

ПОРТАТИВНІ ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ВИРОБІВ ТА ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ПАРАМЕТРАМИ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ РІЗНОЇ ПРИРОДИ*

Є.П. Почапський, Б.П. Клим, Н.П. Мельник, Я.Д. Толопко, П.М. Долішній, П.П. Великий

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: pochapskyy@ipm.lviv.ua

Наведено результати створення портативних засобів діагностування виробів та елементів конструкцій за параметрами пружних хвиль різної природи. Розроблено структури багатоканальної акустико-емісійної та магнетоакустичної систем діагностування. Обґрунтовано виконання систем у вигляді набірних блочних конструкцій. Запропонована конструкція мобільного пристрою для переміщення накладного електромагнета магнетоакустичної системи. Розроблено системне та інформаційне програмне забезпечення для магнетоакустичної та багатоканальної акустико-емісійної портативних систем. Запропоновано методику оцінювання напруженого стану феромагнетних елементів конструкцій за параметрами сигналу магнетопружної акустичної емісії. Розроблено методики контролю метрологічних характеристик розроблених систем. Проведено акустико-емісійне та магнетоакустичне обстеження смостей, що працюють під тиском, та ділянок трубопроводів і обладнання нафтогазового комплексу України у Львівській та Івано-Франківській областях. Бібліогр. 11, рис. 6.

Ключові слова: неруйнівний контроль, акустична емісія, магнетопружна акустична емісія, багатоканальна акустико-емісійна система, магнетоакустична система, програмне забезпечення, алгоритми опрацювання сигналу, оцінювання напруженого стану феромагнетних елементів конструкцій, контроль метрологічних характеристик

Одним зі сучасних методів неруйнівного контролю, який забезпечує необхідною діагностичною інформацією і має високу чутливість та найкраще співвідношення «ефективність діагностування – затрати на його проведення», є метод акустичної емісії (АЕ). Важливими його перевагами є ще й те, що він не потребує додаткового збудження фізичних полів, підготовки поверхонь об'єкта контролю, не чутливий до його форми та розмірів, дає можливість отримувати інформацію про джерело руйнування на відстанях, що на порядки перевищують його розміри [1].

Однак традиційна реалізація методу АЕ вимагає в окремих випадках прикладання зовнішнього додаткового механічного навантаження об'єкта контролю. Ураховуючи те, що рівень цього навантаження, необхідний для провокування поширення малих дефектів, іноді може бути значно вищим за допустимі оптимальні режими напружень у матеріалі елемента конструкцій, практичне застосування АЕ-діагностування є дещо обмеженим, особливо для елементів конструкцій тривалого експлуатування, що працюють у контакт з водно-вмісним середовищем.

Щоб розширити рамки застосування методу АЕ, а також ефективніше проводити локальне діагностування елементів конструкцій чи виробів, пропонується збуджувати сигнали магнетопружної акустичної емісії (МАЕ) зовнішнім магнетним полем, яке ініціюватиме стрибкоподібне переми-

щення стінок магнетних доменів (ефект Баркгаузена) [2, 3]. Ці процеси відбуватимуться з деякими особливостями в околі окремих дефектів чи їх скупчень, де наявні значні градієнти механічних напружень чи суттєві зміни доменної структури матеріалу під впливом воднево-механічного чинника. Такі зміни структури матеріалу та його деградація виникають за час тривалого експлуатування.

Із огляду літературних джерел можна зробити висновок про недостатній рівень теоретичного та методичного обґрунтування методу МАЕ [1, 2]. Зрозуміло також, що апаратне забезпечення методів діагностування є актуальною задачею, розв'язання якої дасть можливість, зокрема для методу МАЕ, одержувати додаткову інформацію про стан феромагнетного матеріалу з його локального об'єму в умовах неперервної експлуатації об'єкта контролю.

Розроблення та виготовлення портативних систем. Роботи проводилися в рамках проекту «Створення портативних засобів діагностування виробів та елементів конструкцій за параметрами пружних хвиль різної природи» [4–8]. Було обґрунтовано виконання портативних багатоканальної акустико-емісійної та магнетоакустичної систем у вигляді набірних блочних конструкцій, розроблено їх структуру, здійснено макетування вузлів і блоків, лабораторне відпрацювання їх електричних принципів схем. Запропонова-

* За результатами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс»), отриманих за 2016-2020 рр.

© Є.П. Почапський, Б.П. Клим, Н.П. Мельник, Я.Д. Толопко, П.М. Долішній, П.П. Великий, 2020

на конструкція мобільного пристрою для переміщення накладного електромагнета. Виготовлено дослідний зразок багатоканальної акустико-емісійної системи (рис. 1). Конструкцію АЕ-системи виконано збірною з однотипних блоків, які з'єднано між собою механічно гвинтами, а електрично з'єднано стрічковими плоскими кабелями через роз'єми, розташовані на конструкції кріплення друкованих плат. Несучим елементом системи є блок живлення, до якого знизу та зверху кріпляться чотири блоки.

Кожен блок містить вісім акустичних каналів і три параметричних, а також один тестовий канал для перевірки якості контакту перетворювач акустичної емісії (ПАЕ) з поверхнею об'єкта контролю. Програмно вибирається сумісний чи роздільний режим роботи блоків.

Розроблено системне та інформаційне програмне забезпечення (ПЗ) багатоканальної акустико-емісійної системи (рис. 2). ПЗ здійснює планування діагностичного експерименту, зокрема, задається кількість використовуваних каналів, робоча смуга частот, частота дискретизації та об'єм вибірки сигналу, підсилення каналів АЕ, координати ПАЕ, вибирається тип об'єкта контролю, його розміри.

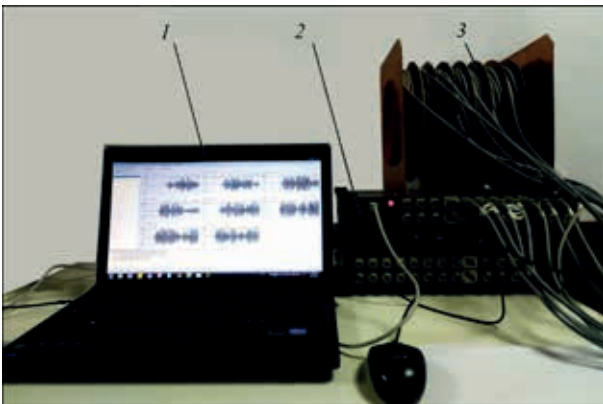


Рис. 1. Дослідний зразок портативної багатоканальної акустико-емісійної системи SKOP-32: 1 – ПК; 2 – блок обробки сигналів; 3 – комплект кабелів з попереднім підсилювачем (ПП)

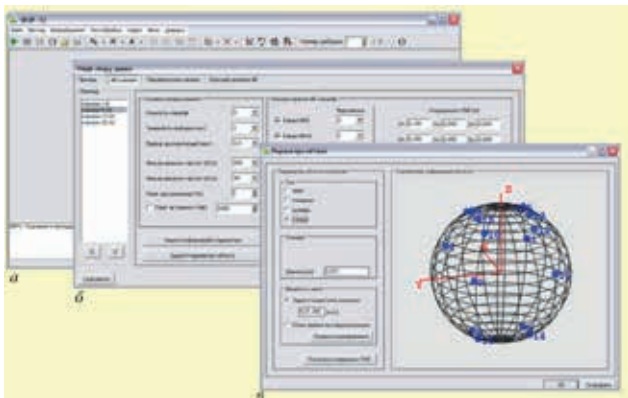


Рис. 2. Вигляд деяких вікон розробленого програмного забезпечення багатоканальної системи: а – головне вікно; б – опції збору даних; в – параметри об'єкта

Використовуючи одержану АЕ-інформацію, програма в реальному масштабі часу за розробленими алгоритмами забезпечує можливість знаходження координат джерела АЕ та дослідження амплітудних, часових та частотних характеристик сигналу.

Було виготовлено також дослідний зразок магнетоакустичної системи (рис. 3). МАЕ-система складається з трьох блоків, які з'єднано між собою механічно гвинтами, а електрично – кабелями через роз'єми, розташовані на задніх стінках блоків. Таку структуру МАЕ-системи вибрано з міркувань забезпечення її уніфікації та високої ремонтоздатності.

Перший верхній основний блок БВО – блок відбору і опрацювання. В ньому реалізовано канал відбору та реєстрації сигналу МАЕ, канали відбору та реєстрації індукції перемагнечувального поля і напруженості магнетного поля розсіювання та струму перемагнечення. Також реалізовано канал зв'язку з персональним комп'ютером. В БВО формується сигнал перемагнечення заданої частоти та форми, який поступає на другий блок системи БПМ. На задній панелі блока розміщений також роз'єм СИНХР, який забезпечує можливість використання для збудження МАЕ зовнішнього генератора.

Другий середній блок БПМ – блок перемагнечення. В ньому знаходиться блок живлення, який забезпечує стабілізовані напруги для живлення блока БВО та напруги для реалізованого в БПМ підсилювача потужності перемагнечувального сигналу, який поступає на накладний електромагнет (НЕМ). Третій блок БА – блок акумуляторів. Він забезпечує автономне живлення системи.

Розроблене системне (рис. 4) ПЗ магнетоакустичної системи, яке забезпечує налаштування режимів функціонування системи. Зокрема, для каналу відбору та реєстрації сигналу МАЕ задаються, виходячи із конкретних умов експерименту, значення основних його параметрів: коефіцієнт підсилення основного підсилювача каналу

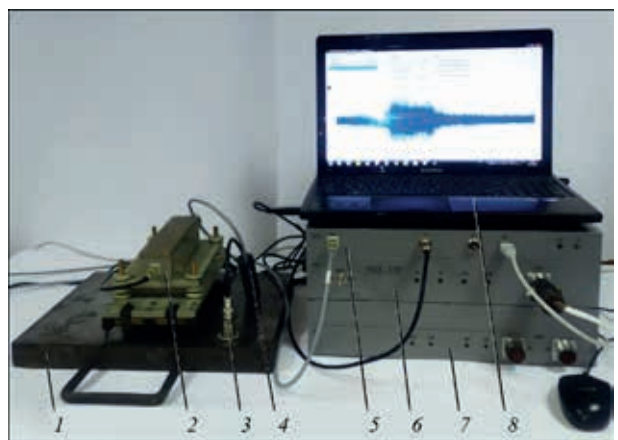


Рис. 3. Дослідний зразок магнетоакустичної системи МАЕ-1LP: 1 – досліджуваний зразок з феромагнетного матеріалу; 2 – НЕМ; 3 – ПАЕ; 4 – ПП; 5 – БВО; 6 – БПМ; 7 – БА; 8 – ПК

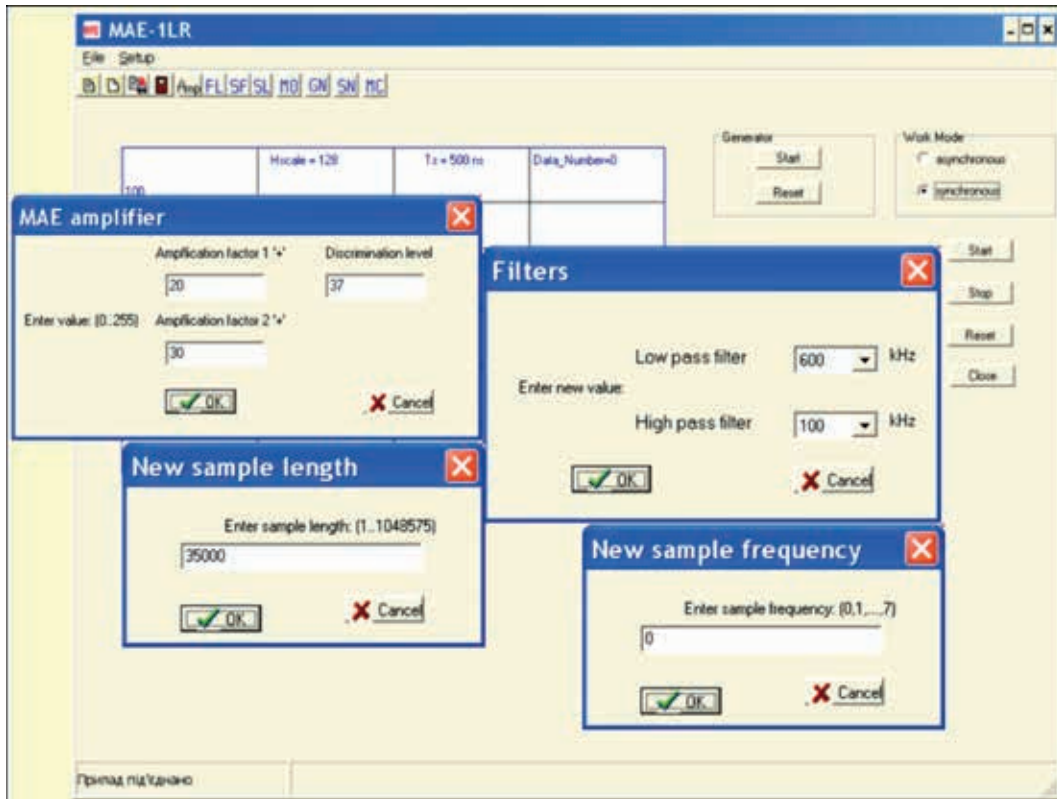


Рис. 4. Вигляд деяких вікон розробленого програмного забезпечення магнетоакустичної системи

МАЕ; поріг дискримінації, частота дискретизації та об'єм виборки сигналу МАЕ, кількість виборок; робоча смуга частот.

Також встановлюються параметри каналів відбору та реєстрації індукції В та напруженості магнетного поля Н, струму перемагнення І, зокрема, коефіцієнти підсилення підсилювачів та частота дискретизації сигналу. Налаштовується генератор сигналу перемагнення, зокрема, форма і частота сигналу, тип синхронізації та стабілізації параметрів сигналу перемагнення.

Розроблене інформаційне ПЗ дає можливість досліджувати амплітудні, часові та частотні параметри сигналу МАЕ. Зокрема, реалізовані алгоритми побудови гістограм амплітудного та часового розподілів, знаходження огинаючої сигналу МАЕ,

оцінки залежності кількості імпульсів сигналу МАЕ від порогу дискримінації, алгоритм знаходження частотного спектру сигналу та інші [9–11].

Апробація інформаційного програмного забезпечення. Було проведено апробацію розроблених алгоритмів опрацювання сигналів акустичної та магнетоакустичної емісії. Зокрема побудовано гістограми розподілів амплітуд імпульсів сигналу МАЕ для сталювого та нікелювого пластинчастих зразків.

Вигляд одержаних гістограм розподілів амплітуд імпульсів наводить на думку про експоненційний характер розподілів. Здійснено перевірку гіпотези про експоненційність законів розподілу за критерієм χ^2 . Проведені розрахунки дають підставу констатувати, що амплітуда імпульсів сигналу МАЕ розподілена за експоненційним законом,

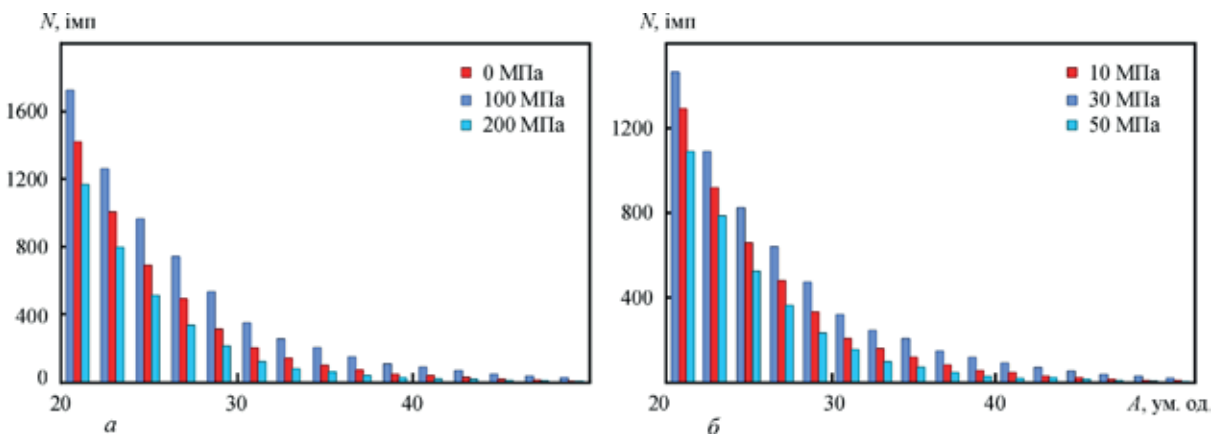


Рис. 5. Оцінки густини ймовірності розподілу амплітуд (гістограми) для сигналу МАЕ за різних навантажень зразків (а – зі сталі; б – з нікелю)

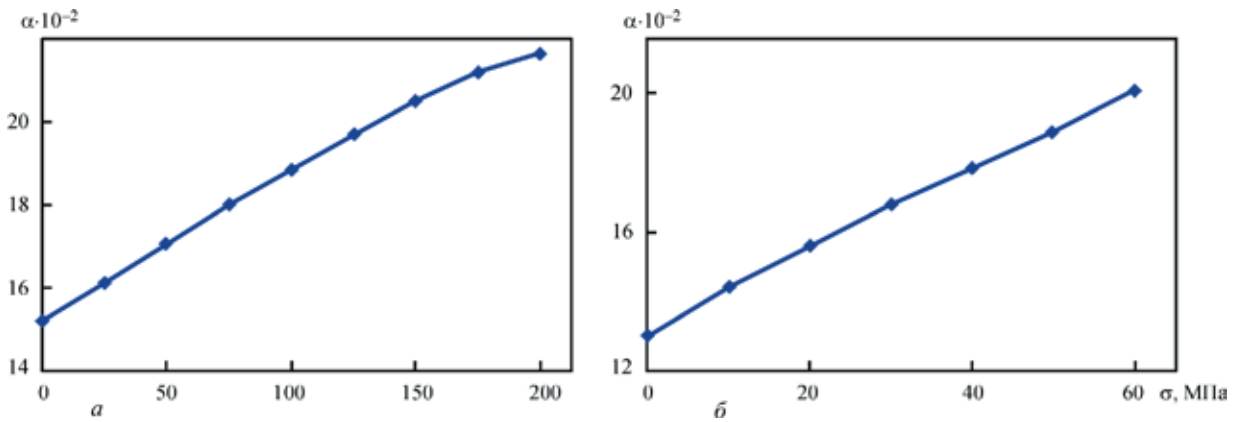


Рис. 6. Залежність коефіцієнта загасання апроксимувальної експоненти оцінки амплітудного розподілу від прикладеного навантаження для зразків (а – зі сталі; б – з ніколу)

а його параметр α можна використовувати як інформаційний при діагностуванні феромагнетних об'єктів методом МАЕ.

Для цих же зразків, які піддавалися навантаженню розтягу, знайдено оцінки розподілів амплітуд імпульсів для різних значень прикладеного навантаження (рис. 5, а, б).

Грунтуючись на результатах досліджень про експоненційний закон розподілу амплітуд сигналу МАЕ, побудовано залежності коефіцієнтів загасання апроксимувальних експонент оцінок амплітудних розподілів від прикладеного навантаження, які можна використати як градуювальні криві для діагностування залишкових напружень у феромагнетних об'єктах тривалої експлуатації (рис. 6, а, б).

Ці залежності характеризується стійкістю до низки експериментальних чинників, які впливають на амплітудні характеристики сигналу (коефіцієнта підсилення сигналу МАЕ, якості контакту перетворювача акустичної емісії з поверхнею об'єкта, діаграми напрямленості перетворювача), в порівнянні з аналогічною залежністю суми амплітуд сигналу від величини прикладеного навантаження [8, 10].

На основі проведених досліджень з використанням розробленого інформаційного ПЗ запропоновано методику оцінювання напруженого стану феромагнетних елементів конструкцій за параметрами сигналу МАЕ, яка полягає у такому:

1. Реєстрування МАЕ на ділянці досліджуваного об'єкта.
2. Опрацювання зареєстрованого сигналу згідно розроблених алгоритмів:
 - оцінювання гістограми розподілу амплітуд сигналу МАЕ;
 - апроксимація гістограми експоненційною функцією;
 - знаходження коефіцієнта загасання експоненти.
3. Знаходження за еталонною залежністю коефіцієнта загасання від прикладеного напруження відповідних значень залишкового напруження в діагностованій області феромагнетного матеріалу.

Розроблені керівництва щодо експлуатування портативних систем та методики контролю їх метрологічних характеристик. За результатами контролю ДП «Львівстандартметрологія» метрологічних характеристик розроблених систем отримано Свідоцтва.

Висновки

1. Розроблено структури багатоканальної акустико-емісійної та магнетоакустичної систем діагностування. Обґрунтовано виконання систем у вигляді набірних блочних конструкцій. Запропоновано конструкцію мобільного пристрою для переміщення накладного електромагнета магнетоакустичної системи.
2. Виготовлено дослідні зразки магнетоакустичної та багатоканальної акустико-емісійної портативних систем.
3. Розроблено системне та інформаційне програмне забезпечення магнетоакустичної та багатоканальної акустико-емісійної портативних систем.
4. Запропоновано методику оцінювання напруженого стану феромагнетних елементів конструкцій за параметрами сигналу магнетопружної акустичної емісії.
5. Розроблено методики контролю метрологічних характеристик магнетоакустичної та багатоканальної акустико-емісійної портативних систем.
6. За допомогою портативних багатоканальної акустико-емісійної системи «SKOP-32» та магнетоакустичної системи «МАЕ-1ЛР» проведено акустико-емісійне та магнетоакустичне обстеження ємностей, що працюють під тиском, та ділянок трубопроводів і обладнання нафтогазового комплексу України у Львівській та Івано-Франківській областях.

Список літератури

1. Назарчук З.Т., Скальський В.Р., Почапський Є.П. (2014) *Технології відбору та опрацювання низькоенергетичних діагностичних сигналів*. Київ, Наукова думка.
2. Скальський В.Р., Почапський Є.П., Клим Б.П., Рудак М.О. (2016) Застосування методу магнетопружної акус-

- тичної емісії для оцінювання технічного стану тривало експлуатованої на нафтогоні сталі 19Г. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **3**, 81–84.
3. Скальський В.Р., Почапський Є.П., Клим Б.П., Рудак М.О. (2016) Застосування методу магнетопружної акустичної емісії для контролю напруженого стану феромагнетних елементів конструкцій. *Технологические системы*, **2**, 67–69.
 4. Скальський В.Р., Почапський Є.П., Клим Б.П., Сімакович О.Г. (2014) Визначення координат джерел акустичної емісії в тонкостінних об'єктах циліндричної форми. *Відбір і обробка інформації*, **41**, 55–62.
 5. Скальський В.Р., Почапський Є.П., Клим Б.П., Сімакович О.Г. (2015) Розташування джерел акустичної емісії на тонкостінних об'єктах сферичної форми. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **1**, 122–129.
 6. Скальський В.Р., Почапський Є.П., Клим Б.П., Коблан І.М. (2016) Підвищення ефективності збудження сигналів магнетопружної акустичної емісії. *Відбір і обробка інформації*, **44** (120), 5–11.
 7. Скальський В.Р., Почапський Є.П., Клим Б.П. та ін. (2016) Розроблення концепції побудови системи діагностування виробів та елементів конструкцій за параметрами магнетопружної акустичної емісії. Матеріали доповідей 8-ї Національної науково-технічної конференції з неруйнівного контролю та технічної діагностики. Київ, 22–24 листопада 2016 р., 249–254.
 8. Почапський Є.П., Мельник Н.П., Коблан І.М. (2018) Вплив умов збудження на генерування сигналів магнетопружної акустичної емісії у феромагнетних матеріалах. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **3**, 142–147.
 9. Яворський І.М., Почапський Є.П., Воробель Р.А., Русин Б.П. (2018) Інформаційні технології неруйнівного контролю. Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довідн. пос. у 8-ми томах. Назарчук З.Т. (ред.). Т. 7. Львів, Простір-М.
 10. Почапський Є.П., Клим Б.П., Мельник Н.П. та ін. (2019) Оцінювання впливу механічних властивостей конструкційних феромагнетних матеріалів та їх зварних з'єднань на зміну параметрів магнетопружної акустичної емісії. *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, **2**, 7–12.
 11. Pochapskyi Ye.P., Melnyk N.P. (2019) Mathematical model and informative features of the signal of the magnetoelastic acoustic emission. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, **4**, 105–110.
 2. Skalskyi, V.R., Pochapskyi, Ye.P., Klym, B.P., Rudak, M.O. (2016) Application of the method of magnetoelastic acoustic emission for evaluation of technical condition of 19G steel after long-term operation in an oil pipeline. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **3**, 81–84 [in Ukrainian].
 3. Skalskyi, V.R., Pochapskyi, Ye.P., Klym, B.P., Rudak, M.O. (2016) Application of the method of magnetoelastic acoustic emission for control of stressed state of ferromagnetic structural elements. *Tekhnologicheskie Sistemy*, **2**, 67–69 [in Ukrainian].
 4. Skalskyi, V.R., Pochapskyi, Ye.P., Klym, B.P., Simakovych, O.G. (2014) Determination of the coordinates of acoustic emission sources in thin-walled objects of a cylindrical shape. *Vidbir i Obrobka Informatsii*, **41**, 55–62 [in Ukrainian].
 5. Skalskyi, V.R., Pochapskyi, Ye.P., Klym, B.P., Simakovych, O.G. (2015) Location of acoustic emission sources in thin-walled objects of a spherical shape. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **1**, 122–129 [in Ukrainian].
 6. Skalskyi, V.R., Pochapskyi, Ye.P., Klym, B.P., Koblan, I.M. (2016) Improvement of the effectiveness of excitation of signals of magnetoelastic acoustic emission. *Vidbir i Obrobka Informatsii*, **44** (120), 5–11 [in Ukrainian].
 7. Skalskyi, V.R., Pochapskyi, Ye.P., Klym, B.P. et al. (2016) Development of the concept of building a system for diagnosing products and structural elements by the parameters of magnetoelastic acoustic emission. In: *Proc. of 8th National Sci.-Techn. Conf. of Nondestructive Testing and Technical Diagnostics* (Kyiv, 22-24 November 2016), 249–254 [in Ukrainian].
 8. Pochapskyi, Ye.P., Melnyk, N.P., Koblan, I.M. (2018) Effect of excitation conditions on generation of magnetoelastic acoustic emission signals in ferromagnetic materials. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **3**, 142–147 [in Ukrainian].
 9. Yavorskyi, I.M., Pochapskyi, Ye.P., Vorobel, R.A., Rusyn, B.P. (2018) Information technologies of nondestructive testing. Technical diagnostics of materials and structures: Refer. book in 8 Vol. Ed. by Z.T. Nazarchuk., Vol. 7, Lviv, Prostir-M [in Ukrainian].
 10. Pochapskyi, Ye.P., Klym, B.P., Melnyk, N.P. et al. (2019) Assessment of the influence of mechanical properties of structural ferromagnetic materials and their welded joints on the change of parameters of magnetoelastic acoustic emission. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 7–12 [in Ukrainian].
 11. Pochapskyi, Ye.P., Melnyk, N.P. (2019) Mathematical model and informative features of the signal of the magnetoelastic acoustic emission. *Scientific J. of the Ternopil National Technical University*, **4**, 105–110.

References

PORTABLE MEANS FOR DIAGNOSTICS OF PRODUCTS AND ELEMENTS OF STRUCTURES BY THE PARAMETERS OF ELASTIC WAVES OF DIFFERENT NATURE

Ye.P. Pochapskyi, B.P. Klym, N.P. Melnyk, Ya.D. Tolopko, P.M. Dolyshnii, P.P. Velykyi

G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: pochapskyi@ipm.lviv.ua

The paper presents the results of development of portable means for diagnostics of products and structural elements by the parameters of elastic waves of different nature. Structures of multichannel acoustic-emission and magnetoacoustic diagnostic systems were developed. System realization in the form of stacked block structures was substantiated. Design of a mobile device for moving the put-on magnet of the magnetoacoustic system is proposed. System and information software for magnetoacoustic and multichannel acoustic-emission portable systems was developed. A procedure is proposed for evaluation of the stressed state of ferromagnetic structural elements by the parameters of the signal of magnetoelastic acoustic emission. Procedures for controlling the metrological characteristics of the developed systems were elaborated. Acoustic emission and magnetoacoustic inspection of pressure vessels and pipeline sections and equipment of oil and gas complex of Ukraine in Lviv and Ivano-Frankivsk regions was performed. 11 Ref., 6 Fig.

Keywords: nondestructive testing, acoustic emission, magnetoelastic acoustic emission, multichannel acoustic-emission system, magnetoacoustic system, software, signal processing algorithms, evaluation of stress-strain state of ferromagnetic structural elements, control of metrological characteristics

Надійшла до редакції 13.07.2020