

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНОЇ ПЕТЛІ МАГНІТНОГО ГІСТЕРЕЗИСУ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИСТАВНИМИ ПЕРВИННИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

С. М. Мінаков¹, В. М. Учанін², А. С. Мінаков¹,
І. М. Вдовиченко¹, Д. М. Вдовиченко¹

¹ Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

E-mail: minakovsergey61@gmail.com, vuchanin@gmail.com

Запропоновано пристрій для дослідження динамічної петлі магнітного гістерезису (ПМГ) під час циклічного перемагнічування локальної зони досліджуваного матеріалу для контролю ферромагнітних матеріалів, а саме, структурного аналізу. Пристрій складається із генератора синусоїдальних сигналів, підсилювача, давача струму, приставного первинного магнітного перетворювача, двоканального аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), комп'ютера. Первинний перетворювач запропоновано у вигляді П-подібного осердя із обмотками намагнічування та вимірювання на ніжках, торці яких призначено для встановлення на досліджуваних об'єкт. Сигнал із генератора через підсилювач та давач струму потрапляє на обмотку намагнічування. На АЦП надходять два сигнали: один із обмотки вимірювання, інший – з давача струму. З виходу АЦП обидва сигнали у цифровому вигляді надходять у комп'ютер. Для подальшої обробки отриманих даних розроблена спеціалізована програма на мові LabVIEW, за допомогою якої реалізують фільтрування та інтегрування сигналу вимірювальної обмотки, а також будують ПМГ та обчислюють її параметри.

Ключові слова: динамічна петля магнітного гістерезису, приставний магнітний перетворювач, магнітний структурний аналіз, діагностика ферромагнітних матеріалів.

DETERMINING THE PARAMETERS OF THE DYNAMIC MAGNETIC HYSTERESIS LOOP OF THE STRUCTURAL MATERIALS BY ATTACHABLE PRIMARY TRANSDUCERS

S. M. Minakov¹, V. M. Uchanin², A. S. Minakov¹,
I. M. Vdovychenko¹, D. M. Vdovychenko¹

¹ National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv;

² H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

Coercive force, which is one of the structure-sensitive characteristics of ferromagnetic materials, is most often used for magnetic analysis. This approach requires the use of powerful magnetization systems, which leads to an increase in the size of the attachable magnetic probe and, accordingly, to a decrease in the locality of control. The above-mentioned disadvantages can be eliminated by using the parameters of the dynamic magnetic hysteresis loop (MHL), which involves the use of variable magnetic fields. A device for studying the dynamic MHL during cyclic remagnetization for the tasks of testing ferromagnetic materials, namely structural analysis, is proposed. The device consists of a generator of sinusoidal signals, an amplifier, a current sensor, an attachable magnetic probe, a two-channel analog-to-digital converter (ADC), and a computer. The attachable magnetic probe is proposed in the form of a U-shaped core with magnetization windings on one leg and measurement winding on the other leg. The signal from the generator through the amplifier and the current sensor enters the magnetization winding. The ADC receives two signals: first one – from the measurement winding, and second – from the current sensor. Both signals from the ADC output in digital form are processed and analyzed by the computer using the developed specialized software in the LabVIEW language. Due to the developed software the filtering and integration of the signal from the measuring winding

as well as the MHL plotting and MHL parameters calculation was realized. To reduce interference when determining MHL parameters, averaging over 50 magnetization cycles was performed. The attachable magnetic probe with the dimensions of the contact part 30×17 mm created a field with a strength of 300 A/m at a frequency of 50 Hz. The device was tested on specimens of 09G2S sheet steel type with a thickness of 4 mm, in which uniaxial tensile stresses were created. The obtained results show the sensitivity of the dynamic MHL area to mechanical tensile stresses, as it increases from 14.8 to 16.8 mT·A/m during loading.

Keywords: *dynamic loop of magnetic hysteresis, attachable magnetic probe, magnetic structural analysis, diagnostics of ferromagnetic materials.*

Вступ. Для структурного аналізу конструкційних ферромагнітних матеріалів все частіше вимірюють різні параметри петлі магнітного гістерезису (ПМГ) під час циклічного перемагнічування [1]. Для неруйнівного контролю (НК) габаритних конструкцій використовують приставні первинні перетворювачі (ПП) з П-подібними електромагнітами, за допомогою яких визначають локальні магнітні параметри матеріалу тієї частини об'єкта контролю (ОК), через яку замикається магнітний потік електромагніту [2]. Для магнітного аналізу найчастіше використовують коерцитивну силу (КС), яка є однією із структурно-чутливих характеристик ферромагнітних матеріалів і корелює з багатьма механічними параметрами матеріалу [2–4]. На основі вимірювання КС можна контролювати ферромагнітні матеріали і визначати їх механічні характеристики (твердість, границі міцності та плинності, ударну в'язкість, модуль пружності), структурні параметри (розміри зерна та включень, пористість, густину), хімічний склад (зокрема, вміст легувальних елементів), якість термічної або хіміко-термічної обробки (глибину загартованого чи цементованого шару, фазовий склад). Крім того, КС корелює з параметрами напружено-деформованого стану і втомними структурними змінами, що дозволяє оцінювати технічний стан та залишковий ресурс конструкцій, тобто здійснювати їх експлуатаційний моніторинг [2]. Для магнітної структуроскопії застосовують й інші структурно-чутливі параметри ПМГ, зокрема залишкову індукцію B_r , магнітну проникність μ , магнітну індукцію насичення B_s та площу ПМГ, яка характеризує втрати на гістерезис за один цикл перемагнічування [2].

Здебільшого відомі магнітні аналізатори визначають параметри статичної ПМГ, вивчення якої передбачає доведення досліджуваного матеріалу до стану технічного насичення. Такий підхід вимагає використання потужних систем намагнічування, що призводить до збільшення розмірів приставного магнітного перетворювача і, відповідно, до зменшення локальності контролю. Для доведення матеріалу до стану технічного насичення використовують імпульсне намагнічування, яке є складнішим для технічної реалізації.

Зазначених недоліків можна позбутися, використавши параметри динамічної ПМГ, яка передбачає застосування змінних магнітних полів [5–7]. Тоді у ферромагнітному матеріалі виникають вихрові струми, які перешкоджають рівномірному розподілу магнітного потоку по перерізу зразка та зменшують магнітну індукцію. Тому параметри динамічної ПМГ у змінних магнітних полях відрізняються від параметрів граничної ПМГ. За малих частот намагнічування втратами на вихрові струми можна знехтувати на відміну від втрат на гістерезис. Але з підвищенням частоти вплив вихрових струмів зростає. В перших роботах під час дослідження матеріалів за параметрами динамічної ПМГ часто застосовували осцилографічний спосіб через наочність та можливість візуально спостерігати динамічні петлі гістерезису досліджуваного матеріалу, використовуючи суцільний зразок ферромагнітного матеріалу тороїдальної форми [6, 7]. Метод магнітного аналізу ферромагнітних матеріалів приставним магнітним перетворювачем використовували в працях [8, 9], де досліджували динамічну коерцитивну силу на робочій частоті 50 Гц. Автори підкреслили, що динамічна коерцитивна сила у деяких

випадках може бути інформативнішою за коерцитивну силу, отриману за умов статичного намагнічування до стану магнітного насичення.

Нижче подано результати розробки комп'ютеризованого пристрою для магнітного структурного аналізу і діагностики феромагнітних матеріалів за параметрами динамічної ПМГ з використанням локального приставного магнітного перетворювача.

Розробка пристрою для вимірювання параметрів динамічної петлі магнітного гістерезису. Розроблений пристрій (рис. 1) складається з генератора синусоїдальних сигналів низької частоти, підсилювача струму намагнічування, давача струму, експериментального перетворювача, АЦП, комп'ютера. Сигнал низької частоти (50 Гц) із генератора подавали на підсилювач, потім через давач струму на обмотку намагнічування перетворювача. Із вимірювальної обмотки магнітного перетворювача знімали сигнал (напругу) і подавали на перший канал АЦП, а на інший – сигнал від давача струму. Після аналогово-цифрового перетворення цих сигналів вони надходили у персональний комп'ютер (ПК), де їх обробляли, вимірювали та візуалізували.

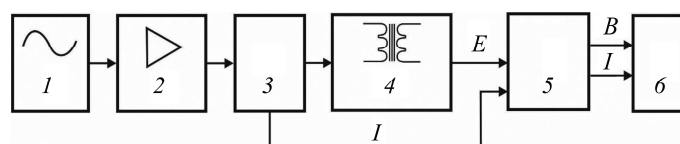


Рис. 1. Структурна схема пристрою для дослідження динамічної ПМГ: 1 – генератор, 2 – підсилювач, 3 – давач струму, 4 – магнітний перетворювач, 5 – АЦП, 6 – ПК.

Магнітний перетворювач виконано у вигляді П-подібного електромагніту із обмотками намагнічування та вимірювання (рис. 2). Довжина його контактної частини 30 мм, ширина 17 мм.

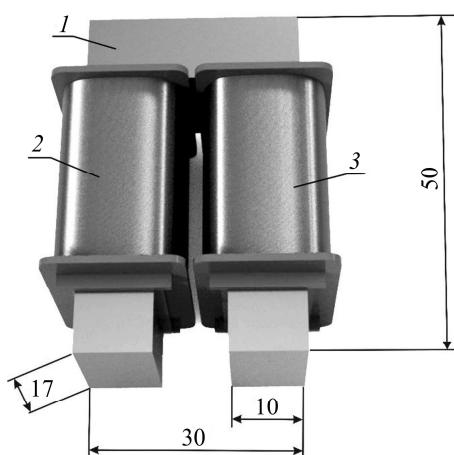


Рис. 2. Приставний первинний магнітний перетворювач: 1 – П-подібне осердя із обмоткою намагнічування 2 та вимірювання 3, відповідно.

Вимірювальна обмотка магнітного перетворювача має 800 витків з мідного емаль-проводу ПЕВ-2 на каркасі з електротехнічного картону ЭВ ГОСТ 2824-86-Г. Обмотка намагнічування перетворювача має 2000 витків. Напруженість магнітного поля H розраховували за відомою формулою для ідеальної обмотки із замкненим осердям [6] (під час розрахунку нехтували впливом вихрових струмів, наявністю потоків розсіювання та можливим зазором між осердям перетворювача та досліджуванним матеріалом), яка має вигляд $H = IW/l_{cp}$, де I – струм в обмотці,

W – кількість витків обмотки намагнічування; l_{cp} – довжина середньої силової лінії за встановлення перетворювача на метал дослідження.

На магнітний перетворювач подавали струм 20,7 мА частотою 50 Гц, що відповідало полю намагнічування 300 А/м. Електрорушійну силу індукції E у вимірювальній обмотці перетворювача можна визначити за допомогою виразу $E = -d\psi/dt$, де ψ – потокозчеплення вимірювальної обмотки. Для осердя з площею перетину S_n та кількістю витків W_2 потокозчеплення визначають виразом $\psi = \Phi W_2 = BS_n W_2$, де Φ – магнітний потік. Відповідно електрорушійна сила становить $E = -S_n W_2 dB/dt$. Тобто напруга у вимірювальній обмотці магнітного перетворювача пропорційна не магнітній індукції B , а часовій похідній dB/dt . Тому для побудови динамічної ПМГ необхідно проінтегрувати вихідний сигнал вимірювальної обмотки магнітного перетворювача [10].

На першому етапі використовували генератор типу ГЗ-112 у синусоїдальному режимі, який дає змогу сформувати частоту намагнічування 50 Гц. Для підсилення сигналу намагнічування, який подають на відповідну обмотку магнітного перетворювача, використали стандартні блоки АІ7293. Основні характеристики підсилювача такі: напруга живлення – 12...50 В, діапазон частот від 20 Гц до 20 кГц, потужність 140 Вт. Як давач струму використали електричний шунт з опором 200 Ом та потужністю 5 Вт. Для аналого-цифрового перетворення сигналу з виходу вимірювальної обмотки застосували швидкодіючий 4-канальний АЦП типу Е20-10, який забезпечує безперервний збір даних на частотах до 10 МГц. При цьому використали тільки 2 канали: один для сигналу струму в обмотці намагнічування, другий для напруги вимірювальної обмотки.

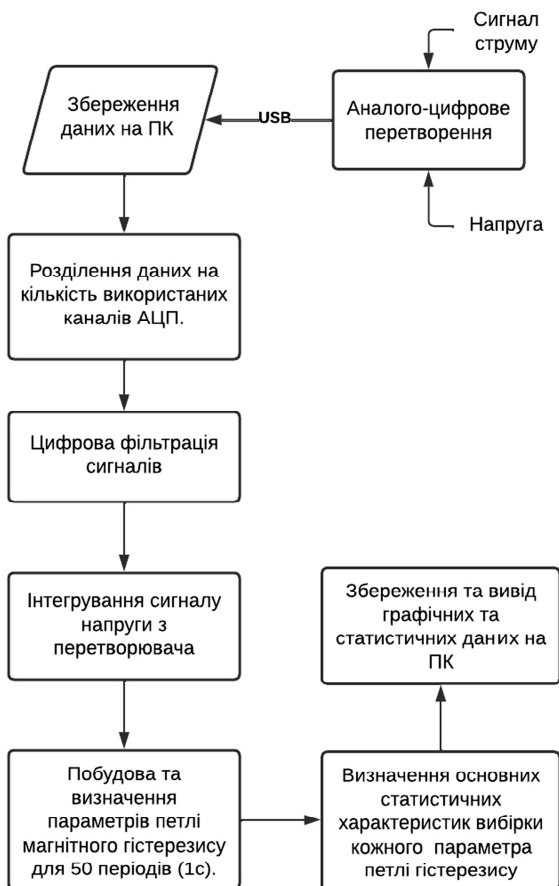


Рис. 3. Алгоритм роботи спеціалізованої програми для визначення параметрів ПМГ.

Первинну обробку сигналів, візуалізацію ПМГ та розрахунок її параметрів виконували за допомогою розробленої спеціалізованої програми на мові LabVIEW, алгоритм роботи якої подано на рис. 3. Вихідні сигнали струму намагнічування та напруги вимірювальної обмотки через шину USB надходять у комп'ютер, де їх зберігають, розділяють на канали та фільтрують для вилучення високочастотних завад частотою більше 100 Гц. Крім того, програма формує вихідний інтерфейс розробленого пристрою для аналізу динамічної ПМГ, який висвітлює інформацію про її форму та сигналів струму намагнічування і вимірювальної обмотки (рис. 4). При цьому сигнали струму намагнічування (крива 1) та вимірювальної обмотки (крива 2) подаються у верхній частині інтерфейсу пристрою.

Програма забезпечує визначення параметрів динамічної ПМГ, а саме: половину максимальної ширини ПМГ по осі напруженості магнітного поля H_{\max} , половину максимальної висоти ПМГ по осі індукції B_{\max} , динамічну коерцитивну силу H_c , динамічну залишкову індукцію B_r та площу S . Отримані дані виводять на екран та зберігають у пам'яті ПК. Для зменшення завад при визначенні параметрів ПМГ усереднювали за 50 циклами намагнічування. Останнє обмежує, певною мірою, час необхідний на дослідження та обчислення ПМГ, який тут становить 1 с.

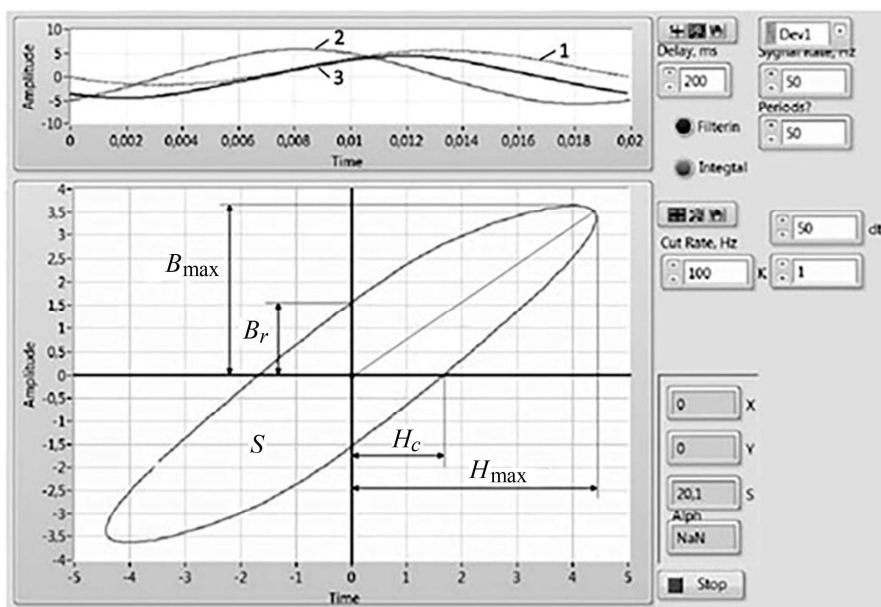


Рис. 4. Інтерфейс розробленого пристрою з побудованою динамічною ПМГ:
 1 – струм намагнічування; 2 – сигнал вимірювальної обмотки;
 3 – сигнал вимірювальної обмотки після інтегрування.

Випробовували пристрій разом з тестуванням розробленої програми, використовували зразки із листової сталі 09Г2С завтовшки 4 мм, в яких методом 4-точкового навантаження створено одновісні напруження розтягу.

Результати перевірки динамічної ПМГ для навантаженого (рис. 5а) та розвантаженого (рис. 5б) зразків свідчать про чутливість її площі до механічних напружень розтягу, оскільки вона під час навантаження зростає з 14,8 до 16,8 мТ·А/м. Інші параметри ПМГ також зазнають змін та вимагають подальших досліджень.

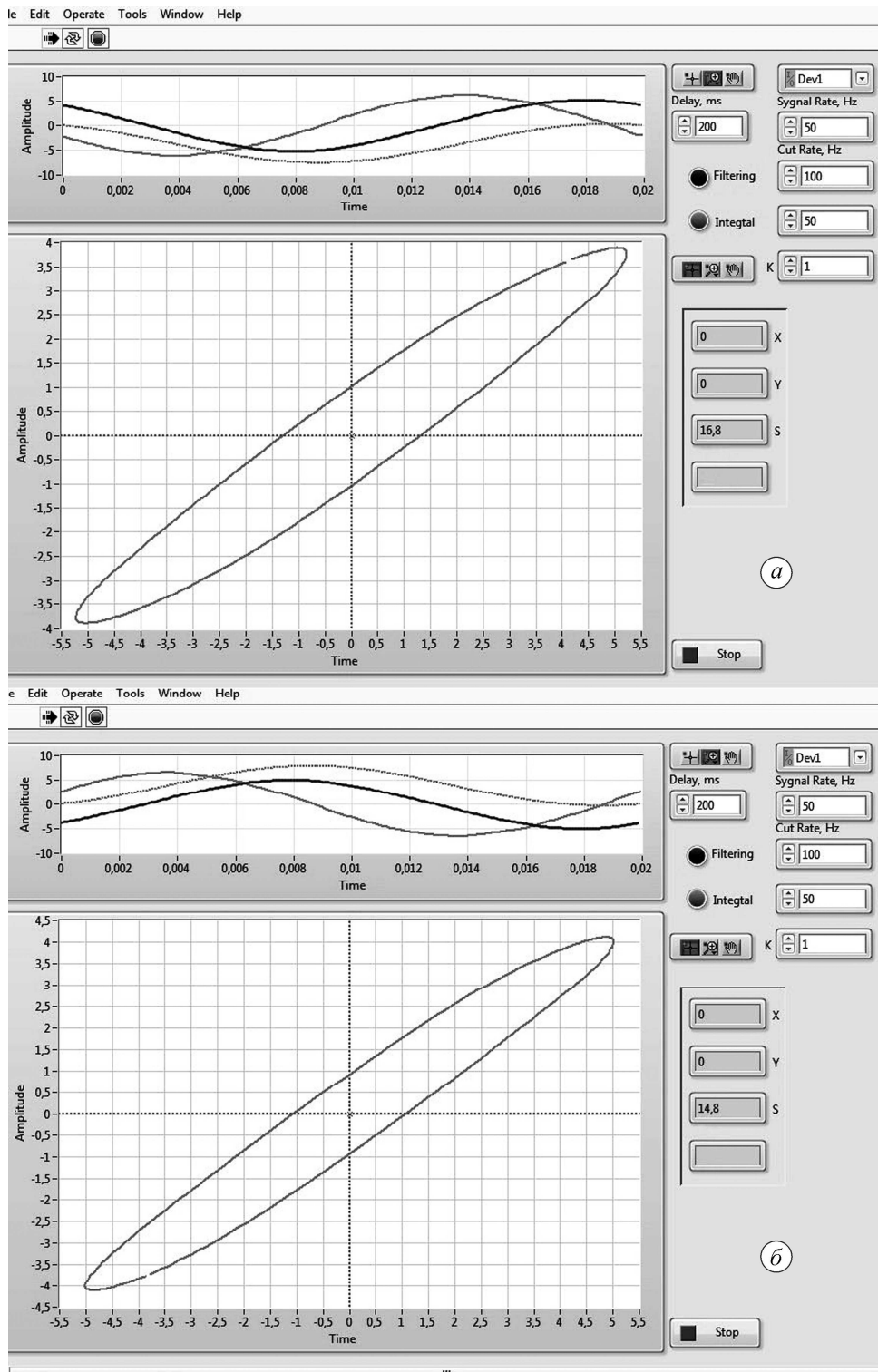


Рис. 5. Динамічні ПМГ сталі 09Г2С за механічних напружень розтягу 224 МПа (а) і у розвантаженому стані (б).

Подальше вдосконалення розробленого пристрою передбачає поліпшення локальності контролю через зменшення розмірів приставного магнітного пере-

творювача для дослідження розподілу структурних змін у зоні термічного впливу зварних швів. Буде досліджено зміни параметрів динамічної ПМГ для сталей різного типу, які підлягали термообробкам та деформаціям різного типу. Передбачають також використання програми обробки сигналів на мові Python через відкриту ліцензію та меншу вибагливість до ресурсів комп'ютера, що дасть змогу збільшити його швидкодію.

ВИСНОВКИ

Запропоновано пристрій для дослідження параметрів динамічної ПМГ, який складається із генератора, підсилювача струму намагнічування, давача струму, приставного магнітного перетворювача, АЦП та ПК. Отримано динамічні ПМГ, що дозволило визначити її параметри: половину максимальної ширини ПМГ по осі напруженості магнітного поля H_{\max} , половину максимальної висоти ПМГ по осі індукції B_{\max} , коерцитивну силу, залишкову індукцію B_r та площу динамічної ПМГ S . Випробували розроблений пристрій і показали чутливість площі динамічної ПМГ зразків із листової сталі 09Г2С до механічних напружень розтягу під час одновісного навантаження.

1. Kwun, H.; Burkhart, G.L. Effects of Grain Size, Hardness, and Stress on the Magnetic Hysteresis Loops of Ferromagnetic Steels. *J. Appl. Phys.* 1987, 61(4), 1576–1579. <https://doi.org/10.1063/1.338093>
2. Uchanin, V.; Ostash, O.; Nardoni, G.; Solomakha, R. Coercive Force Measurements for Structural Health Monitoring. In *The Fundamentals of Structural Integrity and Failure*; Wilcox, R.M. Ed. Nova Science Publishers, 2020, pp. 163–192. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.040>
3. Uchanin, V.; Ostash, O. Development of electromagnetic NDT methods for structural integrity assessment. *Procedia Structural Integrity.* 2019, 16, 192–197. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.040>
4. Bida, G.V.S.; Nichipuruk, A.P. Coercive Force Measurements in Nondestructive Testing. *Russ. J. of Nondestructive Testing.* 2000, 36, 707–727. <https://doi.org/10.1007/BF02759255>
5. Tumanski, S. *Handbook of Magnetic Measurements*; CRC Press: Boca Raton, 2011.
6. Schmidt, N.A. Simple method to determine dynamic hysteresis loops of soft magnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics.* 1996. 32(2), 489–496. <https://doi.org/10.1109/20.486537>
7. Lord, H.W. Dynamic hysteresis loop measuring equipment. *Electrical Engineering.* 1952, 71(6), 518–521. <https://doi.org/10.1109/EE.1952.6437533>
8. Tomas, I.; Non-destructive magnetic adaptive testing of ferromagnetic materials, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2004, 268, 178–185. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(03\)00496-7](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(03)00496-7)
9. Vertesya, G.; Meszaros, I.; Tomas, I. Nondestructive indication of plastic deformation of cold-rolled stainless steel by magnetic minor hysteresis loops measurement. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2005, 285, 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.08.006>
10. Quondam, A.S.; Fulginei, F.R.; Lozito, G.M.; Faba, A.; Salvini, A.; Bonaiuto, V.; Sargeni, F. Computing Frequency-Dependent Hysteresis Loops and Dynamic Energy Losses in Soft Magnetic Alloys via Artificial Neural Networks. *Mathematics.* 2022, 10, 2346. <https://doi.org/10.3390/math10132346>

Одержано 28.08.2023