

PACS numbers: 07.07.Df, 07.55.-w, 62.20.Qp, 75.20.En, 75.60.Ej, 81.05.Bx, 81.40.Rs

## Оцінка структурних характеристик металевих матеріалів енергетичного обладнання за зміною їхньої магнетної поведінки

А. В. Грузевич, Ю. Б. Скирта<sup>\*\*</sup>, І. В. Герасимчук<sup>\*\*</sup>, С. В. Кривець\*,  
К. А. Сіренко<sup>\*\*\*</sup>, Д. О. Дереча<sup>\*\*\*</sup>

Трипільська ТЕС,  
08720 Українка, Україна

\*Інститут магнетизму НАН України та МОН України,  
бульв. Академіка Вернадського, 36-б,  
03142 Київ, Україна

\*\*Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
просп. Берестейський, 57,  
03056 Київ, Україна

\*\*\*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України,  
бульв. Академіка Вернадського, 34/1,  
03142 Київ, Україна

Встановлено взаємозв'язок між зміною структурних і механічних властивостей металевих матеріалів і конструкційних елементів та модифікуванням їхньої магнетної поведінки під дією механічних напружень, тем-

---

Corresponding author: Serhiy Volodymyrovych Kryvets'  
E-mail: [resega@ukr.net](mailto:resega@ukr.net)

Трипільська ТЕС,  
UA-08720 Ukrainka, Ukraine

\*Institute of Magnetism, N.A.S. of Ukraine and M.E.S. of Ukraine,  
36-b Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine

\*\*National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute',  
57 Beresteiskyyi Ave., UA-03056 Kyiv, Ukraine

\*\*\*Physico-Technological Institute of Metals and Alloys N.A.S. of Ukraine,  
34/1 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine

Citation: A. V. Hruzevych, Y. B. Skyrta, I. V. Gerasymchuk, S. V. Kryvets', K. A. Sirenko, and D. O. Derecha, Evaluation of Structural Characteristics of Metal Materials of Power Equipment by Change in Their Magnetic Behaviour, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **46**, No. 2: 111–120 (2024) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.46.02.0111](https://doi.org/10.15407/mfint.46.02.0111).

ператури й агресивних середовищ з метою створення методики визначення залишкового ресурсу та підвищення експлуатаційної надійності матеріалів і систем. Запропоновано експрес-метод оцінювання мікроструктури шляхом визначення зміни магнетоакустичного відгуку матеріалу.

**Ключові слова:** магнетна індукція, структурно-фазовий стан, Баркгаузенів ефект, гістереза.

The relationship between the change in the structural and mechanical properties of metal materials and structural elements and the modification of their magnetic behaviour under the influence of mechanical stresses, temperature and aggressive environments is established in order to create a methodology for both determining the residual resource and increasing the operational reliability of materials and systems. An express method of microstructure assessment by means of determining the change in the magnetoacoustic response of the material is proposed.

**Key words:** magnetic induction, structural–phase state, Barkhausen effect, hysteresis.

*(Отримано 31 жовтня 2023 р.; остаточн. варіант — 25 листопада 2023 р.)*

## 1. ВСТУП

Для сучасної України характерна значна зношеність енергетичного обладнання; так понад 85% енергоблоків теплових електростанцій, що працюють на вугіллі, мають напрацювання більше 200 тис. год і є фізично зношеними [1]. Тепломеханічне обладнання, що розраховано на закритичні параметри, відпрацювало розрахунковий строк служби; тому набирають вагоме значення вимоги до надійності металу енергетичного обладнання й оцінки його якості. В галузі постійно виконується значна кількість замін високовартісної жаростійкої трубною продукцією. В теперішній час особливу увагу необхідно звернути на підвищення ефективності робіт з експертного обстеження устаткування та на підвищення якості системи управління ремонтом. Досягнути цієї мети можливо шляхом застосування передових методів контролю, які уможливають своєчасно виявляти відхилення в якості та проводити своєчасно заміни необхідних вузлів. В результаті виникнення непередбачуваних відмов та аварійних ситуацій завдаються значні збитки енергетичним підприємствам, погіршується надійність роботи обладнання.

Прийнято, що одним з головних чинників надійної роботи обладнання є задовільний структурний стан матеріалу, з якого воно виготовлене [2]. Від структурно-фазового стану залежать службові властивості матеріалу. Таким чином, підвищення достовірності оцінки структурного стану елементів обладнання на основі фізичних методів неруйнівного контролю є дуже актуальною науково-

практичною проблемою, вирішення якої дасть змогу виявляти ділянки обладнання з невідповідною структурою та своєчасно проводити заходи щодо ремонту їх та усунення.

## 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Магнетні методи є дуже чутливими до різних мікроструктурних чинників [3, 4]. У зв'язку з цим перспективним є використання методик магнетної діагностики, що уможлиблює встановити залежності між механічними властивостями та структурними складовими з магнетними характеристиками металу. Однак ще не досліджено питання прогнозування працездатності довгостроково працюючих теплопривних криць за магнетними характеристиками, не вирішено питання впливу мікроструктури на магнетні характеристики і їхній зв'язок із тривалою міцністю.

Запропонована методика, заснована на використанні магнетоакустичного відгуку магнетних матеріалів, уможлиблює провести вивчення змін ферито-перлітних структур у процесі експлуатації, оцінити їхній вплив на зміну магнетного поля, а також надає інструмент для виявлення бракувальних структур металу обладнання у процесі експлуатації та на початковому етапі роботи енергетичних установок.

Основна ідея роботи полягає у встановленні зв'язків між змінами мікроструктурного стану з магнетними характеристиками для підвищення ефективності прогнозування працездатності металу.

Одержання експериментальних даних про вплив магнетного поля важливе не тільки для вивчення можливостей визначення властивостей металів і сплавів, але й для розуміння причин такого впливу, створення теорії впливу магнетного поля на матеріал у процесі структурних перетворень.

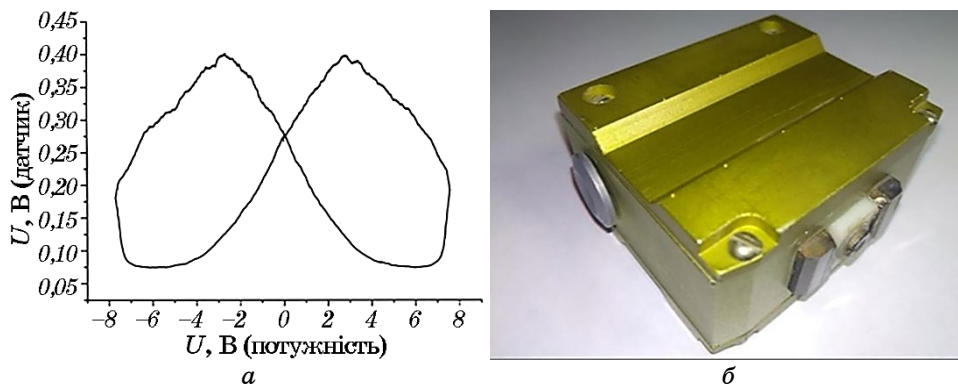
В якості матеріалів було використано труби з низьколегованої криці 12Х1МФ в стані поставки та з різними термінами напрацювання. Для досліджень використано зразки металу термооброблених труб після стандартного термічного оброблення, а саме, нормалізації (Н) за температури у 950–980°C та відпуску за температури у 720–750°C з витримкою у 1–3 години. Слід зазначити, що вказані труби мали різні терміни напрацювання. Зразки вирізано механічним способом без перегрівання металу. За циклічного перемагнетування зразків із криці 12Х1МФ з метою одержання експериментальних даних і перевірки їхніх результатів проведено дослідження характеристик Баркгаузенівих магнетних шумів. Під час досліджень проаналізовано поточні магнетні характеристики зразків та взаємозв'язок їх з рівнем деградації перлітної фази та виникненням залишкових напружень. Різний рівень мікронапружень і кількісний фазовий склад було задано за допомогою вибору зразків з різ-

ним строком напрацювання й умовами експлуатації, макронапружень механічним шляхом. Досліджувані зразки було вирізано з нових труб (зразок № 1) і труб поверхонь нагріву котлів ТПП-210А: конвективний пароперегрівач низького тиску (ЖПП н.т.) і стельовий пароперегрівач (СПП) — зразки № 2 та № 3 відповідно.

На експериментальних зразках визначалися механічні властивості, а саме, межа міцності, відносне звуження та подовження, величина твердості в одиницях *HV*, досліджувалася мікроструктура та визначався хемічний склад. Параметри магнетних шумів (МШ) реєструвалися з використанням модернізованого приладу для дослідження Баркгаузенових шумів АФС. Основна частина приладу — датчик, який складається з електромагнету, який забезпечує потрібне намагнетовування, та приймальної котушки, на якій наводиться сигнал Баркгаузенових шумів. На електромагнет подається пилкоподібна напруга, що забезпечує лінійну зміну магнетного поля у заданому діяпазоні. Ця напруга також подається на один з каналів аналого-цифрового перетворювача (АЦП) для оцифрування. Сигнал з приймальної котушки подається на підсилювач, з виходу якого він поступає на інший канал АЦП. Оцифровані дані з обох каналів АЦП передаються на персональний комп'ютер. Сигнал від генератора пропорційний індукції магнетного поля. Сигнал з приймальної котушки складається з індукованого сигналу генератора та Баркгаузенових шумів, які мають більш високі частоти. Для розділення їх використовується фільтер нижчих частот — усереднення у рухомому вікні, ширина якого підбирається дослідним шляхом. Одержаний усереднений сигнал віднімається від початкового сигналу; різниця відповідає Баркгаузеновим шумам. Для цих шумів також у рухомому вікні знаходиться дисперсія, яка може слугувати мірою їхньої інтенсивності. Розподіл інтенсивності Баркгаузенових шумів вздовж кривої намагнетовування може слугувати для якісної оцінки зміни його механічних властивостей у процесі експлуатації. У роботі використовувався накладний перетворювач П-подібного типу; частота струму перемагнетування — 10 Гц, амплітуда — 0,6 А.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ

Через відсутність загальної теорії магнетної структуроскопії доводиться шукати кореляцію між магнетними параметрами, структурою та механічними властивостями кожного типу криці. Тому, аналізуючи вихідний магнетний стан металу, а потім його зміну через тривалий час під навантаженням аж до руйнування можна одержати інформацію про основні закономірності зміни магнетоакустичного відгуку магнетних матеріалів за модифікування їхнього структурно-механічного стану.

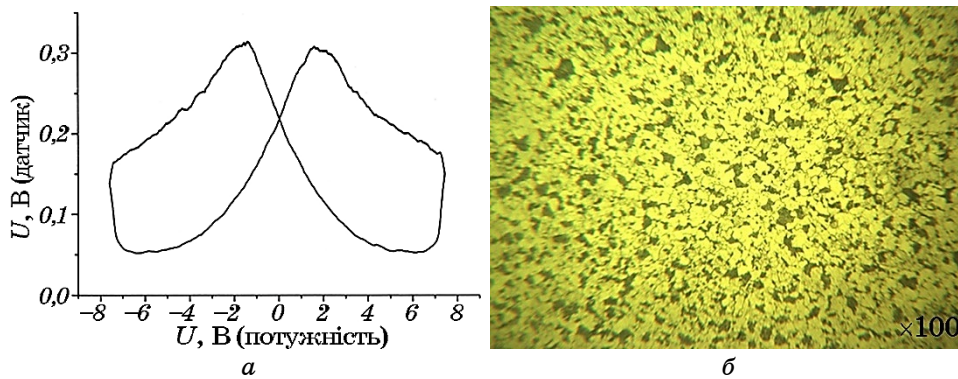


**Рис. 1.** Форма сигналів від датчика у формі паралелепіпеда: сигнал, одержаний від датча (а), зовнішній вигляд датча (б).

**Fig. 1.** The shape of signals from the sensor in the form of a parallelepiped: the signal obtained from the sensor (a), the appearance of the sensor (b).

Основний метод одержання інформації — це побудова залежностей зі зразків-свідків, що знаходились у реальних умовах експлуатації.

Типові сигнали МШ від датчів у формі паралелепіпеда зображено на рис. 1. Інтенсивність шумів змінюється із зміною магнетного поля у котушці датча; на одержаній залежності для аналізу ми використовували рівень шумів за магнетного поля, близького до 0, —  $U_{\text{стар}}$ , і максимальне значення цього сигналу  $U_{\text{max}}$ ; інформативною



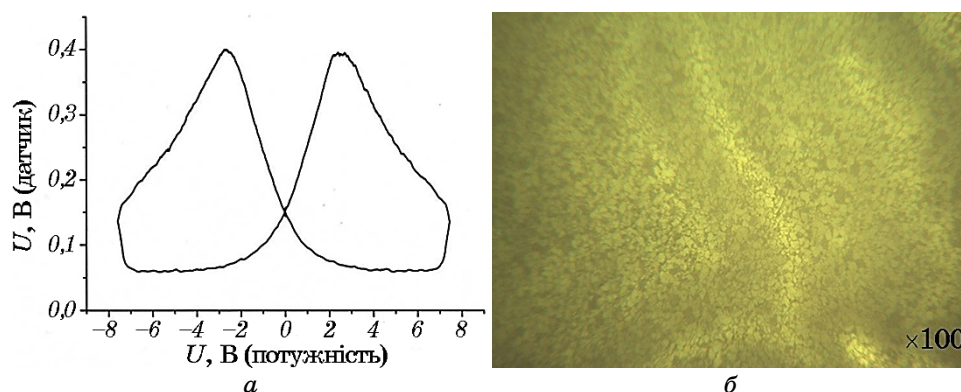
**Рис. 2.** Криві магнетних шумів зразка нової труби: сигнал, одержаний від зразка (а), зразок за збільшення у 100 разів (б).

**Fig. 2.** Magnetic-noise curves for a sample of a new pipe: signal obtained from the sample (a), sample at 100 times' magnification (b).

може бути також зміна форми кривої в процесі експлуатації матеріалу.

Проаналізувавши графіки, що були побудовані за результатами випробувань зі зразками металу, що не був в експлуатації (рис. 2), бачимо присутність одного центрального піку напруги  $U_{\max}$ . По мірі збагачення феритної матриці карбідами, що випадають під час експлуатації, та виникнення залишкових напружень початковий пік має збільшуватися. Значення, яких було одержано вимірюванням магнетних шумів зі зразків нової труби, взято за опорні. Так,  $U_{\max}$  дорівнює 0,31 В,  $U_{\text{стар.}}$  має показник у 0,21 В.

Зміна величини магнетних шумів під час експлуатації пов'язана зі структурними змінами, які спричинені розпадом твердого розчину на основі  $\alpha$ -заліза, перекристалізацією карбідів як на межах зерен, так і в тілі зерна, та пов'язані з дефектною структурою криці. На першій короткотривалій стадії експлуатації відбувається незначне підвищення міцності. Це підтверджується мікроскопічними дослідженнями структури криці, які показують, що на стадії зміцнення відбувається закріплення дислокацій в результаті дрейфу до них легувальних елементів і збільшення опору руху вільних дислокацій через появи в перліті зон, збагачених атомами легувальних елементів і частинок метастабільної фази, когерентних або напівкогерентних з матрицею. Ці процеси приводять до підвищення характеристик твердості та міцності криці, а також пониження її пластичних і в'язкісних властивостей. На стадії пониження міцності криці 12X1МФ після напрацювання 20000 годин відбувається



**Рис. 3.** Криві магнетних шумів зразка конвективного пароперегрівача низького тиску: сигнал, одержаний від зразка (а), зразок за збільшення у 100 разів (б).

**Fig. 3.** Magnetic-noise curves for a sample of a low-pressure convective superheater: signal obtained from the sample (a), sample at 100 times' magnification (b).

часткове розчинення перлітної складової з випадінням карбідів. До зміни параметрів МШ в сторону збільшення показника  $U_{\max}$  і зменшення його в сторону більш високого магнетного поля приводить в основному зміна мікроструктури.

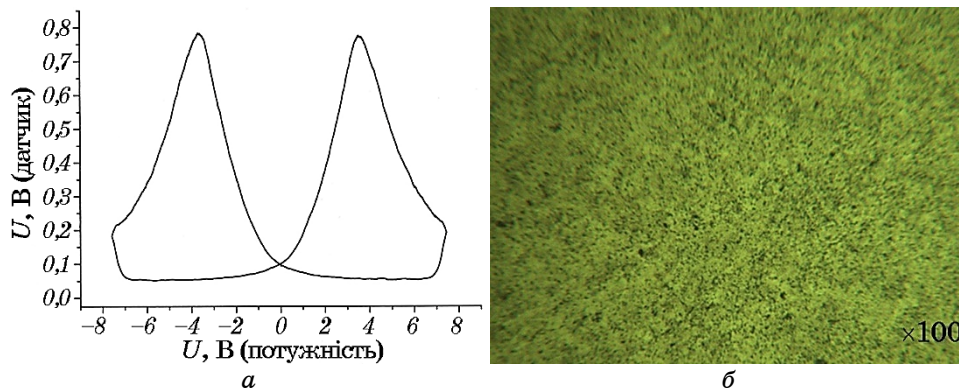
Розглянемо криві магнетних шумів зі зразків ділянки, що була в експлуатації труби екрану з конвективного пароперегрівача низького тиску (рис. 3).

Проаналізувавши графіки, побудовані за результатами випробувань труби, що була в експлуатації з конвективного пароперегрівача низького тиску, бачимо присутність одного центрального піку. Вважаємо, що після деградації перлітної та насичення карбідами феритної складової спостерігається пониження напруги старту. Крім того, висоту піку та положення піку намагалися також корелювати з механічними властивостями (включаючи межу міцности та твердість).

Твердість металу під час експлуатації збільшилася на незначні величини або залишилася майже без змін:  $HB = 110-115$ . Мікроструктура відповідає Балу 5 (Додаток В «Шкали мікроструктур металла котельних труб из стали марок 12Х1МФ, 12Х1МФ-ПВ, 15Х1М1Ф, 12Х2МФСР» до ТУ 14-3-60:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009).

Механічні характеристики після 116663 годин експлуатації теж залишаються на достатньо високому рівні. Межа міцности —  $\sigma_b = 51,2$  кг/мм<sup>2</sup>;  $\delta = 28,2\%$ ;  $\psi = 75,6\%$ . Деградація перлітної складової привела до збільшення показника  $U_{\max}$  до 0,4 В та пониження  $U_{\text{стар.}}$  до показника в 0,15 В.

Структура металу зразка № 3 складається із зерен фериту, сферо-



**Рис. 4.** Криві магнетних шумів зразка стельового пароперегрівача: сигнал, одержаний від зразка (а), зразок за збільшення у 100 разів (б).

**Fig. 4.** Curves of magnetic noises of a ceiling superheater sample: signal obtained from the sample (a), sample at 100 times' magnification (b).

**ТАБЛИЦЯ 1.** Магнетні та механічні властивості криць.**TABLE 1.** Magnetic and mechanical properties of steels.

№ зразка	Марка криці	Напрацювання	Твердість, <i>HV</i>	Мікроструктура	Оцінка мікроструктури за ТУ 14-3-460:2009	Значення <i>U, B</i>
1	12X1MФ	0	105–115	Ф + П	4	0,32
2	12X1MФ	116663	110–115	Ф + П + К	5	0,4
3	12X1MФ	273239	127–130	Ф + перекристалізований П + К	8–9	0,79

їдизованих зерен перліту та карбідів по межах зерен, і в полі зерна — Бал 9 (рис. 4). Межі зерен — нечіткі; зерна перліту мають рихлу будову. Мікроструктура за СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009 за шкалою ступеня деградації перлітної складової відповідає Балу 4.

Сфероїдизація зерен перліту та карбідів у зразках привела до збільшення показника  $U_{\max}$  аж до 0,79 В та пониження  $U_{\text{стар.}}$  до показника в 0,1 В.

Проведені на енергетичному обладнанні дослідження уможливили узагальнити результати й оформити їх у вигляді зведеної таблиці 1. В таблиці 1 наведено значення (*U, B*) і розподіли МШ для зразків із криці 12X1MФ з різними термінами напрацювання за фазовим і мікроструктурним станами.

З використанням даних табл. 1 було класифіковано критерії вибракування окремих елементів обладнання.

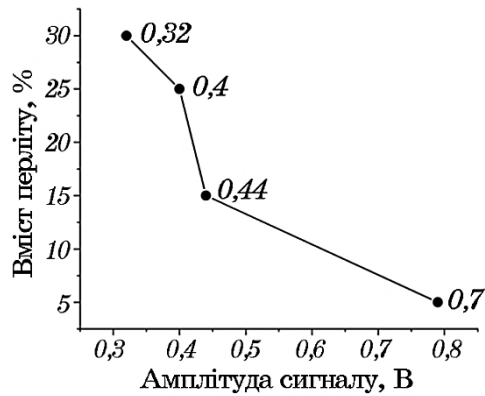
#### 4. ВИСНОВКИ

Встановлено, що є однозначна кореляція між магнетоіндуктивними параметрами металевих матеріалів та їхніми структурно-механічними властивостями, які змінюються в процесі механічного та термічного оброблень в результаті модифікування мікроструктури.

1. Встановлено, що деградація перліту в матеріалі приводить до збільшення магнетоіндуктивного відгуку матеріалу (12X1MФ), що пов'язано зі зростанням дефектності структури металу (часу напрацювання, розпадом перліту) та виділенням карбідної фази по межах зерен. Амплітуда магнетоакустичного відгуку збільшується зі зменшенням вмісту перліту (рис. 5).

2. Показано, що під впливом температурних навантажень цементит майже повністю зникає; структурні зміни приводять і до зміни механічних характеристик. Встановлено діпазони значень інтенсивності магнетного відгуку досліджених зразків: без навантаження





**Рис. 5.** Залежність амплітуди магнетоакустичного відгуку від вмісту перліту.

**Fig. 5.** Dependence of the amplitude of the magneto-acoustic response on the pearlite content.

(за експлуатаційних температур) вони складають 0,3–0,35 од.; під навантаженням — 0,4–0,45 од.; перед руйнуванням — 0,7–0,8 од. (перегрів).

3. Розроблено методику оцінки структурно-механічного стану матеріалу за результатами міряннь магнетоіндуктивного відгуку й одержано кореляційні залежності. Визначено оптимальну конфігурацію давачів для міряння інтенсивності Баркгаузенових шумів досліджуваних матеріалів.

4. Розроблено оригінальну методику для опосередкованого визначення змін мікроструктури та механічних напружень, що виникають у матеріалі під час експлуатації, по магнетоіндуктивному відгуку.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. А. А. Халатов, *Вісник Національної академії наук України*, **6**: 53 (2016).
2. А. В. Грузевич, *Металлофизика и новейшие технологии*, **39**, № 7: 929 (2017).
3. А. В. Грузевич, Д. Л. Нікіфоров, Д. А. Дереча, Ю. Б. Скірта, *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**: 45 (2020).
4. *Неразрушающий контроль: Справочник в 8 т.* (Ред. В. В. Ключев) (Москва: Машиностроение: 2006), т. 6.

#### REFERENCES

1. A. A. Khalatov, *Visnyk Natsional'noyi Akademiyi Nauk Ukrainy*, **6**: 53

- (2016).
2. A. V. Hruzevych, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 7: 929 (2017) (in Russian).
  3. A. V. Hruzevych, D. L. Nikiforov, D. A. Derecha, and Yu. B. Skyrta, *Tekhnicheskaya Diagnostika i Nerazrushayushchiy Kontrol'*, **1**: 45 (2020) (in Russian).
  4. *Nerazrushayushchiy Kontrol': Spravochnik v 8 t.* [Nondestructive Testing: Reference Book in 8 vols.] (Eds. V. V. Klyuyev) (Moskva: Mashinostroenie: 2006), vol. 6 (in Russian).