

КОЕРЦИТИВНА СИЛА ДВОШАРОВИХ ФЕРОМАГНЕТНИХ МАТЕРІАЛІВ

В. Г. Рибачук, В. М. Учанін

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

E-mail: vgrybachuk@gmail.com

Розглянуто особливості вимірювання коерцитивної сили (КС) неоднорідних феромагнетних матеріалів, зокрема шаруватих. Введено поняття ефективної КС таких матеріалів. На основі аналізу моделі перемагнечування двошарового феромагнетного матеріалу з однаковою товщиною шарів приставним давачем з П-подібним осердям отримано аналітичний вираз його ефективної КС. Показано, що вона залежить не тільки від КС окремих шарів, але також і від їх залишкової індукції. Експериментально перевірено отримані результати на дослідних зразках зі сталей 08кп і Ст3. Показано, що розбіжність між розрахунковим значенням ефективної КС двошарового феромагнетного матеріалу із вказаних сталей і результатами вимірювань становить ~ 3%. Це підтверджує коректність аналітичних розрахунків.

Ключові слова: *неруйнівний контроль, двошаровий феромагнетний матеріал, петля гістерезису, коерцитивна сила, залишкова індукція.*

COERCIVE FORCE OF DOUBLE LAYER FERROMAGNETIC MATERIALS

V. G. Rybachuk, V. M. Uchanin

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

Peculiarities of the coercive force (CF) measuring of inhomogeneous ferromagnetic materials, in particular layered ones, are considered. The concept of effective CF of layered ferromagnetic materials is introduced. The analysis of the magnetic fluxes distribution in a double layer ferromagnetic material during its reversal magnetization by an attachable transducer with a U-shaped core made of soft magnetic material is carried out. An analytical expression of the effective CF for such class of materials for the case of the same layers' thickness and linear approximation of their demagnetization curves is obtained. It was found that the effective CF of a double layer ferromagnetic material is determined not only by the CF of its individual layers, but also by the values of their residual induction. Experimental verification of the obtained results was performed on experimental samples, which were collected from steel 08kp (sample № 1) and steel St3 (sample № 2) plates. Each of the samples was a stack of 6 plates each measuring 87×50×1 mm. With tight compression of the plates and complete elimination of the gaps between them, these samples can be considered as single layer ferromagnetic structures with a thickness of 6 mm. To model a double layer ferromagnetic material with the same layer thickness, sample № 3 was used. Its the upper part consisted of the three steel 08kp plates and the lower part – of the three steel St3 plates. To measure the magnetic parameters of these samples the KRM-Ts-MA type magnetic analyzer was used. The device permit to measure the CF, residual induction and other parameters of the hysteresis loops of ferromagnetic materials in the closed magnetic circuit by attachable type transducers with U-shaped core. The transducer used with the magnetic analyzer during the experiments had poles with an area of 16×32 mm and the distance between the edges of the poles: inner – 32 mm, outer – 64 mm. It is shown that the discrepancy between the calculated value of the effective CF of the double layer ferromagnetic material (sample № 3) from steel 08kp and St3 according to the obtained expression and the measurement results is about 3%. This confirms the adequacy of the proposed model of reversal magnetization of double layer ferromagnetic material and the correctness of analytical calculations.

Keywords: *non-destructive testing, double layer ferromagnetic material, hysteresis loop, coercive force, residual induction.*

© В. Г. Рибачук, В. М. Учанін, 2021

Вступ. Одним із ефективних методів неруйнівного контролю (НК) виробів з феромагнетних матеріалів є контроль на основі вимірювань коерцитивної сили (КС). Це пов'язано з чутливістю цього магнетного параметра до структури матеріалу та його механічних характеристик. Методи коерцитиметрії застосовують для широкої номенклатури конструкційних матеріалів: сталі, чавуни, спечені тверді сплави, литі постійні магнети тощо. Традиційно для НК виробів зі сталей та чавунів використовують коерцитиметри-структуроскопи з давачами у вигляді електромагнетів з П-подібними осерддями. За їх допомогою сортують матеріали за марками, контролюють твердість, міцність, визначають товщину загартованого або цементованого шару, якість термічної та хіміко-термічної обробки, оцінюють втомний стан і залишковий ресурс металоконструкцій тощо [1–9]. Результати новітніх досліджень показують перспективність застосування методів коерцитиметрії конструкційних феромагнетних матеріалів магнетними структуроскопами з накладними П-подібними давачами також для оцінки структурної цілісності матеріалів та напруженого стану металоконструкцій. Зокрема, встановлені закономірності зміни КС сталей марок 12Х1МФ та 15Х1М1Ф паропроводів електростанцій за їх тривалої експлуатації, на основі яких можна оцінювати залишковий ресурс цих об'єктів. Також показана можливість оцінки на основі вимірювання КС напруженого стану елементів корпусів суден за тривалої експлуатації для моніторингу їх стану. Перевагою коерцитиметричного НК в останньому випадку є те, що його можна здійснювати без зняття захисних лакофарбових покривів [10].

У зв'язку з цим актуальне подальше удосконалення засобів вимірювання КС конструкційних матеріалів з П-подібними накладними давачами з урахуванням особливостей нових видів конструкційних матеріалів. До таких, зокрема, належать шаруваті феромагнетні матеріали, які складаються з кількох шарів з відмінними магнетними параметрами.

Стан проблеми і формулювання задачі. У відомих дослідженнях, присвячених різним аспектам магнетного НК на основі вимірювання КС, об'єм матеріалу об'єкта контролю, з яким взаємодіє давач коерцитиметра, розглядають як однорідне середовище, де магнетні параметри, у тому числі КС, є однакові [1, 11]. При цьому покази приладу відносять до всіх точок вказаного об'єму. Проте реальним конструкційним матеріалам притаманна неоднорідність їх фізичних параметрів, зокрема і КС. Тому покази коерцитиметра мають інтегральний характер і відображають значення КС, яке є еквівалентом у всіх точках об'єму феромагнетного матеріалу, з яким взаємодіє давач коерцитиметра. Це значення КС у подальшому називатимемо ефективною КС. Наочніше ця проблема постає за коерцитиметричного контролю шаруватих феромагнетних матеріалів, де окремі шари мають різні значення КС. При цьому виникає питання про зв'язок показів коерцитиметра, які відображають ефективну КС контрольованої ділянки шаруватого феромагнетного матеріалу, зі значеннями КС окремих шарів цієї ділянки матеріалу. У найпростішому випадку йдеться про коерцитиметричний контроль двошарового феромагнетного матеріалу.

Мета дослідження – отримати зв'язок між ефективною КС двошарового феромагнетного матеріалу та магнетними параметрами його окремих шарів.

Ефективна КС двошарового феромагнетного матеріалу. Спочатку розглянемо частковий випадок шаруватого матеріалу, який складається з двох феромагнетних шарів однакової товщини (рис. 1). Верхній шар, де встановлено давач коерцитиметра з П-подібним осерддям, позначимо № 1, а нижній шар – № 2.

При цьому окремі шари перемагнечується по петлям гістерезису, які мають власні значення магнетних параметрів: КС і залишкової індукції. Для упорядкування позначень магнетним параметрам петлі гістерезису, за якою відбувається перемагнечування верхнього шару № 1 присвоєно індекс "1" (H_{c1} , B_{r1}). Відповід-

но параметри петлі гістерезису, за якою перемагнечується шар № 2, мають індекс “2” (H_{c2} , B_{r2}) (рис. 2).

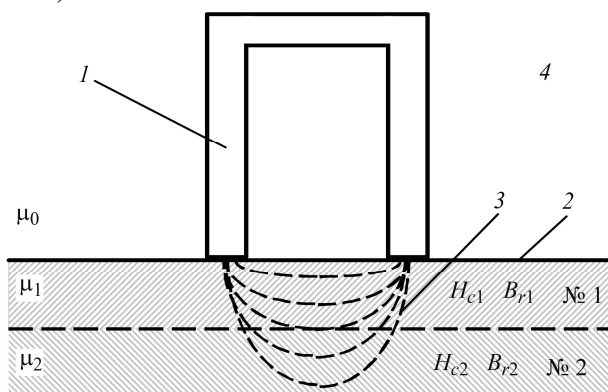


Рис. 1. Вимірювання ефективної КС двошарового феромагнетного матеріалу приставним давачем з П-подібним осердям: 1 – осердя; 2 – поверхня двошарового феромагнетного матеріалу; 3 – силові лінії магнетного поля; 4 – повітря.

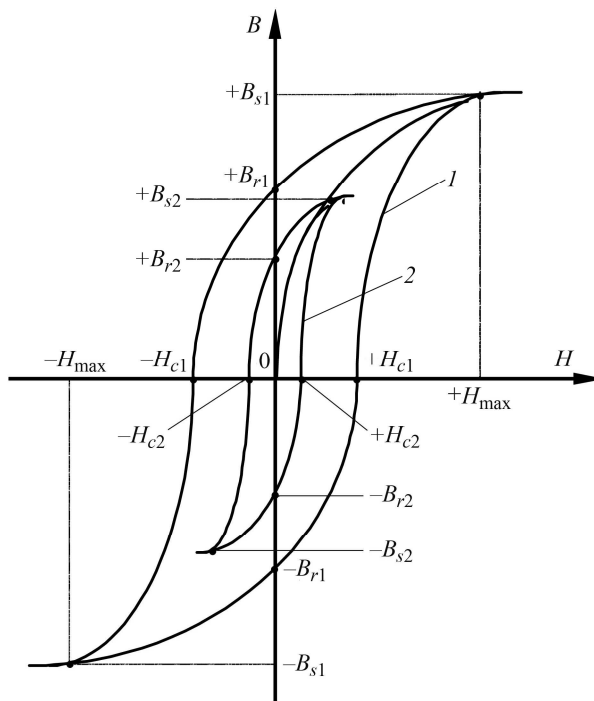


Рис. 2. Характер перемагнечування шарів двошарового феромагнетного матеріалу (за умови досягнення ними стану магнетного насичення) під час вимірювання його ефективної КС: 1, 2 – граничні петлі гістерезису першого і другого шарів відповідно; B_{s1} , B_{s2} – індукції насичення першого і другого шарів.

Для знаходження ефективної КС двошарового феромагнетного матеріалу подамо сумарний магнетний потік Φ_{Σ} , створюваний магнетною системою давача коерцитиметра у матеріалі, як суму двох потоків Φ_1 та Φ_2 , кожен з яких замикається через відповідний шар феромагнетного матеріалу:

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_1 + \Phi_2. \quad (1)$$

Для аналітичного опису кривих розмагнечування (так звані “спинки” петель гістерезису) кожного із шарів феромагнетного матеріалу використаємо лінійне наближення:

$$B_i(H) = B_{ri} + g_i H, \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

де B_{ri} – залишкова індукція i -го шару; g_i – коефіцієнт пропорційності між напруженістю магнетного поля та магнетною індукцією i -го шару.

Тоді на основі (2) вираз (1) можна подати так:

$$B(H)S_{\Sigma} = B_{r1}S_1 + B_{r2}S_2 + g_1S_1H_{c1} + g_2S_2H_{c2}, \quad (3)$$

де $S_{\Sigma} = S_1 + S_2$; S_1, S_2 – площі поперечних перерізів першого і другого шарів феромагнетного матеріалу.

Згідно з алгоритмом вимірювання КС, попередньо намагнетчений до стану магнетного насичення матеріал розмагнетчують полем протилежного напрямку до моменту, коли індукція в ньому не стане рівною нулю. Тобто повинна виконуватись умова

$$B(H_{cef2}) = 0, \quad (4)$$

де H_{cef2} – ефективна КС двошарового феромагнетного матеріалу. Це значення напруженості зовнішнього поля розмагнетчування, за якого індукція в матеріалі у зоні контролю (область між полюсами давача з П-подібним осердям) стає рівною нулю. При цьому магнетний потік Φ_{Σ} теж дорівнюватиме нулю. Тоді на основі виразів (3) і (4) справедливе таке співвідношення:

$$B(H_{cef2})S_{\Sigma} = B_{r1}S_1 + B_{r2}S_2 + g_1S_1H_{cef2} + g_2S_2H_{cef2} = 0. \quad (5)$$

Якщо прийняти, що площі поперечних перерізів обох шарів феромагнетного матеріалу рівні, тобто $S_1 = S_2 = S$, то формула (5) матиме вигляд

$$B(H_{cef2})S_{\Sigma} = (B_{r1} + B_{r2} + g_1H_{cef2} + g_2H_{cef2})S = 0. \quad (6)$$

Оскільки $S \neq 0$, то для задоволення рівності (6) обов'язковим є виконання умови

$$B_{r1} + B_{r2} + g_1H_{cef2} + g_2H_{cef2} = 0. \quad (7)$$

З виразу (7) випливає, що ефективне значення КС для двошарового феромагнетного матеріалу становить

$$H_{cef2} = -\frac{B_{r1} + B_{r2}}{g_1 + g_2}. \quad (8)$$

У виразі (8) невідомими є коефіцієнти g_1 і g_2 . Їх можна визначити так. Рівності (5) та (6) виконуються тільки тоді, коли магнетний потік відсутній в обох шарах матеріалу. Тоді повинні виконуватися такі умови:

$$B_{r1} + g_1H_{c1} = 0; \quad B_{r2} + g_2H_{c2} = 0. \quad (9)$$

З них випливає, що

$$g_1 = -\frac{B_{r1}}{H_{c1}}; \quad g_2 = -\frac{B_{r2}}{H_{c2}}. \quad (10)$$

В результаті підстановки формули (10) у (8) отримуємо:

$$H_{cef2} = -\frac{B_{r1} + B_{r2}}{\left(\frac{B_{r1}}{H_{c1}} + \frac{B_{r2}}{H_{c2}}\right)}. \quad (11)$$

Після нескладних перетворень остаточний вираз для ефективної КС двошарового феромагнетного матеріалу набуває такого вигляду:

$$H_{c\text{ef}2} = H_{c1}H_{c2} \frac{B_{r1} + B_{r2}}{B_{r1}H_{c2} + B_{r2}H_{c1}}. \quad (12)$$

Використовуючи формулу (12), можна розрахувати ефективну КС двошарового феромагнетного матеріалу з однакою товщиною шарів за магнетними параметрами окремих шарів. Проаналізувавши цю формулу, бачимо, що ефективна КС шаруватого феромагнетного матеріалу залежить не тільки від значення КС окремих шарів, але також і від їх залишкової індукції.

Експериментальні дослідження ефективної КС двошарового феромагнетного матеріалу. Щоб підтвердити коректність отриманих теоретичних результатів, їх експериментально перевірили на зразках зі сталей 08кп (зразок № 1) і Ст3 (зразок № 2). Кожен зі зразків – це пакет із шести пластин розмірами 87×50×1 мм (рис. 3). Перед вимірюванням їх розміщували на твердій плоскій діелектричній поверхні. Давач вимірювального приладу з П-подібним осердям з магнетом'якого матеріалу (на рисунку не показано) встановлювали на верхню поверхню зразка і щільно притискали до неї зі зусиллям достатнім для повного усунення зазорів між пластинами. У такому випадку вказані зразки можна розглядати як одношарові феромагнетні структури завтовшки 6 мм. Після вимірювання магнетних параметрів їх граничних петель гістерезису з пластин склали композитний зразок № 3, верхню частину – із трьох пластин сталі 08кп, а нижню – із трьох пластин сталі Ст3 (рис. 4). За відсутності повітряних проміжків між пластинами його можна розглядати як двошарову феромагнетну структуру з однакою товщиною шарів. Давач розміщували на верхній поверхні зразка і щільно притискали до неї.

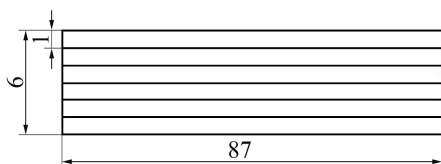


Рис. 3.

Рис. 3. Структура зразків № 1 (сталь 08кп) і № 2 (сталь Ст3) (6×1 мм).

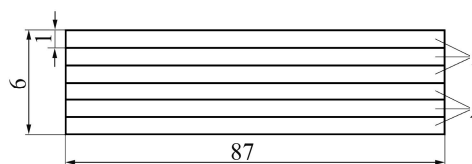


Рис. 4.

Рис. 4. Структура двошарового зразка № 3 із композиції сталей 08кп і Ст3:
1 – пластини сталі 08кп (3×1 мм); 2 – сталі Ст3 (3×1 мм).

Для вимірювання КС та залишкової індукції описаних зразків використовували магнетний аналізатор КРМ-Ц-МА, розроблений НВФ “Спеціальні наукові розробки” (м. Харків) [11]. Прилад дозволяє вимірювати КС, залишкову індукцію та інші параметри петель гістерезису феромагнетних матеріалів у замкнутому магнетному колі за допомогою приставних (накладних) давачів з П-подібним осердям різних розмірів. Використаний під час вимірювань давач мав полюси площею 16×32 мм і відстань між їхніми краями 32 мм (внутрішні) і 64 мм (зовнішні).

Результати вимірювань КС і залишкової індукції зразків № 1–№ 3 подані у таблиці. Індексом “*meas*” позначені експериментально виміряні ефективні значення магнетних параметрів зразка № 3.

На основі виміряних значень КС і залишкової індукції однорідних зразків № 1 і № 2 отримали розрахункове значення ефективної КС двошарового феромагнетного зразка № 3 згідно з формулою (12). Воно дорівнює $H_{c\text{ef}cal} = 205$ А/м. Різниця між ним і виміряним значенням ефективної КС $H_{c\text{ef}meas}$ становить ~ 3%, що підтверджує адекватність запропонованої моделі двошарового феромагнетного матеріалу для визначення ефективної КС.

**Виміряні магнетні параметри зразків № 1 (сталь 08кп), № 2 (сталь Ст3)
та № 3 (композиція зі сталей 08кп та Ст3)**

Зразок № 1		Зразок № 2		Зразок № 3	
H_{c1} , А/м	B_{r1} , Т	H_{c1} , А/м	B_{r1} , Т	$H_{c\text{ ef meas}}$, А/м	$B_{r\text{ ef meas}}$, Т
157	0,046	253	0,074	199	0,057

ВИСНОВКИ

Введено поняття ефективної КС шаруватих феромагнетних матеріалів, окремі шари яких мають однакову товщину і різні значення коерцитивної сили і залишкової індукції. На основі аналізу розподілу магнетних потоків у двошаровому феромагнетному матеріалі за його перемагнечування приставним давачем з П-подібним осердям отримано аналітичний вираз його ефективної КС за однакової товщини шарів і лінійної апроксимації їх кривих розмагнечування. При цьому встановлено, що ефективна КС двошарових феромагнетних матеріалів залежить не тільки від КС окремих шарів, але також і від їх залишкової індукції. Експериментально перевірено отримані результати на дослідних зразках, складених з пластин сталей 08кп і Ст3. Для вимірювання магнетних параметрів петель гістерезису вказаних зразків використовували магнетний аналізатор КРМ-Ц-МА. Показано, що розбіжність між розрахунковим значенням ефективної КС згідно з отриманим виразом і результатами вимірювань становить ~ 3%. Це підтверджує адекватність запропонованої моделі перемагнечування двошарового феромагнетного матеріалу та коректність аналітичних розрахунків.

1. Герасимов, В.Г.; Покровский, А.Д.; Сухоруков, В.В. Электромагнитный контроль: Практ. пособие; Сухоруков, В.В., Ред.; *Не разрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3; Высшая Школа, Москва, 1992*, 312.
2. Михеев, М.Н.; Горкунов, Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля, *Наука, Москва, 1993*, 256.
3. Bida, G.V.; Nichipuruk, A.P. Coercive Force Measurements in Nondestructive Testing, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, **2000**, 36(10), 707–727. <https://doi.org/10.1007/BF02759255>
4. Bida, G.V.; Nichipuruk, A.P.; Tsar'kova, T.P. Magnetic Properties of Steels after Quenching and Tempering. I. General. Carbon Steels, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, **2001**, 37(2), 79–99. <https://doi.org/10.1023/A:1016767721717>
5. Bida, G.V.; Nichipuruk, A.P.; Tsar'kova, T.P. Magnetic Properties of Steels after Quenching and Tempering. II. Low-Alloyed Steels, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, **2001**, 37(2), 100–115. <https://doi.org/10.1023/A:1016719805787>
6. Bida, G.V. Magnetic Properties of a Body as Nondestructive Testing Parameters of Tempering Quality of Quenched Steels (a Review), *Russian Journal of Nondestructive Testing*, **2002**, 38(6), 412–424. <https://doi.org/10.1023/A:1022122809006>
7. Безлюдько, Г.Я. Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом, *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2003**, 2, 20–26.
8. Ul'yanov, A.I.; Chulkina, A.A. Magnetic Properties of Cementite and The Coercive Force of Carbon Steels After Plastic Deformation and Annealing, *The Physics of Metals and Metallography*, **2009**, 107(5), 439–448. <https://doi.org/10.1134/S0031918X09050044>
9. Ostash, O.P.; Vol'demarov, O.V.; Hladysh, P.V. Diagnostics of the Structural-Mechanical State of Steels of Steam Pipelines by the Coercimetric Method and Prediction of Their Service Life, *Materials Science*, **2014**, 49(5), 667–680. <https://doi.org/10.1007/s11003-014-9661-3>
10. 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>
11. Uchanin V.; Ostash O.; Nardoni G.; Solomakha R. Coercive Force Measurements for Structural Health Monitoring, *The Fundamentals of Structural Integrity and Failure*; Wilcox, R.M., Ed.; *Nova Science Publishers, New York, 2020*, Chapter 5, 193–222.

Одержано 30.08.2021