

УДК 539.3:537.22

МАГНЕТОАКУСТИЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ФЕРОМАГНЕТИКІВ ІЗ ПЛОСКИМИ ТРІЩИНАМИ

О. Є. АНДРЕЙКІВ¹, В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ¹, Д. В. РУДАВСЬКИЙ¹,
О. М. СЕРГІЄНКО¹, Ю. Я. МАТВІЙ²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Луцький національний технічний університет

Запропоновано новий неруйнівний метод магнетної діагностики феромагнетних тонкостінних конструкцій, що ґрунтується на оцінці сигналів акустичної емісії. Знайдено розподіл магнетного поля у феромагнетному півпросторі, що утворене магнетним диполем, розмішеним над поверхнею цього півпростору. Побудовано діаграми залежності коефіцієнта інтенсивності напружень для дископодібної тріщини від її розташування у матеріалі.

Ключові слова: діагностика, плоска тріщина, магнетоакустична емісія, магнетне поле, феромагнетик.

Відомо, що сигнали акустичної емісії (АЕ) випромінюють дефекти, зокрема тріщиноподібні, які поширюються під впливом прикладених до елемента конструкції зусиль [1, 2]. Але, якщо їх рівень недостатньо високий, дефекти не розвиватимуться, а отже, не генеруватимуть сигнали АЕ, залишаючись не виявленими цим методом неруйнівного контролю. Тоді для їх розвитку потрібні більші зусилля. Однак у багатьох випадках під час експлуатації обладнання це недоцільно або навіть і небезпечно.

Для феромагнетних матеріалів існує спосіб локального збудження пружних хвиль АЕ магнетним полем, спричиненим зовнішнім джерелом. Тоді зовнішнє магнетне поле створюватиме концентрацію механічних напружень в околі дефекту, яку визначатиме коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) [3–7]. При цьому відбуваються стрибки Баркгаузена в околі тріщиноподібного дефекту та випромінюються сигнали магнетопружної акустичної емісії (МАЕ) [8–10]. Отже, поєднуючи зміну КІН, викликану прикладеним до феромагнетика зовнішнім магнетним полем, зі зміною параметрів МАЕ, можна робити висновок про пошкоджувальність феромагнетика. Розглянемо схему такого методу діагностування тонкостінного феромагнетного елемента конструкції.

Методика. Ураховуючи, що магнетне поле швидко зникає із віддаллю [11, 12], можна змоделювати досліджуваний елемент металоконструкції із плоскою поверхнею, до якої прикладено зовнішнє магнетне поле, феромагнетним півпростором із магнетним диполем, розмішеним над його поверхнею (рис. 1).

Вважатимемо, що такий елемент конструкції містить багато тріщин, розсіяних по його об'єму так, що мінімальна відстань між двома сусідніми тріщинами не менша за подвійний розмір найбільшої з них. За такого припущення, визначаючи напружено-деформований стан біля будь-якої тріщини, можна вважати її ізольованою від сусідніх. Вибираємо для діагностування найнебезпечнішу щодо орієнтації тріщину, тобто таку, площина якої розташована перпендикулярно до силових ліній створеного диполем магнетного поля (рис. 1). Приймаючи, що три-

Контактна особа: Д. В. РУДАВСЬКИЙ, e-mail: denrud@ipm.lviv.ua

щина знаходиться на достатній відстані від поверхні півпростору та близька в плані до кругової, можна визначити КІН для неї із розв'язку аналога задачі Сака за дії зовнішнього магнетного поля.

Вираз для КІН тут відомий [4, 5] та має вид

$$K_1 = -\frac{\chi \cdot (\chi - 2) \cdot b_c^2 \cdot [(1 + \chi)^2 + [2 \cdot (1 - \nu) + (5 - 6\nu) \cdot \chi] \cdot \chi \cdot b_c^2]}{2 \cdot (1 + \chi)^2 \cdot [2 \cdot (1 + \chi)^2 - \chi^2 \cdot b_c^2 \cdot [2\nu - 1 + 2 \cdot (1 - \nu) \cdot \chi]]} \cdot G \cdot \sqrt{a}, \quad (1)$$

де $b_c^2 = B_0^2 / (G \cdot \mu_0)$, B_0 – абсолютне значення вектора магнетної індукції прикладеного магнетного поля; ν – коефіцієнт Пуассона; G – модуль зсуву; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (N/A²) – магнетна стала; χ – магнетна проникність середовища; a – радіус тріщини.

Таким чином, для оцінки КІН необхідно визначити величину B_0 як функцію просторових координат x , y , z у феромагнетній області.

Визначення розподілу магнетного поля в магнетопровідному півпросторі, над межею якого розміщено магнетний диполь. Розглянемо задачу про визначення магнетного поля в магнетопровідному півпросторі, над межею якого на певній висоті h знаходиться магнетний диполь із магнетним дипольним моментом M_0 (рис. 2). Для оцінки розподілу величини B_0 у феромагнетному півпросторі необхідно розв'язати відповідну задачу магнетостатики. У праці [13] запропоновано ефективний підхід для її розв'язку, на основі якого отримано співвідношення для магнетного потенціалу у заповненому феромагнетиком півпросторі:

$$\varphi_2(x, y, z) = \frac{2\mu_1}{\mu_1 + \mu_2} \frac{M_0 \cos \theta}{x^2 + (y - h)^2 + z^2}, \quad (2)$$

де θ – кут між вектором магнетного моменту диполя та радіус-вектором до точки спостереження A (рис. 2).

Рис. 2. Схематичне зображення магнетного диполя та систем координат: I – повітря; II – феромагнетик.

Fig. 2. Schematic presentation of magnetic dipole and coordinate systems: I – air; II – ferromagnetic.

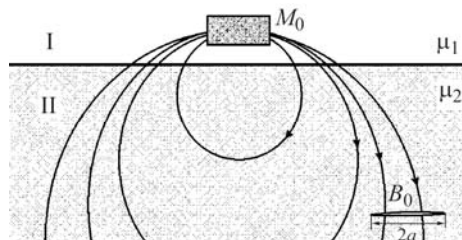
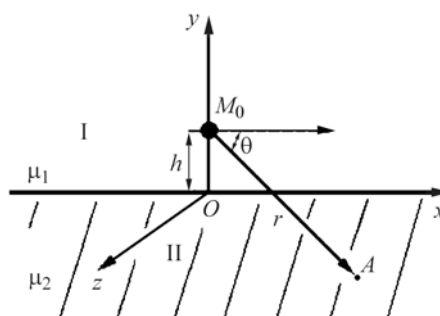


Рис. 1. Схема намагнетчування феромагнетної плити: I – повітря; II – феромагнетик.

Fig. 1. A scheme of a ferromagnetic plate magnetization: I – air; II – ferromagnetic.



Тоді за відомим співвідношенням магнетостатики для вектора магнетної індукції \mathbf{B}_0 маємо:

$$\mathbf{B}_0 = -\mu_i \cdot \text{grad } \varphi_i, \quad (3)$$

де i – номер підобласті ($i = 1$ – для повітря, $i = 2$ – для феромагнетика).

Таким чином, на основі співвідношень (2) та (3) вираз для проекції вектора \mathbf{B}_0 на вісь Oy в довільній точці A з координатами (x, y, z) феромагнетної області (рис. 2) запишемо так:

$$B_y(x, y, z) = 6M_0 \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \frac{x(y-h)}{[x^2 + (y-h)^2 + z^2]^{5/2}}. \quad (4)$$

Підставивши вираз для компоненти вектора B_y у співвідношення (1), отримаємо залежність КІН K_I як функцію просторових координат (x, y, z) розташування дископодібної тріщини у феромагнетному тілі.

Приклад розрахунку КІН, спричинених магнетним диполем у феромагнетній плиті. Запропонований метод апробовано під час розрахунку КІН, що виникають у феромагнетній плиті під дією магнетного поля від розміщеного над нею накладного електромагнета. Через невеликі розміри джерело зовнішнього магнетного поля можна змодельовати магнетним диполем із деяким визначеним значенням магнетного дипольного моменту M_0 .

Припускали, що дефект (дископодібна тріщина) знаходиться у площині $z = 0$ (рис. 2). Тоді у полярній системі координат $Or\theta$ вираз (4) для розподілу величини B_y у феромагнетній півплощині набуде вигляду

$$B_y(r, \theta) = -3M_0 \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \frac{\sin 2\theta}{r^3}. \quad (5)$$

Дослідивши функцію (5) на точки екстремуму, виявили, що максимальних значень величина B_y набуває в напрямках $\theta_{\max} = \arccos(1/\sqrt{5})$ та $\pi - \arccos(1/\sqrt{5})$ (близько $63,4^\circ$ та $116,6^\circ$, відповідно) (рис. 3).

Побудовано (рис. 4) залежність КІН K_I дископодібної тріщини ($a = 5 \cdot 10^{-4}$ м) від глибини d її розташування у феромагнетній плиті для різних значень напрямку кута θ до точки спостереження.

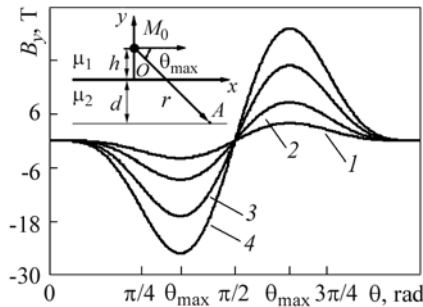


Рис. 3. Fig. 3.

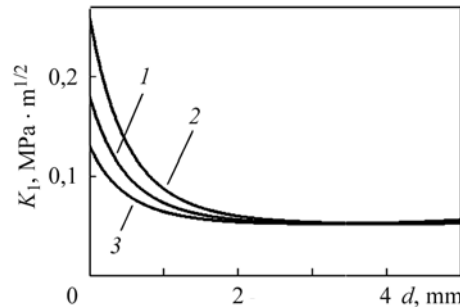


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 3. Розподіл величини B_y на лініях, паралельних поверхні феромагнетної півплощини, для різної глибини d їх розташування: 1 – 10 мм; 2 – 7; 3 – 5; 4 – 4 мм.

Fig. 3. Value B_y distribution on lines which are parallel to the feromagnatic semi-plane surface for their various location depth, d : 1 – 10 mm; 2 – 7; 3 – 5; 4 – 4 mm.

Рис. 4. Зміна КІН K_I дископодібної тріщини із глибиною d її розташування для різних значень напрямку кута θ до точки спостереження: 1 – $5\pi/12$; 2 – θ_{\max} ; 3 – $\pi/4$.

Fig. 4. Variation of SIF K_I , for a penny-shaped crack with depth, d , of its location for various values of angle θ to the observation point: 1 – $5\pi/12$; 2 – θ_{\max} ; 3 – $\pi/4$.

Вважали: $M_0 = 4,0 \text{ A} \cdot \text{m}^2$; $\chi = 10^4$; $\mu_1 = \mu_0$; $\mu_2 = \mu_1 \cdot (\chi + 1)$; $G = 62,7 \cdot 10^9 \text{ Pa}$; $\nu = 0,3$; $h = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Як бачимо, найбільших значень K_I набуває у напрямку дії максимальних значень індукції магнетного поля B_y .

Виходячи з викладеного вище, пропонуємо нову методику неруйнівного контролю феромагнетних елементів конструкцій, яка полягає ось у чому. За допомогою первинних перетворювачів сигналів АЕ, розташованих на поверхні фе-

ромагнетного тіла із тріщиноподібними дефектами, реєструють АЕ, спричинену магнетним полем від зовнішнього джерела. Поля механічних напружень, які виникають внаслідок цього і концентрація яких є максимальна в околі дефекту, сприяють раптовим змінам доменної структури області тріщиноподібного дефекту. Визначивши за сигналами МАЕ значення КІН біля цього дефекту, можна на основі співвідношення (1) оцінити його розмір і ризик руйнування усього елемента конструкції з тріщиною.

ВИСНОВКИ

Прикладене зовнішнє магнетне поле у ферромагнетному матеріалі створює біля вершини тріщини концентрацію механічних напружень, коефіцієнт інтенсивності яких можна визначити за аналітичними залежностями. Оскільки параметри сигналів МАЕ пов'язані із КІН, то за їх зміною можна побудувати методику оцінки ризику руйнування ферромагнетного матеріалу із тріщиноподібними дефектами.

РЕЗЮМЕ. Предложен новый неразрушающий метод магнитной диагностики ферромагнитных тонкостенных конструкций, основанный на оценке сигналов акустической эмиссии. Найдено распределение магнитного поля, образованного в ферромагнитном полупространстве магнитным диполем, находящимся над поверхностью этого полупространства. Построены диаграммы зависимости КИН для дискообразной трещины от ее расположения в материале.

SUMMARY. Based on estimation of acoustic emission signals the effective new nondestructive method of magnetic diagnostics of thin-wall ferromagnetic structures is proposed. A magnetic field distribution in a ferromagnetic semi-space caused by a magnetic dipole, located under the semi-space surface has been found. Diagrams of dependence of the stress intensity factor for a penny-shaped crack tip on the crack location in the material have been built.

1. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. пос.: у 3-х т. – К.: Наук. думка, 2009. – 877 с.
2. Дробот Ю. Б., Лазарев А. М. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 128 с.
3. Pao Y.-H. and Yeh C.-S. A linear theory for soft ferromagnetic elastic solids // Int. J. Eng. Sci. – 1973. – **11**. – P. 415–436.
4. Shindo Y. Magnetoelastic interaction of a soft ferromagnetic elastic solid with a penny-shaped crack in a constant axial magnetic field. Trans // ASME: J. Appl. Mech. – 1978. – **45**. – P. 291–296.
5. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. – К.: Наук. думка, 1988. – Т. 1: Основы механики разрушения / В. В. Панасюк, А. Е. Андрейкив, В. З. Партон. – 488 с.
6. Shindo Y. Singular stresses in a soft ferromagnetic solid with a flat annular crack // Acta Mech. – 1983. – **50**. – P. 50–56.
7. Bagdasarian G. Y. and Hasanyan D. J. Magnetoelastic interaction between soft ferromagnetic elastic half-plane with a crack and a constant magnetic field // Int. J. Solids Struct. – 2000. – **37**. – P. 5371–5383.
8. Бартенев О. А., Хамитов В. А., Горкунов Э. С. Акустическая эмиссия при динамической магнестрикции в эффекте Баркгаузена // Сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики. – Калинин: Изд-во КГУ, 1981. – С. 132–140.
9. Бартенев О. А., Хамитов В. А., Горкунов Э. С. Способ наблюдения скачков Баркгаузена по излучению звука // Приборы и техника эксперимента. – 1984. – № 1. – С. 187–189.
10. Kameda J. and Ranjan R. Nondestructive evaluation of steels using acoustic and magnetic Barkhausen signals. – I. Effect of carbide precipitation and hardness // Acta Met. – 1987. – **35**, № 7. – P. 1515–1526.
11. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества. – М.: Мир, 1983. – 302 с.
12. Неразрушающий контроль: Справ.: в 8-ми т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – Т. 6; Кн. 1: В. В. Клюев, В. Ф. Мужижкий, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. – М.: Машиностроение, 2006. – 848 с.
13. Сапожников А. Б. Теоретические основы электромагнитной дефектоскопии металлических тел. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1980. – Т. 1. – 308 с.

Одержано 19.05.2010