

О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫМИ ВОЛНАМИ, ВОЗБУЖДАЕМЫМИ И ПРИНИМАЕМЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ (Обзор, ч. 2)

Г.М. Сучков, О.Н. Петрищев, С.Ю. Плеснецов

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». 61002, г. Харьков, ул. Кирпичева, 2.
E-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Выполнен анализ информационных источников, в которых приведены данные о чувствительности ультразвукового неразрушающего контроля поверхностными волнами металлоизделий приборами и установками с электромагнитно-акустическими преобразователями. Установлено, что по сравнению с традиционным контактным методом контроля в своей области применения: контроль металлов без специальной подготовки поверхности, автоматический и автоматизированный контроль с высокой производительностью, электромагнитно-акустический контроль имеет заметные преимущества. Во многих случаях чувствительность дефектоскопии с применением электромагнитно-акустических преобразователей не уступает традиционному контактному методу, а в некоторых случаях даже превышает его. Библиогр. 7, табл. 2, рис. 9.

Ключевые слова: металлоизделие, ферромагнитный, качество, дефект, электромагнитно-акустический, преобразователь, дефектоскопия, чувствительность контроля

В статье [1] рассмотрены общие данные о чувствительности электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей (ЭМАП), которые подтверждают перспективность их использования. Однако по-прежнему многие разработчики и исследователи считают, что главным недостатком ЭМАП является низкая чувствительность к несоответствиям объектов контроля (ОК), выявление которых регламентируется нормативно-технической документацией. Такое положение приводит к сравнительно незначительному объему разработок ЭМА оборудования и, соответственно, их использованию. В то же время, в отличие от традиционного контактного метода ультразвукового контроля (УЗК) [2], представляется чрезвычайно эффективным применения ЭМАП для контроля поверхности ОК волнами Рэлея или тонкостенных изделий (трубы, листы) волнами Рэлея и Лэмба [3].

Целью работы является оценка по чувствительности новых возможностей ЭМАП при УЗК поверхности ОК сложной формы или имеющих значительную площадь поверхности.

Чувствительность ЭМАП при контроле поверхности металлоизделий. Достаточно полно результаты выполненных экспериментальных исследований по обнаружению дефектов поверхности поверхностными волнами представлены в работе [4]. Авторами для выполнения исследований листовых и трубчатых ОК был разработан и изготовлен стенд (рис. 1).

Для выполнения экспериментальных исследований ЭМАП изготавливались в совмещенном, раздельно-совмещенном или в раздельном вариантах.

Во всех случаях индукторы ЭМАП выполняли в виде зигзагообразных плоских катушек [5] с шагом равным половине длины волны ультразвуковых колебаний на частотах в диапазоне 0,2...1,0 МГц. Длительность импульсов ультразвуковых колебаний устанавливали из интервала 3...8 периодов частоты заполнения импульсов. Амплитуда импульса тока в индукторе ЭМАП достигала 200 А. При использовании постоянного поляризующего магнитного поля его величину выбирали минимальной (0,3...0,4 Тл). Это необходимо для обеспечения приемлемых условий для работы оператора дефектоскопа с ЭМАП.

На первом этапе исследований авторами установлено, что отраженный из ОК сигнал, достаточ-



Рис. 1. Стенд для исследований по обнаружению поверхностных дефектов листов (а) и трубчатых (б) ОК импульсами волн Рэлея или Лэмба



Рис. 2. Реализации для случаев бездефектного участка (а) листа из стали 09Г2С и при наличии поверхностного дефекта (в) в виде риски (б) размерами $35 \times 1 \times 2,2$ мм (описание 1–3 см. в тексте)

ный по амплитуде для оценки качества поверхности, принимается на расстояниях до 3...5 м как на плоском ОК (лист со ржавой поверхностью), так и на поверхности с кривизной (труба). Частота УЗК составляла 0,9 МГц. Следовательно, при каждом зондировании ультразвуковым импульсом можно контролировать значительную площадь изделия, повышая тем самым производительность неразрушающего контроля.

На втором этапе были исследованы возможности выявления поверхностных дефектов на различных металлоизделиях. Временная развертка (реализация) для случая бездефектного участка листа показана на рис. 2, а. Реализация при наличии поверхностного дефекта в виде риски (рис. 2, б) размерами $35 \times 1 \times 2,2$ мм приведена на рис. 2, в при расстоянии от ЭМАП до дефекта равном 1 м. В выполненных исследованиях использована частота 0,3 МГц. На рис. 2, а, в и, соответственно, на всех последующих рисунках с реализациями, цифрой 1 обозначен зондирующий импульс, 2 – импульс от торца изделия (на трубчатом изделии обегаяющий по окружности импульс) и 3 – импульс от дефекта.

Стенд для УЗК трубчатых ОК приведен на рис. 1, б. Отображенные эхо-сигналы представлены после предварительного усиления без применения обработки. Изображения дефектов и соответствующие им реализации для случаев наличия поверхностных дефектов в виде продольной риски размерами $60 \times 0,2 \times 1$ мм, сквозного отверстия диаметром 2,8 мм, забоины глубиной до 0,4 мм на поверхности обсадной трубы бывшей в эксплуатации, приведены, соответственно, на рис. 3.

Образец из заготовки железнодорожной оси и реализация для случая бездефектного участка приведены на рис. 4. Реализа-

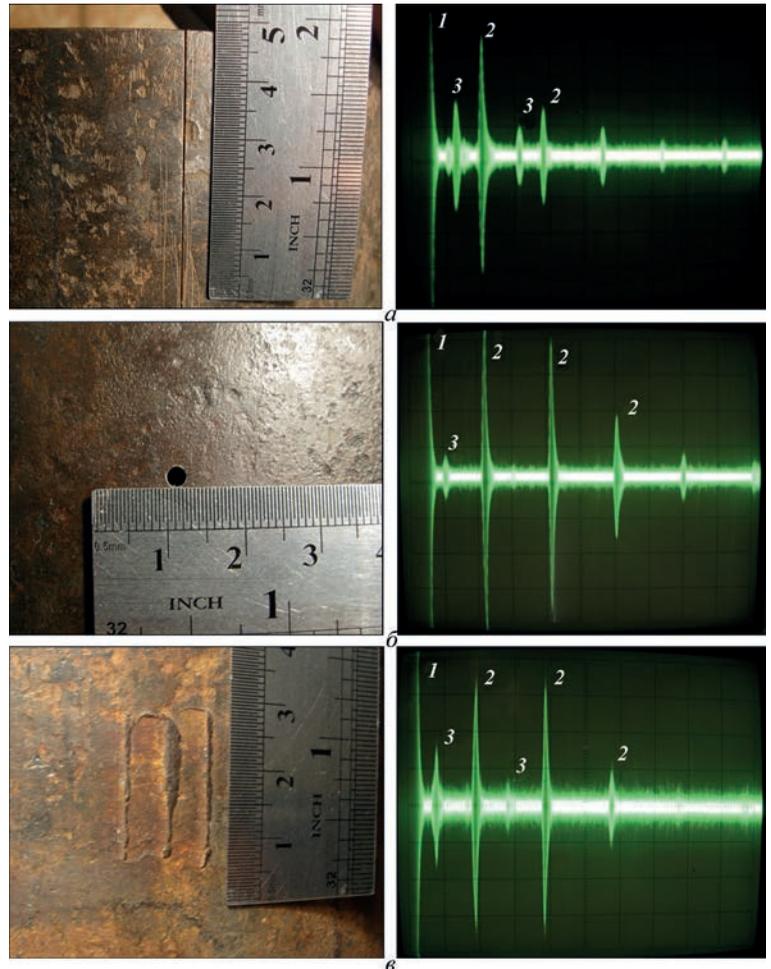


Рис. 3. Поверхностные дефекты и соответствующие им реализации, полученные с помощью стенда приведенного на рис. 1, б на образце обсадной трубы бывшей в эксплуатации (описание см. в тексте)

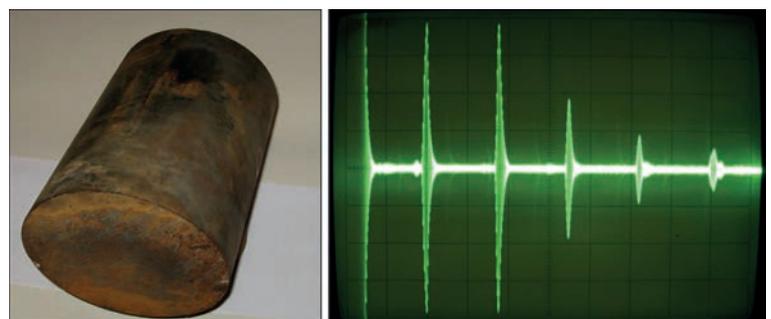


Рис. 4. Образец железнодорожной оси и соответствующая реализация обегаяющих по окружности импульсов в отсутствие поверхностного дефекта

ции, при наличии поверхностных дефектов в виде засверловки диаметром 3 мм и продольной риски размерами 15×0,45×0,35 мм, приведены на рис. 5.

Образец из заготовки круглого сечения диаметром 230 мм с установленным на нем ЭМАП показан на

рис. 6, а. Вид естественного поверхностного дефекта на поверхности заготовки (рис. 6, б) и соответствующая ему реализация, приведены на рис. 6, в.

Особенно эффективен УЗК с применением ЭМАП метода для обнаружения поверхностных дефектов

на участках изделий с выпуклой и вогнутой поверхностью, например, на головке рельса. Схемы контроля поверхности головки рельса ЭМАП показаны на рис. 7, где буквой «Д» обозначен поверхностный дефект. ЭМАП при необходимости может располагаться на рельсе с зазором h , что исключает трение и износ индуктора датчика. Реализации для случаев обнаружения моделей дефектов в виде продольных и поперечных канавок раскрытием 0,15...0,2 мм и глубиной 0,5...0,8 мм, расположенных на различных участках поверхности головки в соответствии со схемами (рис. 7), приведены на рис. 8.

Для определения численных величин амплитуд эхо-импульсов поверхностных волн, отраженных моделями дефектов, выполнены дополнительные исследования, схемы которых приведены на рис. 9. Модель дефек-

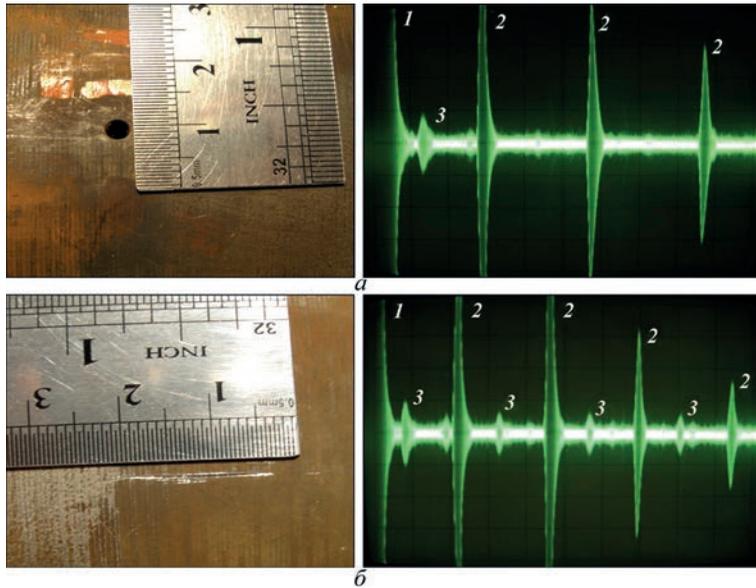


Рис. 5. Модели дефектов на поверхности круглой заготовки диаметром 170 мм и соответствующие им реализации, полученные с помощью стенда рис. 1, б (описание см. в тексте)



Рис. 6. Образец из заготовки круглого сечения (а), фото естественного дефекта (б) и реализация с эхо-импульсом от этого дефекта (в) (описание 1, 3 см. в тексте)

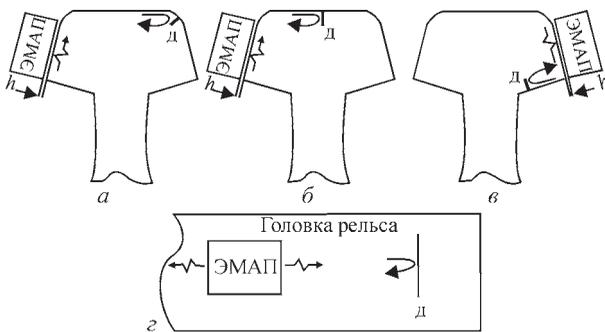


Рис. 7. Схемы УЗК различных участков поверхности головки рельса: а – продольный дефект на выпуклой поверхности верхней части головки рельса размерами 40×0,45×0,7 мм; б – продольный дефект на средней части поверхности головки рельса размерами 40×0,45×0,5 мм; в – продольный дефект на вогнутой поверхности подголовочной части головки рельса размерами 45×0,2×0,85 мм; г – поперечный дефект на поверхности верхней части головки рельса размерами 40×0,45×0,8 мм

та представляла собой продольную канавку длиной 50 мм и глубиной 0,5 мм, располагаемую по отношению к ЭМАП на различных расстояниях. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Анализ данных, приведенных в табл. 1 показывает, что отношение амплитуд эхо-сигналов от дефектов к амплитуде шума, даже без применения методов обработки, являются достаточными для обеспечения эффективного контроля криволинейных поверхностей. При этом не требуется зачистка поверхности изделия.

Следует отметить, что в промышленности используется значительное количество изделий в виде труб и изготовленных из них элементов оборудования. Материал таких ОК может быть различным. Для исследования выявляемости де-

Таблица 1. Результаты измерений амплитуд эхо сигналов, отраженных моделью дефекта длиной 50 мм и глубиной 0,5 мм и находящихся на поверхностях рельса с различной кривизной [6]

Номер дефекта (рис. 9)	Отношение амплитуд эхо-сигнала и шума, раз		
	Схема а	Схема б	Схема в
1	72	21,5	29,0
2	66	15	22,0
3	56	13,7	17,4
4	20	–	–
5	16	–	–

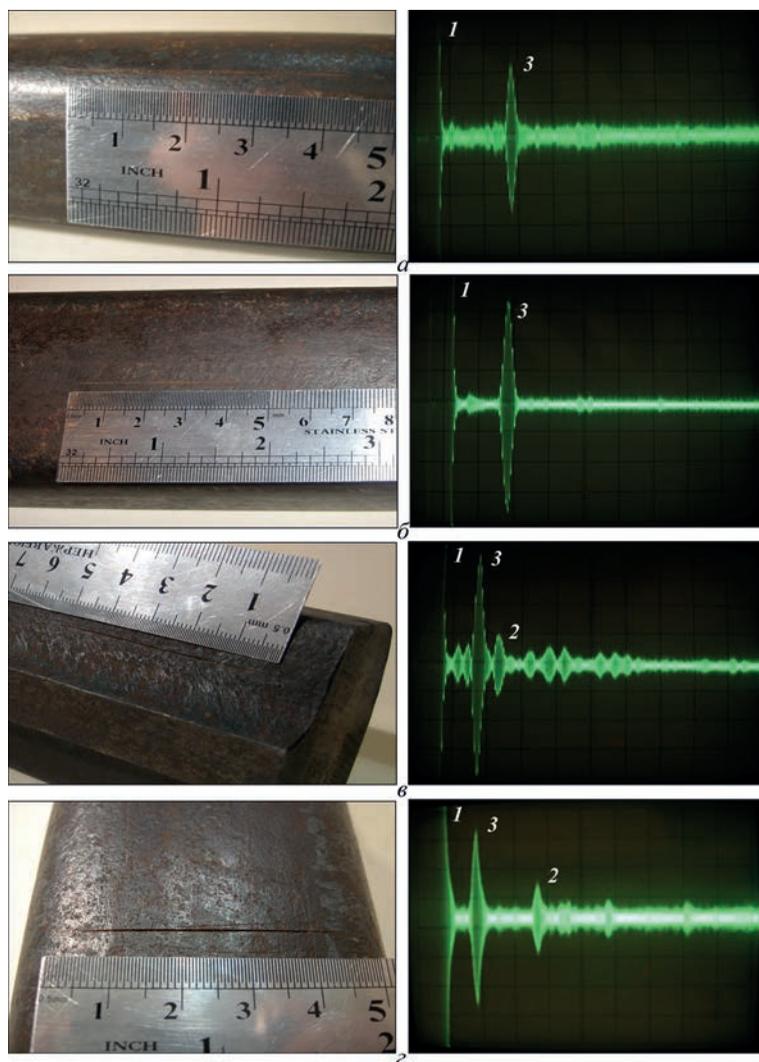


Рис. 8. Изображения моделей дефектов на поверхности головки рельса (а–д – см. рис. 7) и соответствующие им реализации, полученные при УЗК поверхностными волнами с применением ЭМАП

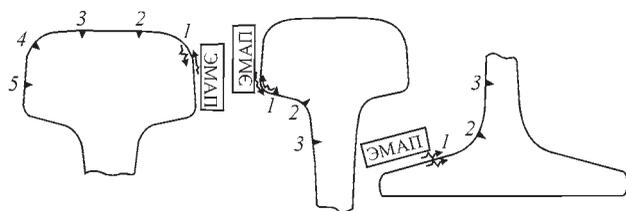


Рис. 9. Схемы контроля участков поверхности головки рельсов для оценки амплитуд эхо-сигналов, полученных с применением ЭМАП (1–5 – условные номера дефектов)

фектов в таких изделиях авторами работы [7] были отобраны образцы от ферромагнитных труб серийного производства в состоянии поставки с завода – шероховатая с окалиной и ржавчиной поверхность. Исследованы пробы от труб диаметром 17 мм и более. Диапазон толщины стенок лежал в интервале от 1,0 до 11,7 мм. В пробах на внутренней и наружной поверхностях были изготовлены пазы с раскрытием от 0,15 до 0,3 мм, глубиной от 0,1 до 8 мм, длиной более 10 мм, а также сверления в стенке трубы параллельно образующей диаметром 1,3...2,5 мм на глубину более 25 мм. Исследованы естественные дефекты раскрытием менее 0,1 мм и прямые сварные швы с дефектом типа непровар и без него.

Ультразвуковые импульсы возбуждались и принимались комбинированным ЭМАП [5] при одностороннем доступе к поверхности трубчатого образца. Рабочая зона ЭМАП имела размеры 6×12 мм². Величина поляризующего магнитного поля составляла 0,6 Тл. Зазор между ЭМАП и поверхностью металла 0,5 мм. Исследования выполнены в частотном диапазоне 2,0...2,7 МГц. Длительность импульсов изменяли в интервале от 1 до 18 периодов ультразвуковых колебаний. Оценку величины дефектов проводили по отношению амплитуд пакетных импульсов принятых эхо-сигналов и шума. Наиболее характерные результаты выполненных исследований приведены в табл. 2.

Анализ результатов выполненных исследований позволил сделать следующие выводы. Применение разработанного нового ЭМА способа дефектоскопии изделий дает возможность уверенно обнаруживать эхо-методом продольные и поперечные дефекты на наружной и внутренней поверхностях труб, а также внутренние дефекты в стенках труб, в листах при доступе с одной из сторон. С высокой степенью надежности определяются дефекты типа трещин, представляющие особую опасность при эксплуатации. Обнаружены дефекты с раскрытием менее 0,1 мм и глубиной более 0,2 мм. Успешно выявили внутренние дефекты в виде отверстия диаметром 1,3 мм и более, а также не-

Таблица 2. Результаты исследований выявляемости дефектов в образцах, отобранных от труб разного производства, изготовленных из различных материалов [7]

Исследуемый объект	Дефект и его параметры	Отношение амплитуд эхо-сигнала и шума, раз	Расстояние от поверхности до дефекта, мм
Обточенная обсадная труба диаметром 168 мм, стенка 10,4 мм (сталь по ГОСТ 632-80)	Продольный прямоугольный паз длиной $a = 16$ мм, раскрытием $\epsilon = 0,3$ мм и глубиной $c = 0,82$ мм на наружной поверхности	42	0
	То же на внутренней поверхности	41	Толщина стенки
	Отверстие диаметром 1,3 мм в середине стенки глубиной 25 мм, просверлено вдоль образующей трубы	8	1/2 толщины стенки
Обсадная труба диаметром 168 мм с муфтой. Поверхность черновая. Стенка 10,6 мм	Продольный паз на наружной поверхности с $a = 16$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 0,8$ мм	28	0
«-» на муфте	То же с $a = 16$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 0,6$ мм	11,5	0
«-» на трубе	Продольный паз на внутренней поверхности трубы с $a = 22$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 1$ мм	38,9	Толщина стенки
	Поперечный паз на наружной поверхности с $a = 12$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 0,8$ мм	32	0
Обсадная труба диаметром 168 мм, разнотолщинность стенки от 11,7 до 12,3 мм	Продольный паз на наружной поверхности с $a = 120$ мм, $\epsilon = 0,15$ и c , мм: 1,20 1,05 0,83 0,56 0,37 0,22	53	0
		48	0
		46	0
		40	0
		33	0
		21	0
	Поперечный паз на наружной поверхности с $a = 12,5$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 0,6$ мм	28	0
Продольный паз на внутренней поверхности с $a = 32$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 1,7$ мм	50	Толщина стенки	
	Продольное отверстие в стенке диаметром 2 мм на глубину 34 мм	33	1/2 толщины стенки
Чугунная гильза для двигателей грузовиков диаметром 132 мм, стенка 7 мм	Продольный паз на наружной поверхности с $a = 28$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 0,3$ мм	9,4	0
Труба сварная (по образующей) диаметром 32 мм, стенка 2 мм (Ст3)	Бездефектный сварной шов	5,7	0
	Непровар в сварном шве длиной 6 мм	11,8	0
Труба сварная (по образующей) диаметром 28 мм, стенка 1 мм (сталь 3)	Продольный паз на наружной поверхности с $a = 21,5$, $\epsilon = 0,2$ мм, $c = 0,2$ мм	7,7	0
Труба диаметром 51,3 мм, стенка 3,5 мм (сталь 45)	Продольный паз на наружной поверхности с $a = 31$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 0,2$ мм	54	0
	То же на внутренней поверхности с $a = 40$ мм, $\epsilon = 0,15$ мм, $c = 0,2$ мм	43	0
Труба диаметром 32 мм, толщина стенки 6,3 мм (легированная сталь)	Естественная трещина на наружной поверхности с $a \approx 34$ мм, $\epsilon < 0,1$ мм, $c \approx 0,2$ мм	8,6	0
	То же на внутренней поверхности с $a \approx 18$ мм, $\epsilon < 0,1$ мм, $c \approx 0,4$ мм	28	0
Труба диаметром 17 мм, стенка 3,5 мм (легированная сталь)	Естественная трещина на наружной поверхности по всей длине с $\epsilon < 0,1$ мм, $c \approx 0,2$ мм	6	0
Труба диаметром 24 мм, стенка 2,5 мм (легированная сталь)	Естественная трещина на наружной поверхности по всей длине с $\epsilon < 0,1$ мм, $c \approx 0,2$ мм	8	0

провары в сварных швах и сами сварные швы на фоне основного металла.

Приведенные данные опровергают мнение о недостаточной чувствительности ультразвукового контроля ОК поверхностными волнами устройствами с ЭМАП.

Выводы

1. Экспериментальными исследованиями установлена возможность ультразвукового ЭМА контроля поверхности листовых и трубчатых изделий с высокой чувствительностью с использованием волн Рэлея и Лэмба.

2. При проведении ЭМА дефектоскопии специальную зачистку поверхности ОК можно не проводить.

3. Практически все типоразмеры труб, листов, заготовок и рельсов можно контролировать одним и тем же ЭМАП.

4. На результатах контроля ЭМАП волнами Рэлея не сказывается разнотолщинность и овальность труб.

5. Использование ЭМАП волн Рэлея обеспечивает высокую чувствительность дефектоскопии на плоских, выпуклых и вогнутых поверхностях ОК.

Список литературы

1. Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю. (2018) Чувствительность контроля электромагнитно-акустическими преобразователями (Обзор, ч. 1). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 45–50, DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2018.04.06>.
2. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. (2004) *Неразрушающий контроль*. Справочник: В 7 т. Клюев В.В. (ред.). Т.3: Ультразвуковой контроль. Москва, Машиностроение.
3. (2019) *Corrosion Under Insulation and Fireproofing* [Электронный ресурс]. American Petroleum Institute, 110. http://www.txis.org/txis/API_RP_583_Rev2_2019.pdf
4. Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Хащина С.В. и др. (2013) Повышение возможностей бесконтактной дефектоскопии поверхности катаных ферромагнитных металлоизделий. *Контроль. Диагностика*, **4**, 31–35.
5. Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю., Мещеряков С.Ю., Юданова Н.Н. (2018) Новые разработки электромагнитно-акустических преобразователей. (Обзор). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **3**, 27–34.

6. Сучков Г.М. (2005) *Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно-акустического контроля металлоизделий*: дис. д-ра техн. наук. Харьков, НТУ «ХПИ».
7. Сучков Г.М., Катасонов Ю.А., Гарькавий В.В. (2000) Возможности бесконтактных электромагнитных методов неразрушающего контроля качества труб. *Питання розвитку газової промисловості України. Вип. XXVIII. Діагностування трубопроводів, технологічного і енергомеханічного обладнання нафтової та газової промисловості*. УкрНДІГаз, сс. 102–109.

References

1. Suchkov, G.M., Plesnetsov, S.Yu. (2018) Sensitivity of testing via electromagneto-acoustic transducers (Overview, p. 1). *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 45–50 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2018.04.06>.
2. Ermolov, I.N., Lange, Yu.V. (2004) *Nondestructive testing*. In: Refer. book, 7 Vol., Ed. by V.V. Klyuev. Vol 3: Ultrasonic testing. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. (2019) *Corrosion under insulation and fireproofing*. American Petroleum Institute, 110. http://www.txis.org/txis/API_RP_583_Rev2_2019.pdf
4. Suchkov, G.M., Petrishchev, O.N., Khashchina, S.V. et al. (2013) Enhancement of the capabilities of contactless flaw detection of the surface of rolled ferromagnetic metal products. *Kontrol, Diagnostika*, **4**, 31–35 [in Russian].
5. Suchkov, G.M., Plesnetsov, S.Yu., Mecheriakov, S.Yu. et al. (2018) New developments of electromagnetoacoustic transducers (Review). *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 27–34 [in Russian].
6. Suchkov, G.M. (2005) *Development of the theory and practice of designing instrumentation for electromagnetoacoustic testing of metal products*. In: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Kharkov, NTU KhPI [in Russian].
7. Suchkov, G.M., Katasonov, Yu.A., Garkavy, V.V. (2000) Capabilities of contactless electromagnetic methods of NDT of pipes. *Questions of development of gas industry of Ukraine. Issue XXVI. Diagnostics of pipelines, process and electromechanical equipment of oil and gas industry*. UkrNDIGaz, 102–109 [in Russian].

ЩОДО ЧУТЛИВОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВИМИ ХВИЛЯМИ, ЯКІ ЗБУДЖУЮТЬСЯ ТА ПРИЙМАЮТЬСЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ (Огляд, ч. 2)

Г.М. Сучков, О.М. Петрищев, С.Ю. Плеснецов

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

E-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Виконано аналіз інформаційних джерел, в яких наведено дані щодо чутливості ультразвукового неруйнівного контролю поверхневими хвилями металовиробів приладами і установками з електромагнітно-акустичними перетворювачами. Встановлено, що в порівнянні з традиційним контактним методом контролю в своїй галузі застосування: контроль металу без спеціальної підготовки поверхні, автоматичний і автоматизований контроль з високою продуктивністю, електромагнітно-акустичний контроль має помітні переваги. У багатьох випадках чутливість дефектоскопії із застосуванням електромагнітно-акустичних перетворювачів не поступається традиційному контактному методу, а в деяких випадках навіть перевищує його. Бібліогр. 7, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: металовиріб, феромагнітний, якість, дефект, електромагнітно-акустичний, перетворювач, дефектоскопія, чутливість контролю

ABOUT THE SENSITIVITY OF ULTRASONIC TESTING BY SURFACE WAVES EXCITED AND RECEIVED BY ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC TRANSDUCERS (Review, p. 2)

G.M. Suchkov, O.N. Petrishchev, S.Yu. Plesnetsov

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». 2 Kirpichev Str., 61002, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Analysis of information sources was performed. These sources give the data on the sensitivity of ultrasonic nondestructive testing of metal products by surface waves with instruments and systems with electromagneto-acoustic transducers. It is found that electromagneto-acoustic testing has noticeable advantages, compared to the traditional contact method of control in its application field, namely control of metals without any special preparation of the surface, automatic and automated testing with a high efficiency. In many cases the sensitivity of flaw detection with application of electromagneto-acoustic transducers is not inferior to the traditional contact method, and in some cases even exceeds it. 7 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: metal product, ferromagnetic, quality, defect, electromagneto-acoustic transducer, flaw detection, control sensitivity

Поступила в редакцію 11.12.2018