

УДК 621.43.056:632.151

## КОНТРОЛЬ ЕЛЕМЕНТІВ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН ТА МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ МАЛОАПЕРТУРНИХ МАГНІТОСТРИКЦІЙНИХ СЕНСОРІВ

Богачев І.В., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2019.11>

Представлені результати експериментального дослідження можливості використання малоапертурних магнітострикційних перетворювачів для виявлення поверхневих тріщин. Метою даної роботи є розроблення методу та методики ультразвукового контролю елементів будівельних машин та металевих конструкцій з використанням малоапертурних магнітострикційних перетворювачів.

Представлены результаты экспериментального исследования возможности использования малоапертурных магнитострикционных преобразователей для обнаружения поверхностных трещин. Целью работы является разработка метода и методики ультразвукового контроля элементов строительных машин и металлических конструкций с использованием малоапертурных магнитострикционных преобразователей.

The results of an experimental study of the possibility of using low-aperture magnetostrictive transducers to detect surface cracks are presented. The aim of the work is to develop a method and technique for ultrasonic testing of elements of building machines and metal structures using low-aperture magnetostrictive transducers.

Бібл. 6, табл. 2, рис. 4.

**Ключові слова:** поверхнева ультразвукова хвиля, акустичний контакт, магнітострикційний перетворювач, діаграма напрямленості.

$f_3$  – частота заповнення радіоімпульсного сигналу;  
 $K$  – коефіцієнт підсилення вхідного підсилювача;  
 $U_b$  – вихідна напруга формувача радіоімпульсів;  
 $L$  – відстань між випромінюючим та приймаючим перетворювачами;

МСП – магнітострикційний перетворювач;  
 УЗК – ультразвуковий контроль.

**Актуальність роботи.** Більшість виробничих процесів виконується групою (комплексом) машин, пов'язаних між собою послідовністю технологічних операцій. Порушення працездатності хоча б однієї з них може призвести до зупинки всього комплексу машин, що пов'язано з певними економічними втратами.

При добре поставленому технічному обслуговуванні з використанням засобів неруйнівного контролю можна домогтися різкого збільшення міжремонтних інтервалів роботи машин, зниження експлуатаційних витрат і витрат на ремонт.

При змінному механічному навантаженні зазвичай у елементах конструкцій і механізмів з'являються поверхневі тріщини, що збільшуються з часом.

Робота присвячена вивченню і застосуванню малоапертурних магнітострикційних перетворювачів в якості сенсорів і випромінювачів в системах ультразвукового контролю для виявлення поверхневих тріщин.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Відомо, що вибір того чи іншого методу виявлення по-

верхневих тріщин залежить від форми об'єкта контролю, матеріалу, з якого він виготовлений, і можливого розміру тріщини. На практиці використовуються наступні методи: магнітний, флуоресцентний, гідравлічний, пневматичний, нагрівання деталі, ультразвуковий і т.д. Сьогодні найпоширенішим є ультразвуковий метод контролю з використанням п'єзоелектричних перетворювачів, але він не завжди зручний. Щоб провести контроль об'єкта, потрібно дослідити кожен ділянку його поверхні. Для цього на різних ділянках застосовують перетворювачі з різною формою контактної поверхні. Для проведення контролю необхідно використовувати контактну рідину для забезпечення акустичного контакту. Поверхневі тріщини виявляються системами, що використовують поверхневі ультразвукові хвилі (хвилі Релея). Зі збільшенням глибини проникнення інтенсивність хвилі Релея різко зменшується [1]. Ця обставина дозволяє використовувати хвилі Релея для пошуку поверхневих дефектів. Загасання хвилі Релея уздовж вільної поверхні визначається загасанням об'ємних хвиль, тому хвилі

Релея можуть поширюватися на великі відстані, зокрема, і вздовж кривих поверхонь, якщо радіус кривизни значно перевищує довжину хвилі, інакше відбувається її відбиття.

Для збудження поверхневої хвилі направлені перетворювачі повинні мати різний кут введення ультразвукової хвилі. Для цього перетворювачі розміщують на ультразвуковій призмі з кутом, що дорівнює або більше від другого критичного кута [1].

Генерацію і прийом ультразвукових хвиль можна проводити за допомогою магніострикційних перетворювачів, що ефективно збуджують поверхневі хвилі (хвилі Релея) та поздовжні хвилі в контрольованому зразку [2,3].

**Метою даної роботи** є розроблення методу та методики ультразвукового контролю елементів будівельних машин та металевих конструкцій з використанням малоапертурних магніострикційних перетворювачів.

Можна виділити наступні переваги малоапертурних магніострикційних перетворювачів [4,5]. У таких сенсорів площа випромінюючої поверхні (0,07...0,8 мм<sup>2</sup>), що в десятки разів менше, ніж у п'єзоелектричних, це дозволяє збільшити розрізняльну здатність сенсорів і систем УЗК в цілому. Акустичний контакт магніострикційних перетворювачів з об'єктом контролю може забезпечуватися як із застосуванням контактної рідини, так і без неї (так званій «сухий» контакт). Кращі параметри і характеристики магніострикційних перетворювачів досягаються при використанні одношарових котушок збудження з малою кількістю витків. Для підвищення ефективності сенсорів доцільно використовувати багатосекційні котушки збуджен-

ня. Точка Кюрі для більшості магніострикційних матеріалів знаходиться в межах 600...1200 °С, що значно перевищує температуру Кюрі для п'єзоелектричних перетворювачів. Ця особливість дозволяє використовувати магніострикційні перетворювачі для контролю теплоенергетичного обладнання та об'єктів, що працюють при підвищених температурах.

Ґрунтуючись на перевагах магніострикційних перетворювачів можна виділити важливі об'єкти, для контролю яких доцільно використовувати малоапертурні sensori: робочі лопатки газотурбінних двигунів; лонжерони лопатей літальних апаратів; тонкостінні елементи несучих конструкцій; нагріті об'єкти складної форми; клепані з'єднання несучих конструкцій та інші. При відомій відстані між випромінювачем і приймачем ультразвукових коливань (при розташуванні двох перетворювачів в одному корпусі) можна визначити швидкість поширення ультразвукової хвилі в контрольованому зразку, що в подальшому можна використовувати для обчислення розмірів тріщини і її розташування.

Якщо при контролі використовується один малоапертурний сенсор, можливо визначити лише факт наявності або відсутності дефекту, відстань до нього, але не можна визначити його розміри і положення в просторі. Якщо використовувати декілька приймаючих сенсорів одночасно, можна вирахувати місцезнаходження дефекту і його розміри [6].

**Опис експериментальної установки**

Структурна схема системи ультразвукового контролю з малоапертурними сенсорами зображена на рис. 1.

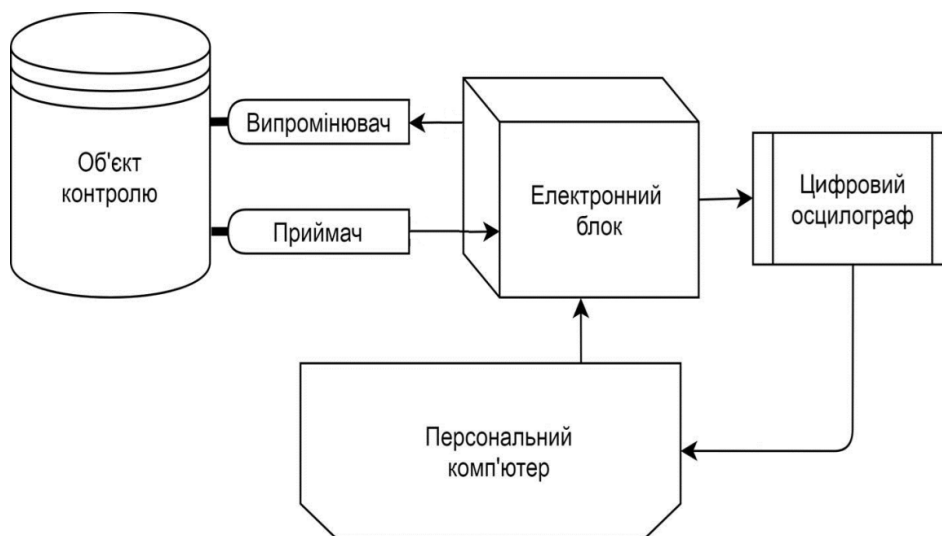


Рис. 1. Структурна схема системи ультразвукового контролю з малоапертурними сенсорами.

При аналізі акустичного тракту були визначені вимоги до електронного блоку для генерації електричного радіоімпульсного сигналу збудження і прийому ультразвукового сигналу з малоапертурного магнітострикційного сенсора. На підставі вимог були розроблені електричні схеми і виготовлений електронний блок. Зовнішній вигляд електронного блоку наведений на рис. 2.

Технічні характеристики електронного блоку формування та прийому радіоімпульсних сигналів наведені в таблиці 1.

На рисунку 3 наведено фото зразка клепаного з'єднання деталей з поверхневою тріщиною.

Тріщина була вирощена штучно шляхом багаторазових змінних згинальних навантажень на деталі. Тріщина виникає в районі заклепок, так як тут механічне напруження в 3-4 рази перевищує напруження на інших ділянках зразка.

За допомогою описаного вище обладнання був проведений ультразвуковий контроль цієї деталі на різних ділянках в районі заклепок. Розташування перетворювачів на зразку і осцилограми прийнятих сигналів зображені на рис. 4.

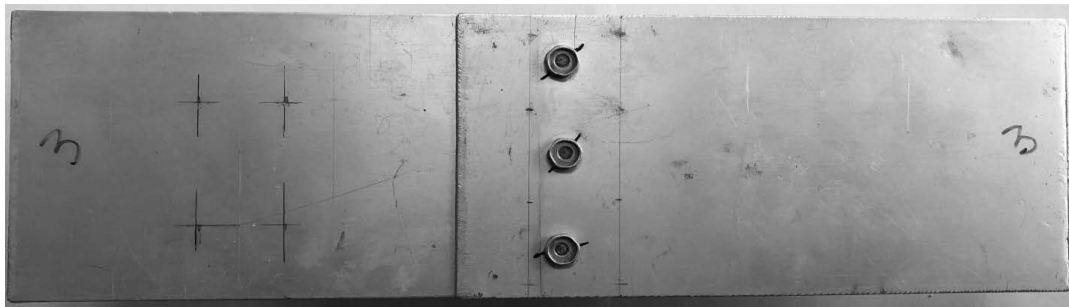
Як видно з осцилограм прийнятих сигналів сенсорів при проходженні ультразвукової хвилі через тріщину сигнал зменшується більш ніж в 10 разів (рис. 4.а). Отже, велика частина енергії хвилі відбивається від тріщини.



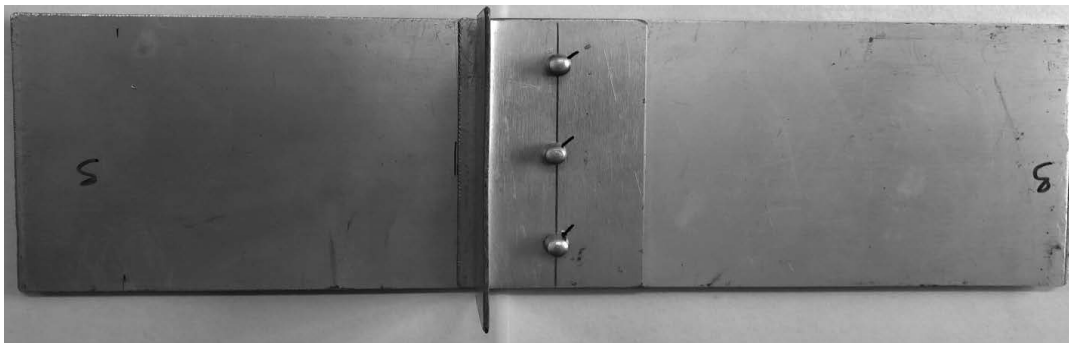
Рис. 2. Електронний блок з підключеними малоапертурними магнітострикційними перетворювачами.

Таблиця 1. Технічні характеристики електронного блоку

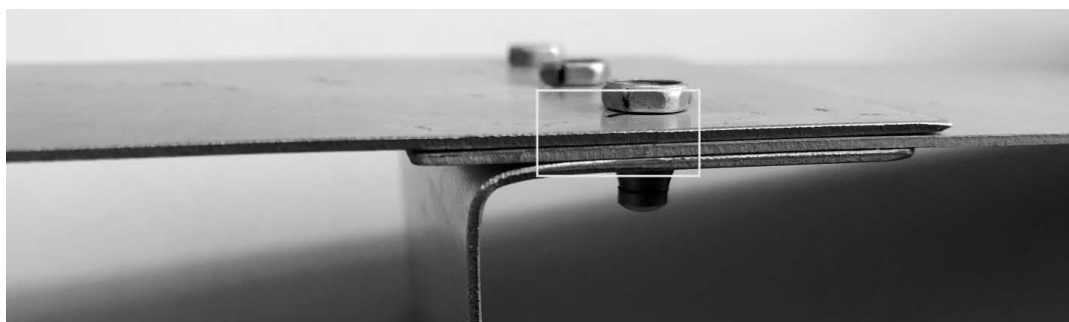
Частота заповнення радіоімпульсного сигналу $f_3$ , МГц	0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 2,5; 5,0; 10,0
Тривалість радіоімпульсу, кількість періодів заповнюючого коливання	1...8
Амплітудне значення напруги на випромінювачі при навантаженні 0,5 Ом, В	0...10
Вхідний опір підсилювача, кОм	більше 3,0
Вихідна напруга $U_v$ , В	0...10
Коефіцієнт підсилення К	5000



а)

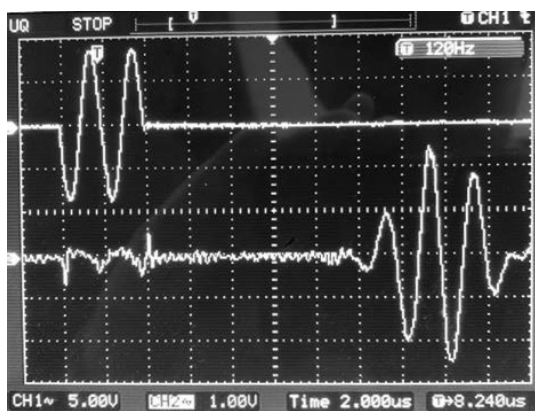


б)

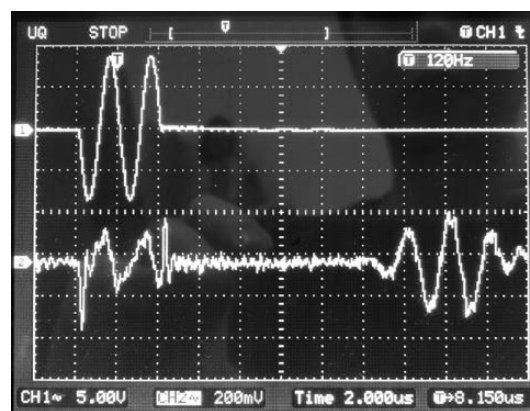


в)

Рис. 3. Фото досліджуваного зразка: а) зверху; б) знизу; в) збоку; (рамкою виділена ділянка, де знаходиться тріщина).



а)



б)

Рис. 4. Осцилограми сигналів при проходженні: а) бездефектної ділянки ( $L=20$  мм); б) ділянки зразка з тріщиною ( $L=20$  мм).

Таблиця 2. Параметри прийнятих сигналів

	Без тріщини [L=20 мм]	З тріщиною [L=20 мм]	З тріщиною [L=30 мм]	Похибка вимірювання
t, мкс	13,8	14,3	16,8	$\Delta_t=0,1$ мкс
2Um, В	5	0,5	0,45	$\Delta_U=0,02$ В

Результати експериментальних досліджень при різних відстанях між перетворювачами наведено в таблиці 2.

Час затримки проходження сигналом ділянки зразка з тріщиною збільшився на  $0,5 \cdot 10^{-6}$  с при відстані між перетворювачами  $L=20$  мм та  $3 \cdot 10^{-6}$  с при  $L=30$  мм у порівнянні із часом затримки при проходженні сигналом бездефектної ділянки зразка. Зміна часу затримки і амплітуди сигналу обумовлена зміною шляху проходження сигналу між перетворювачами.

#### Висновки

Малоапертурні магнітострикційні перетворювачі мають малу площу випромінюючої поверхні, що дозволяє отримати діаграму напрямленості практично кругової форми для поверхневих ультразвукових хвиль.

Поверхневі хвилі мають малу глибину проникнення, що зручно для виявлення поверхневих тріщин.

Акустичний контакт магнітострикційних перетворювачів з об'єктом контролю може забезпечуватися без застосування спеціальних контактних рідин. При використанні контактної рідини амплітуда прийнятого сигналу збільшується в 2 ... 3 рази, що корисно при контролі великих деталей.

При відомій відстані між випромінювачем і приймачем ультразвукових коливань (при розташуванні двох перетворювачів в одному корпусі [6]) можна визначити швидкість поширення ультразвукової хвилі в контрольованому зразку, що в подальшому можна використовувати для обчислення розмірів тріщини і її розташування.

Подальші дії представляється доцільним спрямувати на поглиблене дослідження трансформації та інтерференції різних типів хвиль в ультразвукових трактах і розробці методик контролю різних об'єктів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Основи ультразвукового неруйнівного контролю*: Підручник / В.К. Цапенко, Ю.В. Куц – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – 448 с.
2. *Seung H.M., Kim Y.Y.* Generation of omnidirectional shear-horizontal waves in a ferromagnetic plate by a magnetostrictive patch transducer // *NDT and E International*. – 2016. – Vol. 80. – P.6-14.
3. *Kwun H., Teller C.M.* Magnetostrictive generation and detection of longitudinal, torsional and flexural waves in a steel rod // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1994. – Vol. 96. – P. 1202-1204.
4. *Патент України № 104567.* Ультразвуковий малоапертурний магнітострикційний перетворювач / В.П. Бабак, І.В. Богачев; заявник і власник патенту ІТТФ НАН України. – №а201306020; заявл. 15.05.2013; опубл. 10.02.2014. – Бюл. №3.
5. *Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики*: Монографія / В.П. Бабак, С.В. Бабак, В.С. Березун та ін.; за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака / – К., 2015. – 512 с.
6. *Патент України № 107629.* Матриця малоапертурних магнітострикційних перетворювачів / В.П. Бабак, І.В. Богачев; заявник і власник патенту ІТТФ НАН України. – №а201312825; заявл. 04.11.2013; опубл. 26.01.2015. – Бюл. №2.

**CONTROL OF ELEMENTS OF CONSTRUCTION MACHINES AND METAL STRUCTURES USING LOW-APERTURE MAGNETOSTRICTIVE SENSORS**

**Bohachev I.V.**

*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine.*

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2019.11>

The aim of the work is to develop a method and technique for ultrasonic testing of elements of building machines and metal structures using low-aperture magnetostrictive transducers.

A study was conducted to detect cracks in the prototype. The crack was grown artificially by repeated variable bending loads on the part.

It was shown that the delay time for the signal to pass through the cracked section of the sample increased by  $0,5 \cdot 10^{-6}$  s compared to the delay time when the signal passed through the defect-free portion of the sample, and the signal amplitude decreased by more than 10 times.

Currently, ultrasonic testing methods for detecting surface cracks are the most promising. It seems advisable to direct further actions to an in-depth study of the transformation and interference of various types of waves in ultrasound paths and the development of methods for monitoring various objects.

References 6, tables 2, figures 4.

**Keywords:** surface ultrasonic wave, acoustic contact, magnetostrictive transducer, radiation pattern).

1. *Tsapenko V.K., Kuts YU.V.* Osnovy ul'trazvukovoho neruynivnoho kontrolyu [Fundamentals of ultrasonic nondestructive testing], Pidruchnyk [Textbook], Kyiv, NTUU «Kiev Politechnical Institute». 2010. 448 p. (in Ukr.)

2. *Seung H.M., Kim Y.Y.* Generation of omnidirectional shear-horizontal waves in a ferromagnetic plate by a magnetostrictive patch transducer. NDT and E International. 2016. Vol. 80. P.6–14.

3. *Kwun H., Teller C.M.* Magnetostrictive generation and detection of longitudinal, torsional and flexural waves in a steel rod. Journal of the Acoustical Society of America. 1994. Vol. 96. P. 1202–1204.

4. *Babak V.P., Bohachev I.V.* Ul'trazvukovyy maloaperturnyy mahnitostriksiyyny peretvoryuvach [Ultrasonic low-aperture magnetostrictive transducer], Patent Ukrayiny № 104567 [Patent of Ukraine]. / zayavnyk i vlasnyk patentu ITTF NAN Ukrayiny. №a201306020; zayavl. 15.05.2013; opubl. 10.02.2014. Byul. №3

5. *Babak V.P., Babak S.V., Berehun V.S....* Informatsiyne zabezpechennya monitorynhu ob"yektiv teploenerhetyky [Information support for monitoring of thermal power facilities], Kyiv, 2015. 512 p. (in Ukr)

6. *Babak V.P., Bohachev I.V.* Matrytsya maloaperturnykh mahnitostriksiynykh peretvoryuvachiv [The matrix of low-aperture magnetostrictive transducers], Patent of Ukraine № 107629, Byul. №2, 26.01.2015 (in Ukr)

*Отримано 05.11.2019*

*Received 05.11.2019*