УДК 620.179.16

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ ДЕФЕКТІВ ТА ЇХ ПОЛОЖЕННЯ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМУ КОНТРОЛІ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧНОГО ТА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Бабак В.П., член-кореспондент НАН України, **Богачев І.В.**, канд. техн. наук,
Хайдуров В.В., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2020.11>

Побудовано й реалізовано математичні моделі процесів, за допомогою яких визначено вплив розмірів дефектів в однорідних твердих поверхнях тіл на проходження сигналу через них за критерієм зміни амплітуди одержаного сигналу та його частоти. Проведено порівняння із результатами для об'єктів без дефектів.

Построено и реализовано математические модели процессов, с помощью которых определено влияние размеров дефектов в однородных твердых поверхностях тел на прохождение сигнала через них по критерию изменения амплитуды полученного сигнала и его частоты. Проведено сравнение с результатами для объектов без дефектов.

Mathematical models of the processes have been built and implemented, with the help of which the influence of the size of defects in homogeneous solid surfaces of bodies on the passage of a signal through them is determined by the criterion of changing the amplitude of the received signal and its frequency. A comparison is made with the results for objects without defects.

Бібліографія 8, рис. 5.

Ключові слова: хвильовий процес, дефект у вигляді тріщини, ультразвукова діагностика, математичне і комп'ютерне моделювання.

x_i – просторова координата під номером i ;
 $\bar{\mathbf{x}}$ – вектор просторових координат;
 t – час;
 U – шуканий розв'язок моделі;

v – швидкість поширення звуку в середовищі;
 T_{fin} – кінцевий час досліджень;
 γ – коефіцієнт затухання хвилі у конкретному середовищі.

Аналіз останніх досліджень. На сьогоднішній день існує досить багато методів дослідження цілісності різних деталей об'єктів теплоенергетики. Кожен із цих методів має низку недоліків і переваг. Одним із найактуальніших є метод ультразвукової діагностики [1–5]. Такий метод дослідження є досить дешевим порівняно з іншими відомими та дає достатньо надійні результати дослідження. Метод не має вимог до форми досліджуваного об'єкту або його однорідності тощо. Ультразвуковий метод є одним із багатьох видів дослідження, які застосовують в теплоенергетиці, металургії, авіації та ін. До таких видів відноситься магнітний та рентгенівський методи. Всі ці методи дають можливість отримати дані про внутрішню структуру деталей та їх елементів, які не можна отримати іншими методами.

Технічна постановка завдання. Необхідно побудувати й реалізувати математичні моделі, за допомогою яких можна отримувати дані про вплив дефектів типу тріщини об'єктів, за допомогою яких визначається амплітуда і частота сигналу, який отримано після про-

ходження через такі дефекти [4]. За допомогою побудованих моделей на основі обчислювальних експериментів визначити вплив положення дефекту відносно джерела збудження коливань та приймача, які знаходяться по різні боки відносно цього дефекту. Також за допомогою обчислювальних експериментів встановити графічну залежність між розмірами дефектів та рівнем сигналу, який отримується в результаті проходження через такі дефекти залежно також від їх положення.

Математична постановка завдання. Для вирішення проблеми визначення впливу дефектів на формування вихідного сигналу береться класичне хвильове рівняння для однорідних поверхонь областей. Розглядається рівняння в області $G \subset \mathbb{R}^n$:

$$\frac{\partial^2 U(\bar{\mathbf{x}}, t)}{\partial t^2} = v^2 \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 U(\bar{\mathbf{x}}, t)}{\partial x_i^2} + \gamma \sum_{i=1}^n \frac{\partial U(\bar{\mathbf{x}}, t)}{\partial x_i} + f(\bar{\mathbf{x}}, t), \quad (1)$$

де $t \in [0, T_{fin}]$; $x_i \in [a_i, b_i]$; $a_i \in \mathbb{R}$; $b_i \in \mathbb{R}$;

$$G = [a_1, b_1] \times [a_2, b_2] \times \dots \times [a_n, b_n]; i = 1, n.$$

Початкові умови мають вигляд:

$$U(\bar{\mathbf{x}}, 0) = g_1(\bar{\mathbf{x}}), U_t(\bar{\mathbf{x}}, 0) = g_2(\bar{\mathbf{x}}).$$

Граничні умови задаються в залежності від постановки задачі (що відповідає конкретному фізичному процесу).

Математична модель (1) описує процес поширення хвиль у об'єкті без дефектів. Далі у роботі містяться обчислювальні експерименти, які полягають у математичному та комп'ютерному моделюванні проходження звукових хвиль в об'єктах, що містять дефекти у вигляді тріщин. Усі обчислювальні експерименти проведені у прикладному програмному пакеті COMSOL Multiphysics, результати моделювання якого експортовані до системи комп'ютерної математики MATLAB з метою отримання деталізованих результатів обчислень та їх порівняння між собою [6–8].

Обчислювальні експерименти. Для моделювання поведінки проходження сигналу через дефект передбачається створення штучного точкового збудника коливань та приймача сигналу, які знаходяться по різні сторони відносно дефекту. Такий підхід моделювання дає змогу відповісти на одне з основних запитань дослідження – вплив розмірів дефекту на проходження сигналу через нього. У такому випадку визначаються амплітуда й частота отриманого сигналу. Розглядається лінійне хвильове (1) рівняння в області $\Omega: (x, y) \in [-0,5; 0,5]^2, t \in [0; 1]$, яке має вигляд:

$$\partial^2 U / \partial t^2 = \partial^2 U / \partial x^2 + \partial^2 U / \partial y^2. \quad (2)$$

Відповідні початкові умови у (2) для проведення обчислювальних експериментів мають вигляд:

$$U(x, y, 0) = U_t(x, y, 0) = 0. \quad (3)$$

Вибір умов (3) обумовлений тим, що досліджуваний об'єкт знаходиться в стані спокою. Граничні умови для проведення моделювання представлені так:

$$\partial U / \partial \bar{\mathbf{n}}|_{\Gamma} = 0. \quad (4)$$

Граничні умови виду (4) враховують той факт, що при досяганні хвилі до границі розрахункової області досліджуваного об'єкта враховується її відбиття від цієї границі.

Область дефекту записується у вигляді декартового добутку:

$$G = [-0,5 \cdot 10^{-3}; 0,5 \cdot 10^{-3}] \times [-0,15; 0,15]. \quad (5)$$

У точці з координатами $(x; y) = (0, 2; 0)$ знаходиться збудник гармонійних коливань. Він подається у вигляді синусоїди так:

$$U(0, 2; 0; t) = 30^{-1} \sin 16\pi t, t > 0. \quad (6)$$

Граничні умови для дефекту задаються аналогічні (4) та мають вигляд:

$$\partial U / \partial \bar{\mathbf{n}}|_{\Gamma_2} = 0. \quad (7)$$

Обчислювальні результати (2)–(4), (6), (7) для тріщини, яка знаходиться у положенні (5) наведені нижче.

Друга математична модель аналогічна моделі (2)–(4), (6), (7) за виключенням області розміщення дефекту. Його положення задається у такому вигляді:

$$G = \left\{ \begin{array}{l} (x_s; y_s) | (x_s; y_s) = (x; y) \cdot M, \\ x \in [-0,5 \cdot 10^{-3}; 0,5 \cdot 10^{-3}], \\ y \in [-0,15; 0,15], M = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}, \varphi = \frac{\pi}{4} \end{array} \right\}. \quad (8)$$

Обчислювальні результати (2)–(4), (6), (7) для тріщини, яка знаходиться у положенні (8) також наведені нижче.

Контурні графіки (лінії рівня), які зображені на рисунку 1 показують, що при проходженні ультразвукового сигналу через будь-які завади, такі як тріщини, утворюються розриви. Основні фрагменти розриву у прийнятому сигналі також детально показані на рисунку 2.

Слід зазначити, що прояви дефектів найпомітніші у випадку їх положення, яке перпендикулярне до лінії, що з'єднує джерело (збудник коливань) та приймач.

У будь-якому випадку, навіть незначні дефекти на поверхні матеріалу відразу є помітними. Це означає, що питання виявлення факту існування дефекту розкрито. Щодо розмірів дефекту, слід зазначити, що потрібно проводити додаткові дослідження засобами комп'ютерного моделювання.

Рис. 1. Визначення хвильового поля на поверхні тіл з дефектами у вигляді тріщин: (а) – дефект має вертикальне положення (5); (б) – дефект знаходиться під кутом 45° до горизонталі (8).

Рис. 2. Порівняння сигналу, який проходить через тріщину: (а) – яка має вертикальне положення (5); (б) – знаходиться під кутом 45° до горизонталі (8).

Згідно результатів математичного комп'ютерного моделювання видно, що відбувається суттєва зміна амплітуди прийнятого сигналу. Це факт також демонструють результати обчислювального експерименту, що зображені на рисунку 3.

Як було вже зазначено раніше, цікавим завданням є визначення впливу розмірів тріщини на природу

прийнятого сигналу при проходженні через неї. Для цього проводиться низка обчислювальних експериментів, яка показує вплив довжини дефекту типу тріщини на амплітуду й частоту прийнятого сигналу, що пройшов через цей дефект.

На рисунку 4 показані основні результати цих експериментів для положення тріщини (5) та положення (8).

Рис. 3. Графічне представлення сигналу в точці $(-0, 3, 0)$ протягом часу $t \in [0; 1]$ при проходженні через дефекти типу тріщини, що задаються у вигляді (5), (8) та без дефекту.

Рис. 4. Вплив розмірів дефекту типу тріщини на пройдений через нього сигнал.

Висновки. У ході проведення дослідження впливу розмірів та положення дефекту одержано експериментальним шляхом закономірності, що прослідковуються при проходженні ультразвукових хвиль (методом розсіювання) в об'єктах, що містять дефекти типу тріщини. Встановлено, що при проходженні звукових хвиль через тріщини помітно зменшується амплітуда отриманого сигналу порівняно з початковим, який здійснює збудник. Також при проходженні звукових хвиль через деформовані об'єкти зменшується частота коливань, і, очевидно, отриманий сигнал має вже нелінійну складову, яка утворилась при проходженні через хоча б один дефект.

Результати даних досліджень можуть бути використані у дослідженні композитних елементів деталей різних устаткувань, що містять помітну неоднорідність у елементах цих матеріалів.

Стаття підготовлена в результаті виконання НДР в рамках цільової програми наукових досліджень НАН України «Ресурс».

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Применение ультразвука* высокой интенсивности в промышленности В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов. Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. 2010. - 203 с.
2. Babak V.P., Bogachev I. A. Small aperture magnetostrictive sensors for non-destructive testing / Scientific Proceedings, № 1(156), 2016. - "NDT days 2016", Sozopol, Bulgaria. – P. 104-106.
3. *Апаратно-програмне забезпечення моніторингу об'єктів генерування, транспортування та споживання теплової енергії*: Монографія /В.П. Бабак, В.С. Берегун, З.А. Бурова та ін.; за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака / – К.: ІТТФ НАН України, 2016. – 298 с. http://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2016/01/monografija-24.10.2016_kor.pdf
4. Ерофеев В.А., Миллер С.С. Ультразвуковой мониторинг микродефектов в металле. Журнал «Известия Тульского государственного университета», технические науки, машиностроение и машиноведение. 2014. - С. 211–217.
5. Babak V.P., Babak S.V., Myslovych M.V., Zaporozhets A.O., Zvaritch V.M. (2020) Diagnostic Systems for Energy Equipments. Studies in Systems, Decision and Control, vol 281. Springer, Cham <https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3>
6. Comsol News. Специальное издание. 2017. https://cdn.comsol.com/resources/pdf-offers/COMSOL_News_2017_Acoustics_RU.pdf
7. Васильев А.Н. Matlab. Практический подход. М.: Наука и техника. 2015. - 448 с.
8. Matlab - Modelling, Programming and Simulations edited by Emilson Pereira Leite. SCIYO. 2010. - 442 p.

DETERMINATION OF DEFECTS SIZES AND THEIR POSITION DURING ULTRASONIC CONTROL BY METHODS OF MATHEMATICAL AND COMPUTER SIMULATION

Babak V.P., Bogachev I.V., Khaidurov V.V.

Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Kapnist str., Kyiv 03680, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2020.11>

The use of sound waves to study the integrity of various metal structures is the most relevant method. The relevance is traced, in particular, in the ease of conducting such experiments, as well as its cheapness. The design of various parts requires the use of modern computer technology, which, using a mathematical apparatus that describes the process, allows you to determine the actual characteristics of the material to determine durability. This approach makes it possible to effectively create design solutions in order to create new parts and upgrade existing materials to extend their service life.

The purpose of this work is to build mathematical models of homogeneous wave processes and their analysis in the form of computational experiments to control the passage of sound signals through the surface of the studied materials of objects. This approach is used to determine the influence of geometric parameters of defects in the form of cracks through which the signal passes, on its characteristics, which it describes after passing through these defects to the signal receiver, in particular, is the amplitude and frequency. For computational experiments, a point exciter of harmonic oscillations and a point receiver were chosen, which are located on different sides relative to the defect of a simple geometric shape. It should be noted that even minor defects affect the amplitude of the received signal, which passed through such defects. When a signal passes through defects of a simple geometric shape, the amplitude of such a signal decreases by 5–8 times and the average frequency decreases by 2–3 times.

References 8, figures 5.

Key words: wave process, crack defect, ultrasound diagnostics, mathematical and computer modeling.

1 *Application of high-intensity ultrasound in industry* V.N. Khmelev, A.N. Slivin, R.V. Barsukov, S.N. Tsyganok, A.V. Shalunov. Alt. state tech. un-t, BTI. Biysk: Publishing house Alt. state tech. un-t, 2010, 203 p.

2. Babak V.P., Bogachev I. A. Small aperture magnetostrictive sensors for non-destructive testing / Scientific Proceedings, № 1(156), 2016. "NDT days 2016", Sozopol, Bulgaria, P. 104–106.

3. *Hardware and software for monitoring objects of generation, transportation and consumption of thermal energy: Monograph* / V.P. Babak, V.S. Beregun, S.A. Burova and others. Edited by Corresponding Member NAS of Ukraine V.P. Babak / - K.: Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2016, 298 p.

4. Erofeev V.A., Miller S.S. Ultrasonic monitoring of microdefects in metal. The journal "Izvestia of the Tula State University", technical sciences, mechanical engineering. 2014, P. 211–217.

5. Babak V.P., Babak S.V., Myslovych M.V., Zaporozhets A.O., Zvaritch V.M. (2020) Diagnostic Systems for Energy Equipments. Studies in Systems, Decision and Control, vol 281. Springer, Cham <https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3>

6. *Comsol News*. Special edition. 2017. https://cdn.comsol.com/resources/pdf-offers/COMSOL_News_2017_Acoustics_RU.pdf

7. Vasiliev A.N. Matlab. A hands-on approach. M.: Science and technology. 2015, 448 p.

8. *Matlab – Modelling, Programming and Simulations* edited by Emilson Pereira Leite. SCIYO. 2010, 442 p.

Отримано 13.08.2020

Received 13.08.2020