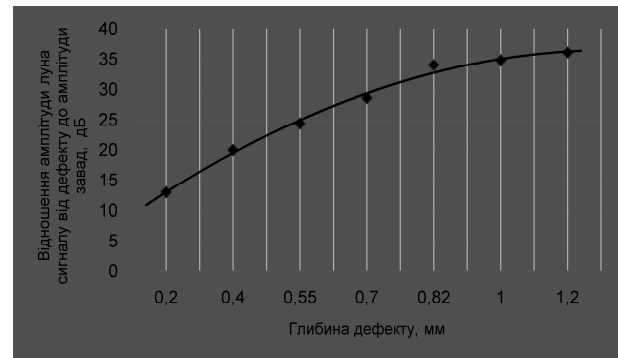
Визначено, що число робочих секцій в ЕМАП недоцільно підвищувати більше 6, оскільки амплітуда відлуння сигналу практично не росте, а "мертва" зона збільшується. Окрім того, збільшення частоти ультразвукових коливань вимагає зменшення повітряного прошарку (прорізу) між ЕМАП і контрольованим виробом. У таких умовах проводити контроль на реальних об'єктах неможливо, бо можуть бути механічні пошкодження перетворювача. Часову тривалість зондуючих імпульсів встановлюють за кількістю періодів частоти заповнення. Вона змінювалась в інтервалі 1...8. На практиці 4...6 періодів частоти заповнення струму достатні для ефективної роботи перетворювача.

Для перевірки ефективності виготовленого ЕМАП були виконані дослідження з оцінки дальності поширення поверхневої хвилі на зразках обточених труб діаметром 114 мм. При частоті 0,92 МГц поверхневі хвилі з амплітудою 6 дБ фіксуються на відстані до 8 м. Для зразків обсадної труби із поверхнею, типовою для експлуатації, відстань поширення поверхневої хвилі досягала 2 м (рис. 2). Цього достатньо для проведення дефектоскопії луно-методом. За вказаних умов "мертва" зона контролю суміщеним ЕМАП не перевищує 25–30 мм.

Для подальших досліджень на зразках обсадних труб були виготовлені моделі поверхневих дефектів, глибинами від 0,2 до 1,2 мм (10% від товщини стінки), розкриттям 0,2 мм, довжинами 12, 16, 22 і 120 мм, виготовлених вздовж твірної. Для прикладу, результати виявлення поздовжніх дефектів довжиною 22 мм, розкриттям 0,2 мм і різної глибини наведено на рис. 3. Типовий вид форми сигналів на екрані осцилографа з сигналом від дефекту наведено на рис. 4.



**Рисунок 2 – Типова форма для імпульсів хвиль Релея при багатократному оббіганні поверхні муфти обсадної труби, яка була в експлуатації**



**Рисунок 3 – Залежність відношення амплітуд луна сигналів від дефектів різної глибини до амплітуди завад**



**Рисунок 4 – Реалізація з сигналом від дефекту в вигляді пазу глибиною 0,2 мм, розкриттям 0,2 мм і довжиною 16 мм**

Аналіз наведених даних дає можливість зробити висновок про те, що на поверхні труб без зварних ділянок з допомогою ЕМАП без спеціальної підготовки поверхні впевнено виявляються дефекти в вигляді моделей тріщин глибиною 0,2 мм і більше. При цьому можливо визначати глибину виявлених дефектів за величиною амплітуди відбитих імпульсів.

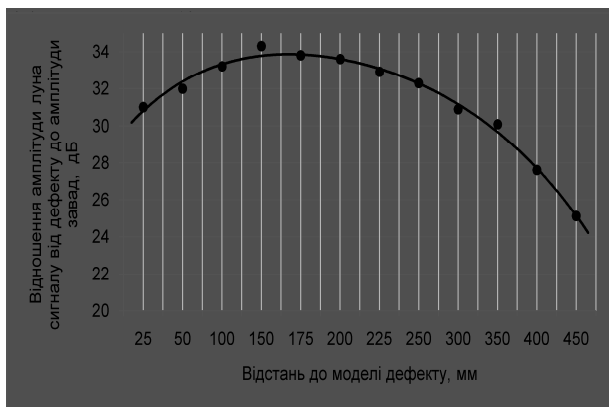
Для перевірки можливості виявлення дефектів під поверхнею в тілі труби товщиною 12,3 мм вздовж твірної виготовили свердління діаметром 2 мм на глибину 35 мм. Дефекти були розташовані на відстані 3, 4, 5 і 6 мм від поверхні труби. При контролі встановлено, що відбитий від дефекту сигнал на глибині 4 мм має амплітуду, яка перевищує амплітуду завад в 5 разів. При збільшенні глибини розташування дефектів амплітуда відбитих імпульсів поступово зменшується. Така ситуація не в повній мірі відповідає традиційним представленням про те, що поверхневими

хвилями можливо виявляти дефекти на глибині, меншій довжини ультразвукової хвилі [7]. З виконаних досліджень випливає висновок про можливість виявлення підповерхневих дефектів на глибинах, більших довжини ультразвукової хвилі. Тому необхідно в подальшому продовжити дослідження у вказаному напрямку.

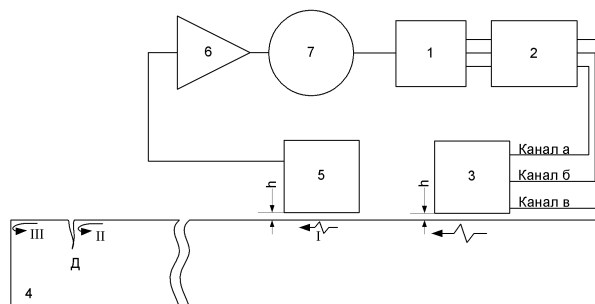
В вищенаведених дослідженнях відстань між ЕМАП і дефектом встановлювалась фіксованою. Результати досліджень впливу відстані до моделей дефектів на амплітуду відбитих від них імпульсів наведено на рис. 5. Дефект мав такі характеристики: довжина 12 мм, розкриття 0,15 мм і глибина 0,6 мм. Характер залежності відповідає аналогічним, характерним для об'ємних поперечних і поздовжніх хвиль. Для компенсації впливу відстані до виявленого дефекту доцільно використовувати АВД діаграми або аналогічні їм.

Вищевикладені результати показують високу ефективність використання ЕМА способу для ультразвукового контролю поверхні виробів. Цей спосіб особливо доцільний для використання при продуктивній дефектоскопії виробів з розвиненою поверхнею.

Проте розроблені ЕМА перетворювачі мають недолік, який полягає в одночасному формуванні двох діаграм направленості акустичного поля. Це приводить до неоднозначного визначення місцеположення дефекту на поверхні виробу та можливої появи акустичних завад від розповсюдження неробочої частини акустичного поля. Для вирішення вказаної проблеми розроблено новий стенд, (рис. 6), і секційний ЕМА перетворювач (рис. 7, а, б). На рис. 7, в наведено часову діаграму подачі імпульсів високочастотного струму при живленні ЕМАП.



**Рисунок 5 – Експериментальна залежність амплітуди луно сигналу від дефекту відносно амплітуди завад від відстані між ЕМАП і відбивачем**

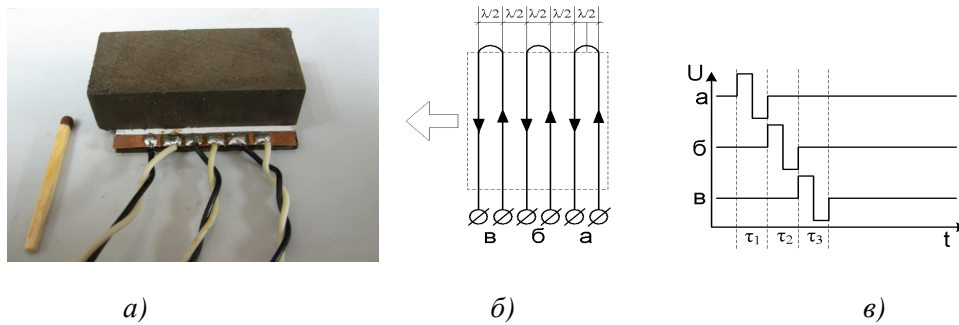


**Рисунок 6 – Схематичне зображення стенду, в якому формується акустичне поле в основному в одному напрямку**

Новий стенд функціонує наступним чином. Формувач 1 збуджує три окремі імпульси, що поступають один за одним через заданий регульований проміжок часу по каналах а, б і в із заданою частотою заповнення та часовою тривалістю. Трьохканальним блоком 2 імпульси кожного каналу підсилюються до заданої потужності. Підсилені імпульси живлять новий ЕМАП, кожну його секцію а, б і в окремо (рис. 7, б). Всі робочі ділянки ЕМАП (рис. 7, б) об'єднані пунктирними лініями) виготовлені паралельними з відстанню між ними рівними половині довжини поверхневої хвилі в металі, що контролюється. Кожна наступна з секцій, починаючи з а, потім б, в живиться через проміжок часу  $\tau_1 = \tau_2 = \lambda / C_R$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі Релея;  $C_R$  – швидкість розповсюдження поверхневої хвилі в металі виробу, що контролюється. При такій роботі під кожною секцією а, б і в амплітуда збуджених імпульсів хвиль Релея складається в напрямку від а до в. Відповідно формується потужне акустичне поле в основному однонаправлене в тому ж напрямку (рис. 8).

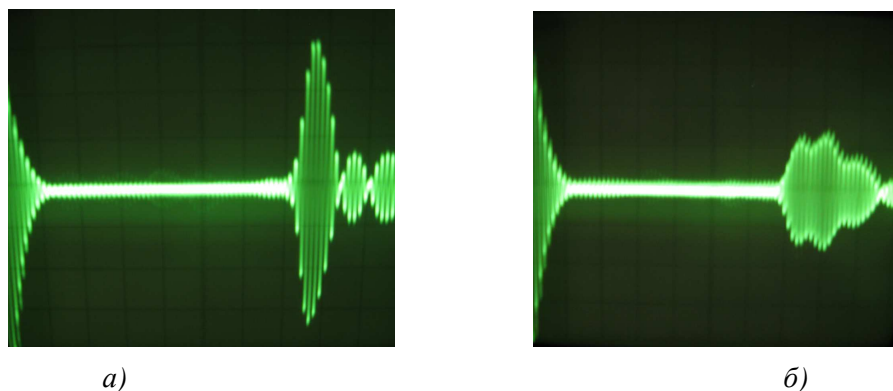
Випробування нової розробки виконано на зразку з листа сталі Ст.3 розмірами 1000x200x30 мм. Поверхня зразка уражена короїзєю і не була зачищеною перед контролем. Секційний ЕМАП був виготовлений на частоту 0,3 МГц. Форми сигналів поширення хвилі в одному робочому і в протилежному не робочому напрямках наведені на рис. 8. З наведених даних можна зробити висновок, що повністю компенсувати некорисний імпульс не вдалося. Проте амплітуда робочої частини акустичного поля майже в три рази більша, ніж амплітуда неробочої (зворотної) частини цього поля. Це суттєво зменшує можливість появи когерентних акустичних завад.

Застосування однонаправленого ЕМАП для виявлення моделі дефекту глибиною 2,2 мм,



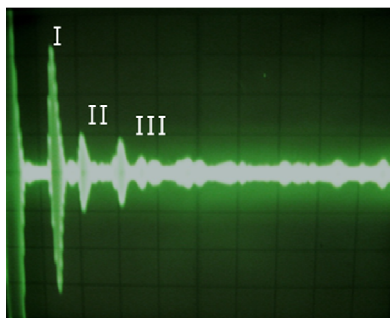
а) – фото; б) – схематичне зображення; в) – часова діаграма

**Рисунок 7 – Секційний ЕМА перетворювач**



**Рисунок 8 – Реалізації з сигналами в одному робочому (а) і в протилежному не робочому (б) напрямках**

довжиною 35 мм і розкриттям 1 мм досліджено на тому ж зразку на відстані 350 мм. Форма сигналу відбитого від дефекту наведена на рис. 9. Очевидно, що використання однонаправленого ЕМАП для контролю луно-методом є ефективним і може використовуватися для дефектоскопії виробів з розвиненою не зачищеною від корозії поверхнею.



I – прями́й сигнал; II – сигнал від дефекту;  
III – сигнал від краю ОК

**Рисунок 9 – Реалізація з сигналом відбитим дефектом**

### ВИСНОВКИ

Експериментальними дослідженнями встановлена можливість, залежно від стану поверхні, проводити дефектоскопію хвилями Релея на відстанях до 8 м від електромагнітно-акустичного перетворювача. Показано, що дефекти під поверхнею металовиробів виявляються на глибинах залягання більших, ніж величина довжини хвилі Релея. Дослідження виявленої особливості доцільно продовжити, оскільки це може розширити можливості дефектоскопів, які використовують поверхневі хвилі. Розроблено апаратуру та однонаправлені по акустичному полю електромагнітно-акустичні перетворювачі для збудження і прийому імпульсів хвиль Релея. Доказана можливість економії енергії, матеріалів, інструменту, а також покращення екологічного стану доквілля за рахунок виключення операції спеціальної підготовки поверхні виробів до проведення контролю.

1. *Незрушаючий 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.–
2. Судакова К.В., Казюкевич И.Л. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции. // В мире неразрушающего контроля., 2004. – №3. – С. 8–10. 3. Сучков Г.М., Алексеев Е.А., Захаренко В.В. Энерго – и ресурсосберегающие приборы и технологии неразрушающего контроля. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2006. – №4. – С. 29–34. 4. ТУ 14–2–542–83. Рельсы объемно–закаленные Р65, проконтролированные ультразвуковым электромагнитно– акустическим методом в зоне, ограниченной толщиной шейки. Технические условия. – Харьков: УкрНИИМет, 1983. – 9 с. 5. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М: Машиностроение, 1981. – 240 с. 6. Сучков Г.М. Исследование особенностей распространения поверхностных волн при контроле ЭМА способом // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2000. – №3. – С. 33–35. 7. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981.– 287 с.

**Поступила в редакцію 26.03.2012 р.**

**Рекомендував до друку докт. техн. наук., проф. Лютак І. З.**