

ОЦІНЮВАННЯ ТОВЩИНИ МОДИФІКОВАНОГО ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ФЕРОМАГНЕТНОГО ЕЛЕМЕНТА КОНСТРУКЦІЇ МЕТОДОМ МАГНЕТОПРУЖНОЇ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Є. П. Почапський, Б. П. Клим, П. М. Долішній

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка
Національної академії наук України, Львів

E-mail: pochapskyu@ipm.lviv.ua, klym@ipm.lviv.ua

За результатами аналізу літературних джерел виявлено потребу в безпечних економічних та надійних методах оброблення поверхонь, зокрема, для цементації та зміцнення сталевих компонентів і конструкцій як на етапі виробництва, так і під час експлуатації. Для цього успішно використовують магнетну емісію Баркгаузена (МЕБ), яка обмежена глибиною вимірювання, а лазерне зміцнення та цементація часто виходять за межі сфери її застосування. Обмежувальним чинником для МЕБ є послаблення сигналу вихровими струмами під час його поширення крізь матеріал, що призводить до максимальної глибини вимірювання ~ 1 мм залежно від частоти збудження, діапазону частот аналізу та властивостей матеріалу. Перспективною є магнетопружна акустична емісія (МАЕ), яка поширюється через весь випробуваний зразок без перешкод від вихрових струмів. Тому глибина вимірювання тут набагато більша, ніж за методу МЕБ. Обґрунтовано можливість використання сигналу МАЕ для оброблення поверхонь. Розроблено евристичну модель для оцінювання товщини модифікованого шару елементів конструкцій з ферромагнетного матеріалу та запропоновано відповідну методику. Вона полягає в тому, що, досліджуючи методом МАЕ для різних частот перемагнення вихідного зразка та зразка з модифікованим поверхневим шаром, знаходять відносну різницю сум амплітуд зареєстрованих сигналів МАЕ, частоту, починаючи від якої ця різниця буде постійною, і для цієї частоти за формулою для глибини проникнення змінного магнетного поля або з урахуванням розмірів зразка числовими методами оцінюють товщину модифікованого поверхневого шару. Верифіковано розроблену методику на зразках зі сталі 17Г1С у стані постачання та зі штучно пластично деформованим верхнім шаром та оцінено його ефективну товщину.

Ключові слова: *магнетопружна акустична емісія, інформативні параметри, ферромагнетні матеріали, товщина поверхневого шару.*

ESTIMATION OF THE THICKNESS OF THE MODIFIED SURFACE LAYER OF A FERROMAGNETIC STRUCTURAL ELEMENT BY THE METHOD OF MAGNETOELASTIC ACOUSTIC EMISSION

Y. P. Pochapskyu, B. P. Klym, P. M. Dolishniy

Karpenko Physico-Mechanical Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv

The literature review revealed that there is a need in industry to provide safe, economical and reliable methods for characterizing surface treatments, in particular, such as case hardening and hardening of steel components and structures, both at the production stage and during operation. Magnetic Barkhausen emission (MBE) has been successfully used to solve these problems, but has serious limitations in terms of measurement depth, and surface treatment methods such as laser hardening and case hardening often fall outside its scope. The limiting factor for MBE is the attenuation of the eddy currents signal during its propagation through the material, which leads to a maximum measurement depth of about 1 mm, depending on the excitation frequency, the analysis frequency range and the material properties. The use of magnetoelastic acoustic emission (MAE), which propagates through the entire test sample without eddy currents interference, is promising, thus the measurement depth for MBE is much greater than for MBE. The possibility of using the MAE signal for characterizing surface treatment is substantiated. A heuristic model for estimating the thickness of the modified layer of structural elements made of ferromagnetic material is developed and a corresponding methodology is proposed.

The essence of the method is as follows: a study is carried out using the MAE method for different frequencies of magnetization reversal of the original sample and the sample with a modified surface layer, the relative difference in the sums of the amplitudes of the recorded MAE signals is found, the frequency starting from which this difference will be constant also for this frequency, using the formula for the penetration depth of an alternating magnetic field or taking into account the dimensions of the sample is established, the thickness of the modified surface layer by numerical methods is estimated. The developed method was verified on samples of 17G1S steel in the delivery state and with an artificially plastically deformed upper layer, and the effective thickness of this upper layer of the sample is estimated.

Keywords: *magnetoelastic acoustic emission, informative parameters, ferromagnetic materials, surface layer thickness.*

Вступ. У промисловості існує потреба в безпечних, економічних та надійних методах оброблення поверхонь, зокрема, для цементації та зміцнення сталевих компонентів і конструкцій як на етапі виробництва, так і під час експлуатації [1, 2]. Для цього успішно застосовують магнетну емісію Баркгаузена (МЕБ), яка обмежена глибиною вимірювання, а лазерне зміцнення та цементація часто виходять за межі сфери її застосування [2].

Під час використання МЕБ вихрові струми послаблюють сигнал за його поширення крізь матеріал, що призводить до максимальної глибини вимірювання ~ 1 мм залежно від частоти збудження, діапазону частот аналізу та властивостей матеріалу [1]. Рух певних конфігурацій доменів створює акустичний імпульс, відомий як магнетопружна акустична емісія (МАЕ) [3–7], який поширюється через весь зразок без перешкод від вихрових струмів. Таким чином, глибина вимірювання методом МАЕ набагато більша, ніж МЕБ.

Інформаційні параметри сигналу МАЕ 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 [8, 9]. Найвідчутніше змінює потужність МАЕ пластичне деформування матеріалу, а дещо менше – водень, вплив якого залежить від концентрації у феромагнетику [8]. Це означає, що метод МАЕ чутливіший до результатів оброблення поверхні елемента конструкції з феромагнетного матеріалу.

Його реалізація під час експлуатації феромагнетних елементів обладнання передбачає перемагнечування певного об'єму діагностованого об'єкта. При цьому важливе значення мають локальність і глибина ділянки перемагнечення. Глибина проникнення змінного магнетного поля в феромагнетний зразок залежить від його фізичних властивостей і частоти магнетного поля [10, 11]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0\mu\omega}}, \quad (1)$$

де ρ – питомий електричний опір матеріалу; $\omega = 2\pi f$ – кутова частота змінного поля; f – частота поля; μ_0 – магнетна проникність вакууму; μ – відносна магнетна проникність сталі.

Під час виведення формули (1) передбачали сталість відносної магнетної проникності зразка ($\mu = \text{const}$), плоский фронт електромагнетної хвилі, що падає на зразок, форму зразка у вигляді нескінченного півпростору тощо [10].

Для зразків скінченних розмірів та різноманітних пристроїв перемагнечення актуально числово розрахувати розподіл індукції магнетного поля, створюваного ними в феромагнетному матеріалі і, ґрунтуючись на цих результатах, вибрати конструкцію, оптимізувати її за геометричними розмірами, параметрами обмотки та споживаним струмом.

Згідно з результатами числових розрахунків, поданих у праці [11], побудували залежності глибини промагнетчування феромагнетного зразка скінченних розмірів від частоти збуджувального сигналу для соленоїдного і П-подібного накладного електромагнету (НЕМ) (рис. 1).

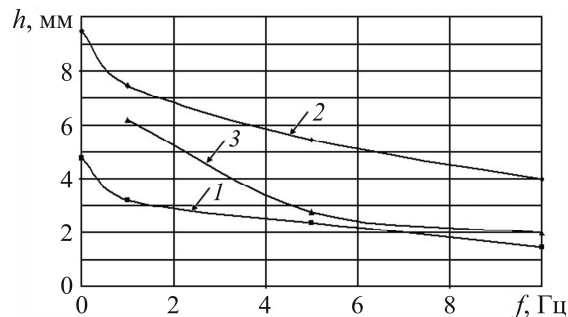


Рис. 1. Залежність глибини промагнетчування феромагнетного зразка від частоти збуджувального сигналу для соленоїдного (крива 1) і П-подібного (крива 2) НЕМ; 3 – теоретична крива [11].

За характером кривих 1 і 2 можна зробити висновок, що для частот перемагнетчування 1 Гц і більше глибина промагнетчування зразка для обох типів НЕМ менша, ніж за стаціонарних умов (7,5 і 3,2 мм для частоти перемагнетчування 1 Гц проти 9,5 і 4,8 мм за стаціонарних умов для П-подібного і соленоїдного НЕМ, відповідно). Отже, у кожному конкретному випадку необхідно виконати подібні розрахунки. Для глибших промагнетчувань феромагнетного зразка під час діагностування методом МАЕ доцільно використовувати П-подібний НЕМ. Теоретична крива, за якою часто розраховують глибину проникнення магнетного поля, підтверджує, що методи числового розрахунку у кожному конкретному випадку загалом дають достовірніші результати.

Щоб обґрунтувати можливість використання МАЕ для оцінювання товщини обробленого поверхневого шару елемента конструкції з феромагнетного матеріалу для його зміцнення, розглянемо схему феромагнетного зразка з модифікованим поверхневим шаром (рис. 2).

Товщина модифікованого шару h_0 . Загальна глибина промагнетчення h . Тоді, згідно з методом МАЕ, сума амплітуд зареєстрованого сигналу за перемагнетчення феромагнетного зразка без модифікованого поверхневого шару

$$A_{\Sigma}^1 = k_f S l h n. \quad (2)$$

Тут S та l – відповідно, ширина та довжина ділянки перемагнетчення; n – концентрація центрів генерування МАЕ; k_f – їх ефективність для заданої частоти перемагнетчення.

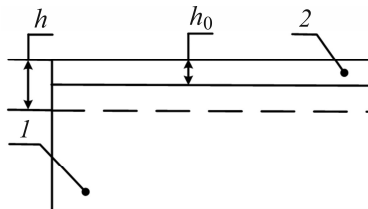


Рис. 2. Схема феромагнетного зразка у стані постачання (1) з модифікованим поверхневим шаром (2).

Для зразка з модифікованим поверхневим шаром

$$A_{\Sigma}^2 = k_f S l h_0 n_0 + k_f S l (h - h_0) n, \quad (3)$$

де n_0 – концентрація центрів генерування МАЕ.

Якщо поверхневий шар зміцнюють, для прикладу, цементацією чи пластичним деформуванням, то за результатами виконаних раніше досліджень методом МАЕ [10] $A_{\Sigma}^1 > A_{\Sigma}^2$ і для різниці сум амплітуд

$$\Delta A_{\Sigma} = A_{\Sigma}^1 - A_{\Sigma}^2 = k_f S l h_0 (n - n_0), \quad (4)$$

а для відносної їх різниці

$$\delta = \frac{\Delta A_{\Sigma}}{A_{\Sigma}^1} = \frac{k_f S l h_0 (n - n_0)}{k_f S l h n} = \frac{h_0}{h} \frac{(n - n_0)}{n}. \quad (5)$$

За частоти перемагнення, якщо глибина промагнення $h \leq h_0$,

$$\delta = \frac{(n - n_0)}{n} = \text{const}, \quad (6)$$

тобто товщину модифікованого шару знаходимо для частоти перемагнення, для якої $\delta = \text{const}$.

Ґрунтуючись на наведених міркуваннях, пропонуємо таку методику оцінювання товщини модифікованого шару феромагнетного елемента конструкцій методом МАЕ:

- досліджуємо для різних частот перемагнення вихідного зразка та з модифікованим поверхневим шаром;
- за формулою (5) знаходимо відносну різницю сум амплітуд сигналу МАЕ;
- визначаємо частоту, починаючи від якої $\delta = \text{const}$;
- для цієї частоти за формулою (1) або з урахуванням розмірів зразка числово оцінюємо товщину модифікованого поверхневого шару.

Для верифікації розробленої методики випробовували зразки зі сталі 17Г1С у стані постачання та зі штучно пластично деформованим ультразвуковим молотком верхнім шаром (рис. 3).

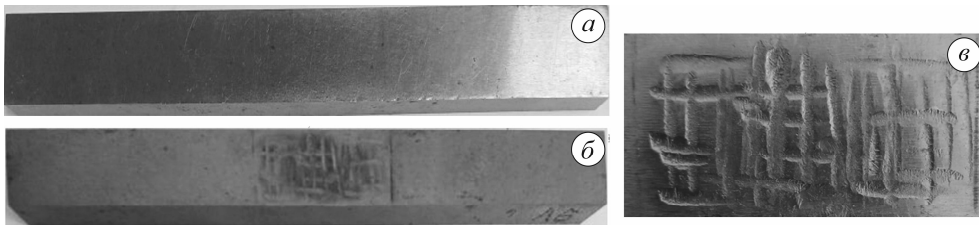


Рис. 3. Зразок зі сталі 17Г1С у стані постачання (а), з пластично деформованим верхнім шаром (б) та пластично деформованим верхнім шаром у центральній частині (в).

На рис. 4 подано залежність відносної різниці сум амплітуд сигналу МАЕ для вихідного зразка та з модифікованим шаром від різних частот перемагнення. Для частоти $f = 120 \text{ c}^{-1}$ відносна різниця сум амплітуд сигналу МАЕ наближається до $\delta = \text{const}$. Для оцінювання товщини модифікованого шару за формулою (1) одержуємо значення $\sim 0,5 \text{ мм}$.

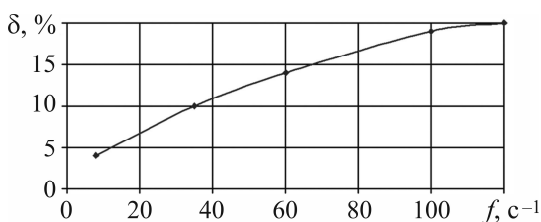


Рис. 4. Залежність відносної різниці сум амплітуд сигналу МАЕ для вихідного зразка та з модифікованим шаром від різних частот перемагнення.

ВИСНОВКИ

Обґрунтовано можливість використання сигналу МАЕ для оброблення поверхонь шляхом цементації та зміцнення сталевих компонентів і конструкцій як на етапі виробництва, так і під час експлуатації. Розроблено евристичну модель для оцінювання товщини модифікованого шару елементів конструкцій з феромагнетного матеріалу. Запропоновано методику визначення товщини модифікованого шару феромагнетного елемента конструкцій методом МАЕ. Верифіковано розроблену методику на зразках зі сталі 17Г1С у стані постачання та зі штучно пластично деформованим верхнім шаром, а також оцінено ефективну його товщину.

1. Moorthy, V.; Shaw, B.A.; Hopkins, P. Surface and subsurface stress evaluation in case-carburised steel using high and low frequency magnetic barkhausen emission measurements. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **2006**, 299(2), 362–375. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2005.04.028>
2. Wilson, J.W.; Tian, G.Y.; Moorthy, V.; Shaw, B.A. Magneto-Acoustic Emission and Magnetic Barkhausen Emission for Case Depth Measurement in En36 Gear Steel. *IEEE Transactions on Magnetics* **2009**, 45(1), 177–183. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2007537>
3. Ono, K.; Shibata, M. Magnetomechanical Acoustic Emission – a New Method of Nondestructive Stress Measurement. *NDT International* **1981**, 14(5), 227–234. [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(81\)90075-4](https://doi.org/10.1016/0308-9126(81)90075-4)
4. Tochilin, S.B.; Jakubovics, J.P.; Briggs, G.A.D. Use of magnetoacoustic emission for studying stress in industrial components. *IEEE Transactions on Magnetics* **1995**, 31(6), 4163–4165. <https://doi.org/10.1109/20.489894>
5. Piotrowski, L.; Augustyniak, B.; Chmielewski, M.; Labanowski, J.; Lech-Grega, M. Study on the applicability of the measurements of magnetoelastic properties for a nondestructive evaluation of thermally induced microstructure changes in the P91grade steel. *NDT&E International* **2012**, 47, 157–162. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.01.007>
6. Piotrowski, L.; Chmielewski, M.; Augustyniak, B. The influence of elastic deformation on the properties of the magnetoacoustic emission (MAE) signal for GO electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **2012**, 324(16), 2496–2500. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.03.021>
7. Augustyniak, B.; Piotrowski, L.; Chmielewski, M. Impact of frequency and sample geometry on magnetacoustic emission voltage properties for two steel grades. *Journal of Electrical Engineering* **2008**, 59(7), 33–36.
8. Skal's'kyi, V.R.; Pochaps'kyi, E.P.; Klym, B.P.; Rudak, M.O.; Velykyi, P.P. Application of the method of magnetoelastic acoustic emission for the analysis of the technical state of 19G steel after long-term operation in an oil pipeline. *Materials Science* **2016**, 52(3), 385–389. <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9968-3>
9. Pochaps'kyi, Ye.P.; Mel'nyk, N.P.; Koblan, I.M. Influence of the Conditions of Excitation and Generation of Magnetoelastic Acoustic Emission Signals in Ferromagnetic Materials. *Materials Science* **2018**, 54(3), 444–449. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0204-1>
10. Nazarchuk, Z.T.; Skalskyi, V.R.; Pochaps'kyi, E.P. *Technologies of extraction and processing of low-energy diagnostic signals*; Naukova Dumka, 2014. (In Ukrainian)
11. Klym, B.P.; Pochaps'kyi, Ye.P.; Skalskyi, V.R. Information and computing system for processing magnetoelastic acoustic emission signals. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing* **2008**, 2, 43–49. (In Ukrainian)

Одержано 28.08.2025

ORCID iDs

Pochapsky Y.P.  <https://orcid.org/0000-0002-6198-5654>
Klym B.P.  <https://orcid.org/0009-0003-0324-4633>
Dolishniy P.M.  <https://orcid.org/0009-0006-6026-7761>