

УДК 620.179.17

ВПЛИВ УМОВ ЗБУДЖЕННЯ НА ГЕНЕРУВАННЯ СИГНАЛІВ МАГНЕТОПРУЖНОЇ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ У ФЕРОМАГНЕТНИХ МАТЕРІАЛАХ

Є. П. ПОЧАПСЬКИЙ, Н. П. МЕЛЬНИК, І. М. КОБЛАН

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

Досліджено вплив амплітуди індукції перемагнечувального поля, товщини немагнетного прошарку між накладним електромагнетом і поверхнею пластинчастих феромагнетних зразків (виготовлених з ніколу та сталі Ст.3) та їх товщини на параметри сигналів магнетопружної акустичної емісії (МАЕ). Експериментально підтверджено вплив цих чинників на форму огиначних та суму амплітуд сигналу МАЕ. Встановлено, що тривалість генерування сигналів МАЕ зменшується з ростом амплітуди індукції поля і зростає зі збільшенням товщин немагнетного прошарку та зразків.

Ключові слова: *феромагнетний матеріал, доменна стінка, поле перемагнечення, магнетопружна акустична емісія, інформаційні параметри сигналу.*

Для надійного використання та визначення реальної дефектності конструкцій, що експлуатуються під великим навантаженням, необхідно постійно контролювати їх технічний стан. Серед сучасних методів неруйнівного контролю виробів, елементів конструкцій, обладнання більшості галузей промисловості перспективний метод магнетопружної акустичної емісії (МАЕ), який поєднує два фізичні принципи: перемагнечення зовнішнім магнетним полем і реєстрацію пружних хвиль, які виникають під час стрибкоподібного переміщення доменних стінок у феромагнетику. Він дає можливість діагностувати об'єкт по усій товщині без додаткового механічного навантаження, яке може спричинити його руйнування [1].

Оскільки сигнал МАЕ є багатопараметровим, можна виділити параметри, які несуть інформацію про стан досліджуваного феромагнетного об'єкта: сума амплітуд та підсумковий рахунок сигналу (кількість імпульсів, що перевищують заданий поріг), максимальне значення амплітуди, енергія сигналу, огиначна сигналу та положення її максимуму, спектр сигналу (ширина, медіана) [2]. Вони чутливі до структурних змін феромагнетного матеріалу, режиму термообробки, пластичної деформації, залишкових напружень, наводнювання тощо. Здеградований матеріал змінює свою доменну структуру, що впливає на параметри МАЕ [3, 4]. Експериментально виявлено, що найбільше змінює потужність МАЕ пластичне деформування матеріалу, а дещо менше – водень, вплив якого визначає концентрація у феромагнетику [5].

З іншого боку, генерування сигналу МАЕ залежить від параметрів перемагнечувального поля (амплітуди напруженості, частоти та форми сигналу), а також від форми та розмірів перемагнечувальних об'єктів, конструкції (соленоїд, накладний електромагнет) та розміщення джерела поля [2]. Тому метод МАЕ доцільно використовувати для діагностування феромагнетних елементів конструкцій, врахувати вплив на сигнал не тільки структури феромагнетного матеріалу, а й експериментальних чинників.

Мета дослідження – вивчити особливості впливу на параметри сигналу МАЕ амплітуди індукції перемагнечувального поля, товщини немагнетного прошарку між накладним електромагнетом і поверхнею зразка та товщини зразка.

Залежність форми оригінальної та тривалості сигналів МАЕ від амплітуди індукції поля перемагнечення. Закономірності намагнечення феромагнетного матеріалу графічно подають у вигляді кривої намагнечення, що описує залежність амплітуди індукції B від напруженості H магнетного поля. За циклічної зміни зовнішнього магнетного поля одержують симетричну петлю гістерезису. Петлю, для якої досягається стан технічного насичення, називають граничною, всі інші, які знаходяться всередині – частинними [1].

Досліджували пластинчасті зразки з ніколу та сталі Ст.3 завтовшки 1; 2 та 5 mm. Перемагнечували сигналом синусоїдальної форми з частотою 9 Hz, використовуючи накладний електромагнет [6], для декількох значень амплітуди індукції магнетного поля, яким відповідають декілька частинних петель гістерезису.

Встановили вплив амплітуди індукції поля перемагнечення B на параметри згенерованих сигналів МАЕ. На рис. 1 наведені оригінальні сигнали МАЕ для зразків з ніколу та сталі Ст.3, зареєстровані для висхідної гілки петлі перемагнечення. Оригінальні МАЕ для нікелового зразка мають один пік, який зі зростанням параметра B стає вужчим та збільшується за амплітудою, а для сталевих – два піки, амплітуда яких зі збільшенням значень B зростає, а розташовані вони ближче один до одного через зменшення тривалості сигналів МАЕ.

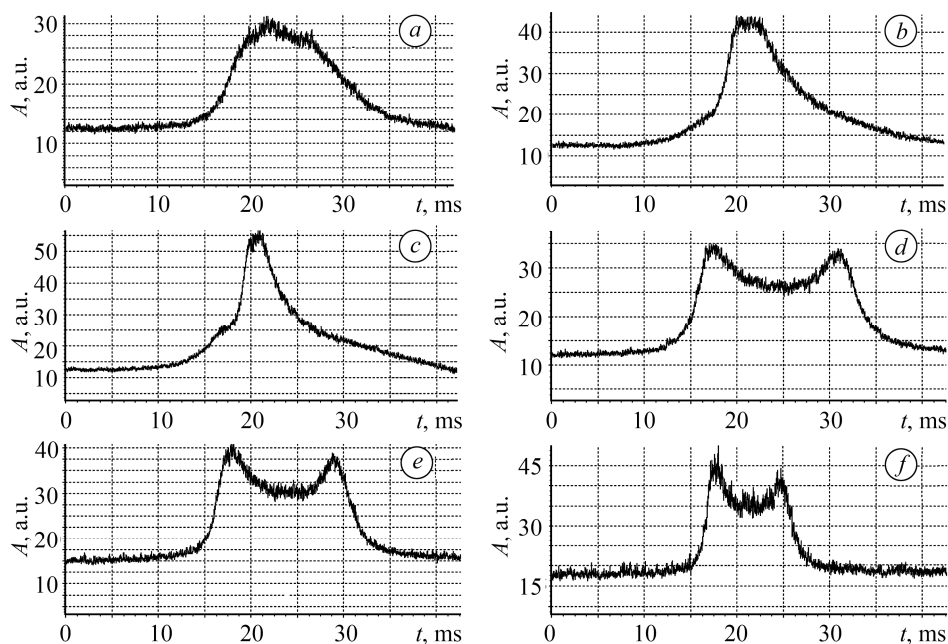


Рис. 1. Оригінальні сигнали МАЕ: *a-c* – нікелова пластина ($B = 0,297$ T; 0,480; 0,600); *d-f* – сталева ($B = 0,720$ T; 1,220; 1,840).

Fig. 1. Profiles of magneto-elastic acoustic emission (MAE) signals: *a-c* – nickel plate ($B = 0.297$ T; 0.480; 0.600); *d-f* – steel ($B = 0.720$ T; 1.220; 1.840).

Для обох зразків зі збільшенням амплітуди індукції поля перемагнечення тривалість сигналів МАЕ зменшується (рис. 2*a, b*), а сума їх амплітуд практично лінійно збільшується. Це пояснюють тим, що зі збільшенням амплітуди індукції поля підвищується швидкість його зміни під час перемагнечення феромагнетного матеріалу, а отже, зростає інтенсивність стрибків доменних стінок.

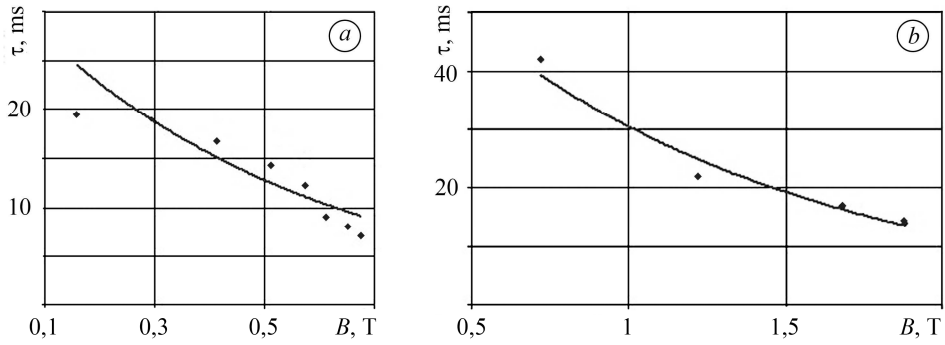


Рис. 2. Залежності тривалості сигналів МАЕ τ від амплітуди індукції поля перемагнення B : a – нікелова пластина; b – сталеві.

Fig. 2. Dependence of the MAE signals duration τ on the induction amplitude of the remagnetization field B : a – nickel plate; b – steel.

Залежність форми оригінальної та тривалості сигналів МАЕ від товщини немагнетного прошарку. Вивчали вплив товщини немагнетного прошарку між поверхнею досліджуваних зразків та ніжками магнетопроводу накладного електромагнета на форму оригінальних сигналів МАЕ та їхню тривалість. Немагнетний прошарок зумовлює поля розсіювання та розмагнення [7], внаслідок чого петля намагнення стає похилішою, ніж істинна крива намагнення матеріалу. Це спричинено тим, що насправді внутрішнє поле в матеріалі (ефективне поле H_i) буде меншим, ніж зовнішнє H_e , через появу поля розмагнення H_r , викликаного магнетними полюсами:

$$H_i = H_e - H_r = H_e - NJ. \quad (1)$$

Тут N – коефіцієнт розмагнення; J – намагненість зразка.

Для нікелових зразків за відсутності розмагнечувального поля піки активності МАЕ в околі “колін” петлі гістерезису та коерцитивного поля розташовані дуже близько, тому на оригінальних формується один суцільний пік. З ростом товщини немагнетного прошарку поле розмагнення збільшує тривалість сигналів МАЕ та зменшує їх амплітуду за сталої магнетної індукції зовнішнього поля перемагнення (рис. 3а).

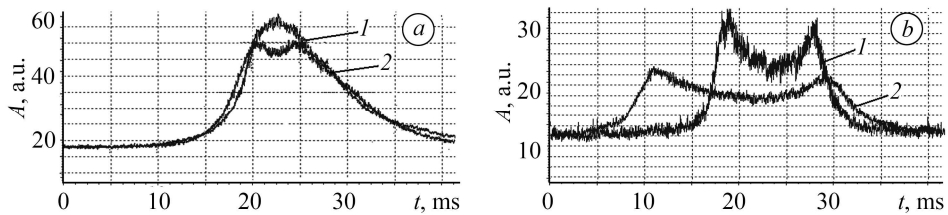


Рис. 3. Оригінальні сигнали МАЕ для нікелової (a) та сталеві (b) пластин: $1, 2 - l = 0,05$ і $4,7$ mm; $a, b - B = 0,480$ і $1,680$ T.

Fig. 3. MAE profiles of the signals for nickel (a) and steel (b) plates: $1, 2 - l = 0.05$ and 4.7 mm; $a, b - B = 0.480$ and 1.680 T.

Оригінальні МАЕ для сталі мають два піки, амплітуда яких зі збільшенням товщини прошарку зменшується, а вони віддаляються один від одного, тобто тривалість сигналів магнетопружної акустичної емісії зростає (рис. 3б). Їх появу можна пояснити непостійністю швидкості зміни зовнішнього поля перемагнення dH/dt , що потребує додаткових досліджень у широких діапазонах частот пере-

магнетичення [8]. Використовуючи метод МАЕ, доцільно контролювати швидкість поля перемагнетичення, а також його форму, оскільки піки оригінальних МАЕ можуть зумовлювати як різні магнетні фази у матеріалі, так і специфічна форма dH/dt . Найоптимальніше перемагнетичувати з постійною швидкістю поля, що технічно складно.

Експериментально підтверджено, що за сталого значення індукції поля перемагнетичення та зі збільшенням значень полів розмагнетичення (товщини прошарку) тривалість сигналів МАЕ зростає і для ніколу, і для сталі (рис. 4а). Виявили також, що сума амплітуд сигналів МАЕ практично лінійно зменшується з ростом товщини немагнетного прошарку (рис. 4б).

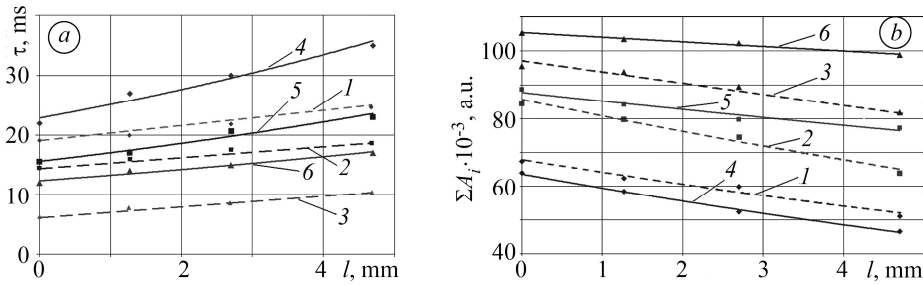


Рис. 4. Залежності тривалості τ (а) та суми амплітуд сигналів МАЕ (б) від товщини немагнетного прошарку для нікелової (крива 1 – $B = 0,297$ Т; 2 – 0,480; 3 – 0,600) та сталевій (крива 4 – $B = 0,720$ Т; 5 – 1,220; 6 – 1,840) пластин.

Fig. 4. Dependence of the MAE signals duration τ (a) and of the MAE signals amplitudes sum (b) on the thickness of the nonmagnetic interlayer for nickel (curve 1 – $B = 0.297$ T; 2 – 0.480; 3 – 0.600) and steel plates (curve 4 – $B = 0.720$ T; 5 – 1.220; 6 – 1.840).

Залежність форми оригінальної та тривалості сигналу МАЕ від товщини досліджуваного феромагнетного зразка. Вивчали особливості оригінальної МАЕ для зразків з ніколу та сталі Ст.3 товщиною 1; 2 і 5 mm за постійних значень поля розмагнетичення та магнетної індукції (для ніколу $B = 0,480$ Т; для сталі – 1,840 Т).

Амплітуда сигналів МАЕ зростає зі збільшенням товщини обох зразків (рис. 5). Також зауважили розділення на оригінальні піки сигналів МАЕ та суттєве збільшення їх тривалості, що можна пояснити зростаючим впливом вихрових струмів, що виникають у провідниках за зміни в часі магнетного потоку та спричиняють фазові зсуви. Зі зменшенням товщини зразків розділення піків проявляється чітко та виразно. Це пов'язано з тим, що практично усі ділянки зразків знаходяться в однаковій фазі перемагнетичення. Товстшим властивий більший зсув за фазою перемагнетичувального поля для глибших шарів феромагнетного матеріалу [9, 10].

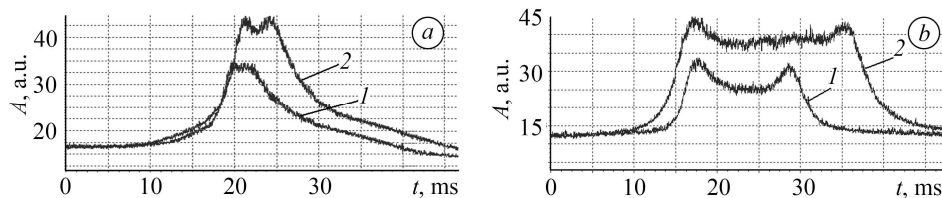


Рис. 5. Оригінальні сигнали МАЕ для нікелової (а) та сталевій (б) пластин: 1, 2 – $h = 1$ і 2 mm, а, б – $B = 0,480$ і 1,840 Т.

Fig. 5. MAE profiles of the signals for nickel (a) and steel (b) plates: 1, 2 – $h = 1$ and 2 mm, а, б – $B = 0.480$ and 1.680 Т.

Виявили, що зі збільшенням товщини зразків за сталого значення індукції поля перемагнення тривалість сигналів МАЕ зростає (рис. 6).

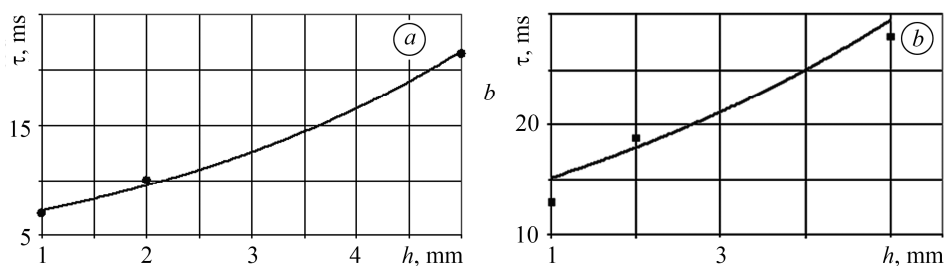


Рис. 6. Залежності тривалості сигналів МАЕ τ від товщини h нікелової (а) та сталеві (b) пластин: а, b – $B = 0,480$ і $1,840$ Т.

Fig. 6. Dependence of the MAE signals duration τ on the thickness h of nickel (a) and steel (b) plates: a, b – $B = 0.480$ and 1.840 T.

Отже, сума амплітуд сигналів МАЕ практично лінійно збільшується з ростом товщини зразків за постійної амплітуди індукції поля перемагнення. Це пояснюють сумарним збільшенням джерел генерування сигналу (кількості не-180-градусних доменних стінок) через зростання об'єму області перемагнення [11]. Для порівнювальності результатів діагностування об'єктів з феромагнетних матеріалів методом МАЕ необхідно створювати однакові умови для кожного окремого діагностичного експерименту.

ВИСНОВКИ

Досліджено вплив експериментальних чинників на параметри сигналу МАЕ для пластинчастих феромагнетних зразків, виготовлених з нікелу та сталі Ст.3. Встановлено, що амплітуда індукції поля перемагнення, товщини немагнетного прошарку та зразка впливають на амплітуду, форму огиальної та тривалість сигналу МАЕ. Тривалість сигналу зменшується з підвищенням амплітуди індукції поля, проте збільшується із ростом товщини прошарку і досліджуваного зразка за сталої амплітуди індукції. Сума амплітуд сигналу зростає з підвищенням амплітуди поля чи товщини досліджуваного зразка за фіксованого значення поля та зменшується зі збільшенням товщини немагнетного прошарку.

РЕЗЮМЕ. Исследовано влияние амплитуды индукции перемагничиваемого поля, толщины немагнитной прослойки между приставным электромагнитом и поверхностью пластинчатых ферромагнитных образцов (изготовленных из никеля и стали Ст.3), их толщины на параметры сигнала магнитоупругой акустической эмиссии (МАЭ). Экспериментально подтверждено влияние этих параметров на форму огибающих и сумму амплитуд сигнала МАЭ. Установлено, что продолжительность генерирования сигналов МАЭ уменьшается с ростом амплитуды индукции поля и растет с увеличением толщин немагнитной прослойки и образцов.

SUMMARY. The influence of experimental factors: the amplitude of the induction of the magnetization field, the thickness of the nonmagnetic interlayer between the c-core electromagnet and the surface of the investigated sample, the thickness of the sample on the parameters of the magnetoelastic acoustic emission (MAE) signals for plate-like ferromagnetic samples (made of nickel and steel Ст.3) has been studied. The influence of these factors on the shape of the envelopes and the MAE signals amplitudes sum is experimentally confirmed. It was established that the duration of the MAE signal generation decreases with increasing amplitude of the field induction and grows with increasing thickness of the nonmagnetic interlayer and the tested samples thickness.

1. Назарчук З. Т., Андрейків О. С., Скальський В. Р. Оцінювання водневої деградації феромагнетиків у магнетному полі. – К.: Наук. думка, 2013. – 272 с.

2. Назарчук З. Т., Скальський В. Р., Почапський С. П. Технології відбору та опрацювання низькоенергетичних діагностичних сигналів. – К.: Наук. думка, 2014. – 304 с.
3. Ono K. and Shibata M. Magnetomechanical Acoustic Emission – a New Method of Nondestructive Stress Measurement // NDT Int. – 1981, October. – P. 227–234.
4. The effect of deformation on the parameters of magnetoacoustic signals / V. Skalsky, S. Hirnyj, Ye. Pochapskyu, B. Klym, R. Plakhtiy, Ya. Tolopko, and P. Dolishniy // Вісник Тернопільськ. нац. техн. ун-ту. – 2011. – Спецвип., ч. 1. – С. 155–161.
5. Application of magnetoacoustic emission for detection of hydrogen electrolytically absorbed by steel / Ye. Pochapskyu, Z. Nazarchuk, V. Skalsky, and S. Hirnyj // Proc. 19th Europ. Conf. on Fract. “Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety”. – Kazan (Russia), 26–31 August 2012. – ID 405. – 8 p.
6. Використання магнетопружної акустичної емісії для корозійних досліджень сталей / С. П. Почапський, Б. П. Клим, М. О. Рудак, Н. П. Мельник, Ю. І. Канюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 5 – С. 124–127.
(Pochaps'kyi E. P., Klym B. P., Rudak M. O., Mel'nyk N. P., Kanyuk Yu. I. Application of the magnetoelastic acoustic emission for the corrosion investigations of steels // Materials Science. – 2017. – **52**, № 5. – P. 742–745.)
7. Тицадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества / Пер. с яп. – М.: Мир, 1987. – С. 179–185.
8. Perevertov O. and Stupakov A. Magnetoacoustic measurement on steel samples at low magnetizing frequencies // J. of Electrical Eng. – 2015. – **66**. – P. 58–61.
9. Skal'skii V. R., Klim B. P., and Pochapskii E. P. Distribution of the induction of a quasi-stationary magnetic field created in a ferromagnet by an attachable electromagnet // Russian J. of Nondestructive Testing. – 2012. – **48** (1). – P. 23–34.
10. Evaluation by means of magneto-acoustic emission and Barkhausen effect of time and space distribution of magnetic flux density in ferromagnetic plate magnetized by a C-core / M. Augustyniak, B. Augustyniak, L. Piotrowski, M. Chmielewski, and W. Sadowski // J. of Magnetism and Magnetic Mat. – 2006. – **304**. – P. e552–e554.
11. Скальський В. Р., Почапський С. П., Мельник Н. П. Моделювання руху доменних стінок у феромагнетних матеріалах (Огляд) // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – **51**, № 6. – С. 7–16.
(Skal's'kyi V. R., Pochaps'kyi E. P., Mel'nyk N. P. Modeling of motion of the domain walls in ferromagnetic materials (A survey) // Materials Science. – 2016. – **51**, № 6. – P. 753–764.)

Одержано 07.12.2017