

УДК 620.179.14

РЕКУРЕНТНА ФОРМУЛА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ КОЕРЦИТИВНОЇ СИЛИ ШАРУВАТИХ ФЕРОМАГНЕТНИХ МАТЕРІАЛІВ

В. Г. РИБАЧУК, В. М. УЧАНІН

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

Проаналізовано розподіл магнетних потоків під час перемагнечування три- і чотиришарових феромагнетних матеріалів з однаковою товщиною шарів приставними давачами з П-подібним осердям і отримано аналітичні вирази для визначення їх ефективної коерцитивної сили (КС). Обґрунтовано застосування лінійної апроксимації ділянок розмагнечування петель гістерезису окремих шарів. Встановлено в цих виразах стійкі закономірності і на їх основі запропоновано рекурентну формулу для розрахунку ефективної КС феромагнетних матеріалів, які складаються із довільної кількості шарів однакової товщини. Виявлено, що вона залежить не тільки від КС окремих шарів, але й і від їх залишкових магнетних індукцій. Експериментально перевірено отриманий вираз на дослідних зразках зі сталей 08кп і Ст3. Для вимірювання КС і залишкової індукції використано магнетний аналізатор типу КРМ-Ц-МА. Підтверджено добру узгодженість розрахункових значень ефективної КС двошарового феромагнетного матеріалу із цих сталей з результатами вимірювань (похибка не перевищує 3%).

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

The distribution of magnetic fluxes during the reversal magnetization of three- and four-layer ferromagnetic materials with the same layer thickness by attachable probes with a U-shaped core was analyzed. As result, analytical expressions for their effective coercive force (CF) have been obtained. The application of linear approximation for hysteresis loop demagnetization sections of separate layers is substantiated. The presence of stable regularities in these expressions is shown. Based on them, a recurrent formula for the effective CF of layered ferromagnetic materials, which consist of an arbitrary number of layers of the same thickness, is proposed. It is established that the effective CF depends not only on the CF of individual layers, but also on their residual magnetic inductions. An experimental verification of the obtained expression is carried out on samples of steels 08kp and Ст3. A magnetic analyzer of the KRM-Ts-MA type is used for CF and residual magnetic induction measurements. The good agreement between the calculated value of the effective CF of the two-layer ferromagnetic material of these steels according to the obtained recurrent formula and the measurement results is confirmed (the error does not exceed 3%).

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

Вступ. Найчастіше виробі з феромагнетних матеріалів контролюють, вимірюючи коерцитивну силу (КС), яка є одним із основних параметрів граничної петлі гістерезису. Ефективність такого неруйнівного контролю (НК) пов'язана з її чутливістю до структури матеріалу та його механічних характеристик. Методами коерцитиметрії контролюють сталі, чавуни, спечені тверді сплави, литі магнети тощо [1–11]. Для НК виробів зі сталей та чавунів переважно використовують

Контактна особа: В. Г. РИБАЧУК, e-mail: vgrbachuk@gmail.com

коерцитиметри-структуроскопи з давачами у вигляді електромагнетів з П-подібними осердями [1, 3, 11–13]. За їх допомогою сортують матеріали за марками, контролюють твердість, міцність, товщину загартованого або цементованого шарів, визначають якість термічної та хіміко-термічної обробок [1–11], а також оцінюють втомний стан і залишковий ресурс металоконструкцій [13–18].

Ці методи перспективні також для діагностування структурної цілісності феромагнетних матеріалів [2, 15, 16] та напруженого стану металоконструкцій [8, 13, 19]. Зокрема, встановлено закономірності зміни КС сталей марок 12Х1МФ та 15Х1М1Ф паропроводів електростанцій за тривалої експлуатації, за якими можна визначати їх залишковий ресурс [13]. Також за результатами вимірювання КС можна контролювати напружений стан елементів корпусів суден після тривалої експлуатації, не знімаючи захисні лакофарбові покриття [13, 19].

Тому актуально удосконалювати методи коерцитиметричного НК зі застосуванням приставних давачів з П-подібними осердями та розширити сфери їх використання на нові класи феромагнетних матеріалів.

Мета досліджень. У відомих публікаціях, присвячених магнетному НК на основі вимірювання КС, об'єм матеріалу об'єкта контролю (ОК), з яким взаємодіє давач коерцитиметра, розглядають як однорідне середовище, магнетні параметри якого, у тому числі КС, однакові [1, 3, 13]. Таке припущення виправдане, якщо ОК складається із матеріалу однієї визначеної марки, а якщо ж це шарувата структура з кількох феромагнетних шарів з різними значеннями магнетних параметрів, то покази коерцитиметра відповідають ефективній КС контрольованої ділянки ОК. При цьому матеріал кожного шару перемагнечується за власною петлею гістерезису. У найпростішому варіанті, коли ОК складається з двох феромагнетних шарів однакової товщини, ефективну КС описує вираз [20]

$$H_{c\text{ eff }2} = H_{c1}H_{c2} \frac{B_{r1} + B_{r2}}{B_{r1}H_{c2} + B_{r2}H_{c1}}, \quad (1)$$

де H_{c1} і B_{r1} , H_{c2} і B_{r2} – відповідні магнетні параметри петель гістерезису, за якими перемагнечуються перший та другий шари матеріалу.

Необхідно визначити ефективну КС феромагнетних матеріалів, які складаються з більш ніж двох шарів. Мета цього дослідження – отримати зв'язок між ефективною КС шаруватого матеріалу, який має довільну кількість феромагнетних шарів, та їх магнетними параметрами.

Ефективна КС матеріалів, які складаються з феромагнетних шарів однакової товщини (рис. 1). Спочатку дослідимо тришаровий феромагнетний матеріал. Для визначення його ефективної КС проаналізуємо розподіл у ньому магнетного потоку розмагнечування (після попереднього намагнечування матеріалу до насичення). Магнетні параметри граничної петлі гістерезису кожного шару різні. Основними із них є залишкові індукції B_{r1} , B_{r2} і B_{r3} та КС H_{c1} , H_{c2} і H_{c3} . Сумарний магнетний потік Φ , створюваний у матеріалі приставним давачем з П-подібним осердям, складається із трьох потоків Φ_1 , Φ_2 та Φ_3 , кожен з яких замикається через відповідний феромагнетний шар:

$$\Phi = \sum_{i=1}^3 \Phi_i, \quad (2)$$

де Φ_i – магнетний потік i -го шару.

Для визначення ефективної КС подамо магнетні потоки в кожному із трьох шарів через магнетні індукції як функції напруженості поля розмагнечування, створюваного приставним давачем. Для цього необхідно знати характер функцій-

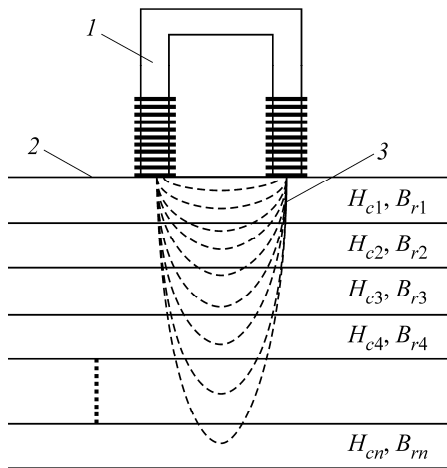


Рис. 1. Схема вимірювання ефективної КС шаруватого феромагнетного матеріалу: 1 – приставний давач з П-подібним осердям; 2 – поверхня матеріалу; 3 – силові лінії магнетного поля.

Fig. 1. The measurement scheme for effective CF of layered ferromagnetic material: 1 – attachable probe with a U-shaped core; 2 – material surface; 3 – magnetic field lines.

нальної залежності індукції від напруженості на ділянці розмагнетчування (т.зв. “спинка” петлі гістерезису). Аналіз результатів експериментальних досліджень петель гістерезису сталей різних марок засвідчив, що для більшості з них (сталь 20, 09Г2С, 30ХГСА, 40Х і Ст3) вона лінійна [21, 22]. І тільки для магнетотвердої сталі ШХ15 ділянка розмагнетчування петлі гістерезису нелінійна [22]. Отже, що магнетом’якша сталь, то лінійніша “спинка” її петлі гістерезису.

Враховуючи ці дані, “спинку” петель гістерезису окремих шарів тришарового феромагнетика подамо у вигляді лінійної залежності:

$$B_i(H) = B_{ri} + g_i H, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

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

Звідси на основі формули (3) вираз (2) можна записати так:

$$B(H)S_{\Sigma} = B(H) \sum_{i=1}^3 S_i = \sum_{i=1}^3 B_{ri} S_i + H \sum_{i=1}^3 g_i S_i, \quad (4)$$

де $S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^3 S_i$, S_i – площа поперечного перерізу i -го шару.

Згідно з алгоритмом вимірювання КС, заздалегідь намагнетчений шаруватий матеріал розмагнетчують полем протилежного напрямку до моменту, поки індукція в ньому не дорівнюватиме нулю. Тобто, має виконуватися умова

$$B(H_{c\text{eff}}) = 0, \quad (5)$$

де $H_{c\text{eff}}$ – ефективна КС шаруватого феромагнетного матеріалу, тобто напруженість зовнішнього поля розмагнетчування, коли індукція в шаруватому матеріалі у зоні контролю (ділянка між полюсами П-подібного осердя) стає рівною нулю.

При цьому магнетний потік Φ теж стає нульовим. З урахуванням цього на основі виразу (5) справедливе співвідношення

$$B(H_{c\text{eff}})S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^3 B_{ri} S_i + H_{c\text{eff}} \sum_{i=1}^3 g_i S_i = 0. \quad (6)$$

Оскільки всі три шари матеріалу однакової товщини, то і площі їх поперечних перерізів однакові, тобто $S_1 = S_2 = S_3 = S$. Звідси формула (6) набуває вигляду

$$B(H_{c\text{eff}})S_{\Sigma} = \left(\sum_{i=1}^3 B_{ri} + H_{c\text{eff}} \sum_{i=1}^3 g_i \right) S = 0. \quad (7)$$

Оскільки $S \neq 0$, то з виразу (7) випливає, що

$$\sum_{i=1}^3 B_{ri} + H_{c\text{eff}} \sum_{i=1}^3 g_i = 0. \quad (8)$$

Зі співвідношення (8) після нескладних перетворень отримуємо:

$$H_{c\text{eff}} = -\frac{\sum_{i=1}^3 B_{ri}}{\sum_{i=1}^3 g_i}. \quad (9)$$

Тут невідомі коефіцієнти g_1, g_2 і g_3 , які можна визначити з таких міркувань. Рівності (6) та (7) виконуються тільки тоді, коли магнетний потік відсутній в усіх трьох шарах матеріалу. У такому випадку повинні виконуватися умови

$$B_{ri} + g_i H_{ci} = 0, \quad i = 0, 1, 2, 3, \quad (10)$$

з яких випливає, що

$$g_i = -\frac{B_{ri}}{H_{ci}}. \quad (11)$$

У результаті підставлення (11) у вираз (9) одержимо:

$$H_{c\text{eff}} = \frac{\sum_{i=1}^3 B_{ri}}{\sum_{i=1}^3 \frac{B_{ri}}{H_{ci}}}. \quad (12)$$

Після нескладних перетворень вираз для ефективної КС феромагнетного матеріалу, який складається з трьох шарів однакової товщини, набуває остаточного вигляду:

$$H_{c\text{eff } 3} = \prod_{i=1}^3 H_{ci} \frac{\sum_{i=1}^3 B_{ri}}{\sum_{i=1}^3 B_{ri} \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^3 H_{ck}}. \quad (13)$$

Індекс “3” у лівій його частині означає, що ефективна КС стосується тришарової феромагнетної структури.

Встановлено, що ефективну КС чотиришарового феромагнетного матеріалу з однаковою товщиною шарів описує формула

$$H_{c\text{eff } 4} = \prod_{i=1}^4 H_{ci} \frac{\sum_{i=1}^4 B_{ri}}{\sum_{i=1}^4 B_{ri} \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^4 H_{ck}}. \quad (14)$$

Порівняння формул (13) і (14), а також виразу (1) вказує на існування в них чітких закономірностей, що дає можливість узагальнити результати, якщо контрольований матеріал складається з довільної кількості n феромагнетних шарів однакової товщини, і запропонувати рекурентну формулу для обчислення ефективної КС такого матеріалу:

$$H_{c\text{ eff } n} = \prod_{i=1}^n H_{ci} \frac{\sum_{i=1}^n B_{ri}}{\sum_{i=1}^n B_{ri} \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n H_{ck}}. \quad (15)$$

Експериментальні дослідження ефективної КС шаруватих феромагнетних матеріалів. Для підтвердження правильності теоретичних результатів виконали їх експериментальну перевірку. Для цього використовували три види зразків феромагнетних матеріалів: зі сталі 08кп (№ 1), зі сталі Ст3 (№ 2) та композитний (№ 3), верхня частина якого складалася із пластин сталі 08кп, а нижня – сталі Ст3. Зразки № 1 і 2 представляли собою пакети зі шести пластин відповідної марки сталі розмірами 87×50×1 mm (рис. 2а), зразок № 3 – пакет із трьох пластин сталі 08кп і трьох пластин сталі Ст3 (рис. 2б) Зразки заздалегідь розміщували на твердій плоскій діелектричній поверхні. Давач вимірювального приладу встановлювали на верхню поверхню зразка і щільно притискали до неї зі зусиллям, достатнім для повного усунення зазорів між пластинами. Тому зразки № 1 і 2 можна розглядати як одношарові феромагнетні структури завтовшки 6 mm, а зразок № 3 – як двошарову з однаковою товщиною шарів.

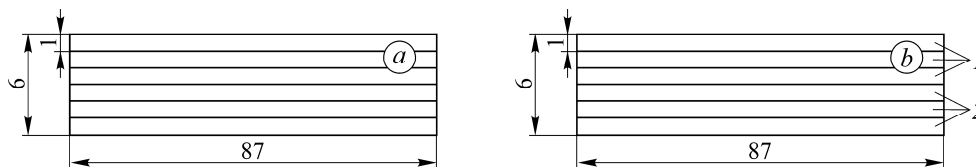


Рис. 2. Зразки № 1 і 2 (а) та № 3 (б): 1, 2 – три пластини зі сталей 08кп та Ст3, відповідно.

Fig. 2. Samples № 1 and 2 and № 3 (b): 1, 2 – three plates of steels 08kp and Ст3, respectively.

КС та залишкову індукцію зразків визначали магнетним аналізатором КРМ-Ц-МА [13], який вимірює параметри петель гістерезису феромагнетних матеріалів (у т.ч. КС і залишкову індукцію) у замкненому магнетному колі за допомогою приставних давачів з П-подібним осердям різних розмірів. Площа полюсів використаного давача 16×32 mm, відстань між їх внутрішніми краями 32 mm, а між зовнішніми 64 mm.

**Магнетні параметри однорідних зразків
№ 1 (сталь 08кп), № 2 (сталь Ст3)
та двошарового № 3 з цих сталей**

Зразок № 1		Зразок № 2		Зразок № 3	
H_{c1} , А/м	B_{r1} , Т	H_{c2} , А/м	B_{r2} , Т	$H_{c\text{ eff } meas}$, А/м	$B_{r\text{ eff } meas}$, Т
157	0,046	253	0,074	199	0,057

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

За КС і залишковою індукцією зразків № 1 і 2 отримали розрахункове значення ефективної КС для двошарового феромагнетного зразка № 3 згідно з формулою (15): $H_{c\text{ eff } cal} = 205$ А/м. Різниця між ним і виміряним $H_{c\text{ eff } meas}$ не перевищує 3% , що підтверджує адекватність запропонованої моделі КС шаруватих феромагнетних матеріалів.

Значення їх ефективної КС проміжне між КС окремих шарів (див. таблицю), що є підставою виготовляти з таких матеріалів стандартні зразки з проміжними значеннями ефективної КС для метрологічного забезпечення засобів магнетного НК.

ВИСНОВКИ

На основі аналізу розподілу магнетних потоків у три- і чотиришарових феромагнетних матеріалах з однаковою товщиною шарів під час перемагнечування приставними давачами з П-подібним осердям отримано вирази для визначення їх ефективної КС. Їх узагальненням одержано рекурентний вираз для ефективної КС шаруватих феромагнетних матеріалів, які складаються з довільної кількості шарів однакової товщини. Обґрунтовано використання лінійної апроксимації ділянок розмагнечування петель гістерезису окремих шарів. Встановлено, що ефективну КС шаруватих феромагнетних матеріалів визначає не тільки КС окремих шарів, але й їх залишкова індукція. На зразках двошарового феромагнетного матеріалу, складеного із пластин сталей 08кп і Ст3, експериментально перевірено отримані результати. Порівнянням розрахункового і експериментально виміряного значень ефективної КС для шаруватого зразка зі сталей 08кп і Ст3 виявлено їх добру узгодженість (похибка не перевищує 3%), що підтверджує правильність запропонованого підходу.

1. *Неразрушающий контроль*: в 5-ти кн. Кн. 3: Электромагнитный контроль: Практ. пос. / В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, В. В. Сухоруков; под ред. В. В. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1992. – 312 с.
2. *Мухеев М. Н., Горкунов Э. С.* Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – М.: Наука, 1993. – 256 с.
3. *Неразрушающий контроль и диагностика: Справ.* / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев и др.; под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
4. *Bida G. V. and Nichipuruk A. P.* Coercive force measurements in nondestructive testing // *Russian J. of Nondestructive Testing*. – 2000. — **36**, № 10. – P. 707–727. DOI: 10.1007/bf02759255.
5. *Bida G. V., Nichipuruk A. P., and Tsar'kova T. P.* Magnetic properties of steels after quenching and tempering. I. General. Carbon steels // *Russian J. of Nondestructive Testing*. – 2001. – **37**, № 2. – P. 79–99. DOI: 10.1023/a:1016767721717.
6. *Bida G. V., Nichipuruk A. P., and Tsar'kova T. P.* Magnetic properties of steels after quenching and tempering. II. Low-alloyed steels // *Russian J. of Nondestructive Testing*. – 2001. – **37**, № 2. – P. 100–115. DOI: 10.1023/a:1016719805787.
7. *Bida G. V.* Magnetic properties of a body as nondestructive testing parameters of tempering quality of quenched steels (a review) // *Russian J. of Nondestructive Testing*. – 2002. – **38**, № 6. – P. 412–424. DOI: 10.1023/a:1022122809006.
8. *Безлюдько Г. Я.* Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом // *Техн. диагностика и неразр. контроль*. – 2003. – № 2. – С. 20–26.
9. *Ul'yanov A. I. and 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. – P. 439–448. DOI: 10.1134/s0031918x09050044.
10. *Ostash O. P., Vol'demarov O. V., and 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. – P. 667–680. DOI: 10.1007/s11003-014-9661-3.
11. *Назарчук З. Т., Рибачук В. Г., Учанин В. Н.* Электромагнитная структуроскопия конструкционных материалов // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2011. – № 1. – С. 8–16.
12. *Bezlyud'ko G. Ya., Muzhitskii V. F., and Remezov V. B.* Series of portable structuroscope-instruments based on measuring the coercive force // *Russian J. of Nondestructive Testing*. – 2003. – **39**, № 4. – P. 289–296. DOI: <https://doi.org/10.1023/b:runt.0000009085.34384.ed>.
13. *Coercive force measurements for structural health monitoring* / V. Uchanin, O. Ostash, G. Nardoni, and R. Solomakha // *The Fundamentals of Structural Integrity and Failure. Chapter 5* / Ed.: R. M. Wilcox. – New York: Nova Sci. Publ., 2020. – P. 193–222.
14. *Bida G. V.* Размер зерна и корреляция прочностных, пластических и вязких свойств с коэрцитивной силой феррито-перлитных сталей // *Техн. диагностика и неразр. контроль*. – 2010. – № 4. – С. 40–45.

15. *Сандомирский С. Г.* Магнитный контроль структуры стальных и чугуновых изделий. Современное состояние (обзор) // *Литье и металлургия*. – 2008. – № 2. – С. 33–42.
DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2008-2-33-42>.
16. *Sandomirskii S. G.* Structural and phase sensitivity of the coercive force of a minor hysteresis loop of steel // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2014. – № 3. – P. 204–209.
DOI: 10.1134/s0036029514030094.
17. *Бондаренко А. Ю.* Об оценке остаточного ресурса сварных соединений магнитным методом для обеспечения качества сварных конструкций и изделий // *Техн. диагностика и неразр. контроль*. – 2002. – № 2. – С. 42–45.
18. *Лобанов Л. М., Бондаренко А. Ю., Бондаренко Ю. К.* Оценка сварных соединений конструкций магнитным (коэрцитивметрическим) методом для прогнозирования индивидуального остаточного ресурса // *Техн. диагностика и неразр. контроль*. – 2004. – № 1. – С. 3–8.
19. *Uchanin V. and Ostash O.* Development of electromagnetic NDT methods for structural integrity assessment // *Procedia Struct. Integrity*. – 2019. – **16**. – P. 192–197.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.040>.
20. *Рибачук В. Г., Учанін В. М.* Коерцитивна сила двошарових ферромагнетних матеріалів // *Відбір і обробка інформації*. – 2021. – **49** (125). – С. 3–8.
DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2021.49.003>.
21. *Гец В. А.* Использование феноменологической модели петли гистерезиса для моделирования магнитных свойств стали // *Физика. Технологии. Инновации: тез. докл. VI Междунар. молодежной науч. конф., посвященной 70-летию основания Физико-технологического института УрФУ (20–24 мая 2019 г., Екатеринбург)*. – Екатеринбург: Изд-во уч.-метод. центр УПИ, 2019. – С. 856–857.
22. *Гец В. А.* Исследование магнитных свойств ферромагнитных материалов с использованием математического моделирования. – 3 с.
<https://kmu.itmo.ru/file/download/application/1875> (дата звернення 01.10.2021).

Одержано 12.05.2022