

РОЗПОДІЛ ЕФЕКТИВНОЇ КОЕРЦИТИВНОЇ СИЛИ СКЛАДЕНИХ ЗРАЗКІВ ПРИ ЇЇ ВИМІРЮВАННІ ПРИСТАВНИМИ МАГНІТНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

Р.М. Соломаха^{1,2}, В.Г. Рибачук¹, В.М. Учанін¹

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: vuchanin@gmail.com

²НВФ «Спеціальні наукові розробки». 61121, м. Харків, вул. Світла, 10. E-mail: rsolomak@gmail.com

У статті представлено результати дослідження розподілу ефективної коерцитивної сили (КС) складених феромагнітних стандартних зразків, які складаються з двох однорідних зразків з різними значеннями КС, зістикованих один з одним. Для вимірювання ефективної КС у замкнутому магнітному колі використано два типи приставних П-подібних магнітних перетворювачів (МП), які підключали до магнітного аналізатора типу МА-5. Для вимірювання у розімкнутому магнітному колі використано МП типу приставного соленоїда, який працює за методом точкового полюса (МТП). Цей МП підключали до коерцитиметра-структуроскопа типу ІКС-104. Показано, що для всіх типів МП ефективна КС складених зразків (СЗ) залежить від їх положення відносно стику. З переміщенням МП відносно стику від однорідного зразка з меншою КС до однорідного зразка з більшою КС ефективна КС збільшується в діапазоні між значеннями КС цих зразків. Кількісно характер розподілу ефективної КС СЗ залежить від типу МП, його розмірів і способу їх орієнтації відносно стику для МП неосесиметричної конструкції. За паралельної орієнтації полюсів П-подібного МП відносно стику характер змін ефективної КС є плавнішим. Наявність зазору між частинами СЗ викликає зменшення ефективної КС та нестабільність її значень в області стику. Для МП одного типу зменшення їх розміру призводить до зменшення діапазону змін ефективної КС. Для МП близьких розмірів діапазон зміни ефективної КС СЗ, який вимірюється в розімкненому магнітному колі, є помітно більшим порівняно з вимірюваною у замкнутому магнітному контурі колі. Показано принципову можливість використання СЗ для метрологічного забезпечення магнітних структуроскопів, а також для моделювання двовимірної розподілу КС феромагнітних конструкцій, які характеризуються поверхневою неоднорідністю магнітних параметрів. Бібліогр.18, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: неруйнівний контроль, магнітна структуроскопія, коерцитивна сила, коерцитиметр, стандартний зразок, П-подібний магнітний перетворювач, приставний соленоїд

Вступ. Неруйнівні методи магнітної структуроскопії знаходять все ширше застосування для визначення структурно-чутливих магнітних і механічних характеристик феромагнітних сталей у металургії та машинобудуванні [1–7]. Не менш важливим є застосування цих методів для моніторингу технічного стану відповідальних сталевих конструкцій під час їх експлуатації. Сучасні методи магнітної структуроскопії феромагнітних матеріалів базуються на вимірюванні параметрів петлі магнітного гістерезису (ПМГ) під час циклічного перемагнічування [6, 8]. У якості структурочутливого параметра найчастіше використовують коерцитивну силу (КС) H_c , яка корелює з багатьма механічними параметрами матеріалу [1–3, 5, 7]. За допомогою вимірювання КС можна проводити контроль феромагнітних матеріалів з метою визначення механічних характеристик (твердість, границя міцності, границя текучості, ударна в'язкість, модуль пружності), структурних параметрів (розмір зерна, розмір включень, пористість), хімічний склад (зокрема, вміст легуючих елементів), якість термічної або хіміко-термічної обробки (глибина загартованого чи цементованого

шару, фазовий склад). Крім того, КС H_c корелює з параметрами напружено-деформованого стану, втомними структурними змінами, що дозволяє оцінювати пошкоджуваність, технічний стан і залишковий ресурс конструкцій [9, 10]. Це дозволяє проводити моніторинг відповідальних конструкцій під час їх експлуатації. Для магнітного контролю все частіше знаходять застосування й інші структурно-чутливі параметри ПМГ, у тому числі, залишкова індукція B_r , магнітна проникність μ , магнітна індукція насичення B_s та площа петлі гістерезису, яка характеризує втрати на гістерезис за один цикл перемагнічування [6, 11, 12].

Стан проблеми. Магнітну структуроскопію можна проводити у відкритому (розімкненому) або замкнутому магнітних колах [2]. Магнітні структуроскопи вимірюють інтегральне значення КС тієї локальної частини об'єкта контролю (ОК), через яку замикається магнітний потік намагнічування. Для габаритних ОК для намагнічування локальної зони найчастіше використовують приставні П-подібні магнітні перетворювачі (МП) (рис. 1) [3–6, 13].

Рибачук В.Г. – <https://orcid.org/0000-0003-4842-020X>, Учанін В.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9664-2101>
© Р.М. Соломаха, В.Г. Рибачук, В.М. Учанін, 2023

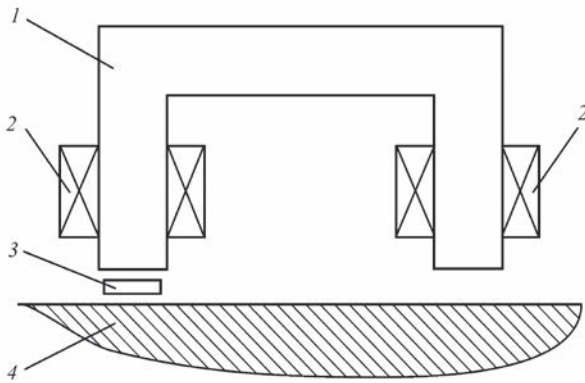


Рис. 1. Конструкція приставного П-подібного МП: 1 – П-подібне осердя; 2 – обмотки намагнічування; 3 – давач Холла для визначення магнітного потоку; 4 – ОК

Для визначення КС також використовують приставні МП, працюючі за методом точкового полюсу (МТП), який полягає у вимірювання залишкового магнітного поля деталей після короткочасного контакту одного з полюсів елемента намагнічування з поверхнею ОК [14, 15]. Принцип роботи за МТП з постійним магнітом в якості джерела поля намагнічування ілюструє МП, який подано як приклад на рис. 2. Цей МП запропонував Ф. Ферстер ще у 50-х роках минулого сторіччя [16]. У подальших розробках для побудови МП в якості елементів намагнічування найчастіше використовують приставні соленоїди. Загальним у МП, які працюють за МТП, є розташування елемента намагнічування перпендикулярно до поверхні ОК. Метод можна використовувати для

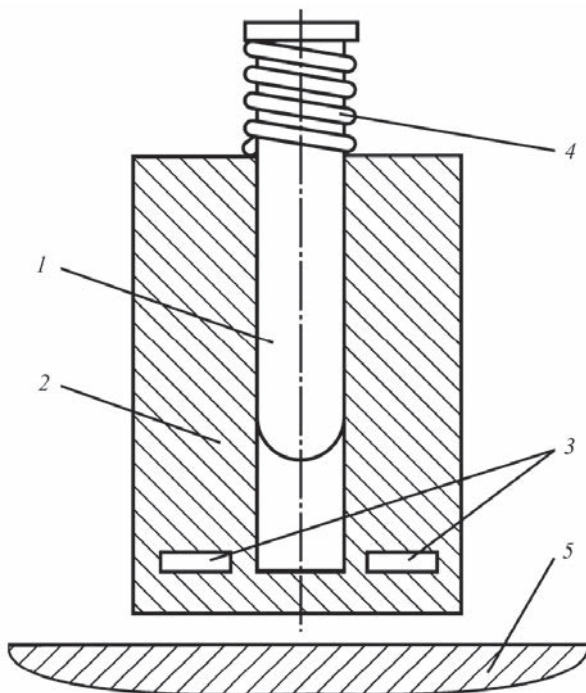


Рис. 2. Конструкція приставного МП з постійним магнітом Ф. Ферстера, який працює за МТП: 1 – постійний магніт; 2 – корпус; 3 – ферозонд-градієнтметр; 4 – пружина; 5 – ОК

контролю деталей з великим коефіцієнтом розмагнічування N , залишкове магнітне поле яких після попереднього намагнічування до стану технічного насичення пропорційне КС H_c .

Для метрологічного забезпечення магнітних аналізаторів і коерцитиметрів з приставними МП використовують стандартні зразки або міри відповідного магнітного параметра з плоскою поверхнею і заданими геометричними розмірами. Магнітні характеристики стандартних зразків зазвичай визначають за допомогою балістичних установок, у яких ці зразки складають частину замкнутого магнітного кола [17]. Метрологічне оцінювання таких стандартних зразків потребує вартісного обладнання та відповідно акредитованої лабораторії. Крім того, не завжди є можливість підібрати стабільні феромагнітні сплави із заданими параметрами ПМГ. Це спонукає до розробки простіших робочих стандартних зразків для магнітних аналізаторів з приставними МП. Один з можливих підходів пов'язаний зі створенням складених стандартних зразків, які утворюються за рахунок об'єднання в єдиній конструкції частин з різними магнітними характеристиками. Зокрема, нами раніше запропоновано стандартний зразок, який складається з клиноподібних частин (Рибачук В.Г., Учанин В.М. та ін. Стандартний зразок для настроювання та метрологічної атестації структуроскопів. України пат. 51834, 2010, Бюл. № 15). Недоліком такого стандартного зразка є необхідність прецизійного фрезування клиноподібних частин для їх точнішого прилягання без зазорів, що виявилось непростюю задачею. Аналізувалась також можливість створення шаруватих зразків КС [18]. У даній роботі для аналізу неоднорідних ОК запропоновано використати концепцію ефективного середовища, яка дозволяє для таких неоднорідних об'єктів ввести поняття ефективною КС.

У цій роботі досліджується розподіл ефективною КС складених зразків (СЗ) з метою аналізу можливості створення багатозначного СЗ у вигляді стику двох пластин із різними магнітними характеристиками.

Методика дослідження. Для досліджень використано два зразки, складені з двох однорідних зразків КР-1 (№6331) і КР-2 (№6332) з номінальними значеннями КС відповідно $H_c^{КР-1} = 370$ і $H_c^{КР-2} = 3550$ А/м. Розміри зразків КР-1 і КР-2 – $58 \times 35 \times 8$ мм. Для утворення СЗ № 1 КР-1 і КР-2 стикували між собою їх короткими (35 мм) сторонами, а для утворення СЗ № 2 – довгими (58 мм).

Для вимірювання ефективною КС цих СЗ у замкнутому магнітному колі використовували два приставні П-подібні МП, умовно позначені як 1 і 2 (рис. 3), які мали однакову конструктивну схему

(рис. 1) і відрізнялися тільки за розмірами. Їх геометричні параметри наведено у таблиці. У якості вимірювального засобу, до якого підключали ці перетворювачі, використовували магнітний аналізатор (МА) типу МА-5 (рис. 4, а). Він являє собою програмно-апаратний комплекс для вимірювання параметрів ПМГ зразків і виробів із феромагнітних матеріалів. Для проведення вимірювань МА підключали до персонального комп'ютера (ПК), на якому попередньо було встановлено та запущено спеціальну програму. За її допомогою здійснювали керування процесом вимірювань. Результати вимірювань відображалися у вікні програми у графічній формі (основна крива намагнічування, петля гістерезису і залежність магнітної проник-

ності від напруженості магнітного поля) та у вигляді чисельних результатів. Для подальшого аналізу їх зберігали у пам'яті ПК у вигляді текстового або графічного файлів. Наявна версія керуючої програми передбачає можливість вимірювання КС тільки за допомогою П-подібного МП 1. Тому при підключенні до цього приладу П-подібного МП 2 отримували чисельні значення параметрів ПМГ не відповідають їх дійсним значенням, а є відносною кількісною оцінкою в умовних одиницях.

З метою узагальнення проводили також вимірювання ефективної КС зразків № 1 і № 2 у розімкненому магнітному колі за МТП. Для цього використовували МП у вигляді приставного соленоїда з зовнішнім діаметром 35 мм (рис. 3, поз. 3), який підключали до коерцитиметра-структуроскопа ИКС-104 (рис. 4, б). Цей прилад є спеціалізованим засобом вимірювання КС магнітом'яких феромагнітних матеріалів. Оскільки його конструкція не передбачає регулювання чутливості користувачем, то результати вимірювань КС, отримані за його допомогою, виражені не у А/м, а в умовних одиницях.

Зміст досліджень полягав в отриманні розподілу ефективної КС H_c^{ef} СЗ №1 і №2 залежно від

Геометричні параметри П-подібних МП 1, 2

Назва параметра	Значення параметра, мм	
	МП 1	МП 2
Ширина полюсів П-подібного осердя, <i>a</i>	16	11
Довжина полюсів П-подібного осердя, <i>b</i>	32	20
Відстань між внутрішніми краями полюсів, <i>c</i>	32	20
Відстань між зовнішніми краями полюсів, <i>d</i>	64	42



Рис. 3. Приставні МП для локального вимірювання КС: 1 і 2 – П-подібні відповідно 1 і 2 для роботи з МА; 3 – МП приладу типу ИКС-104, який працює за МТП

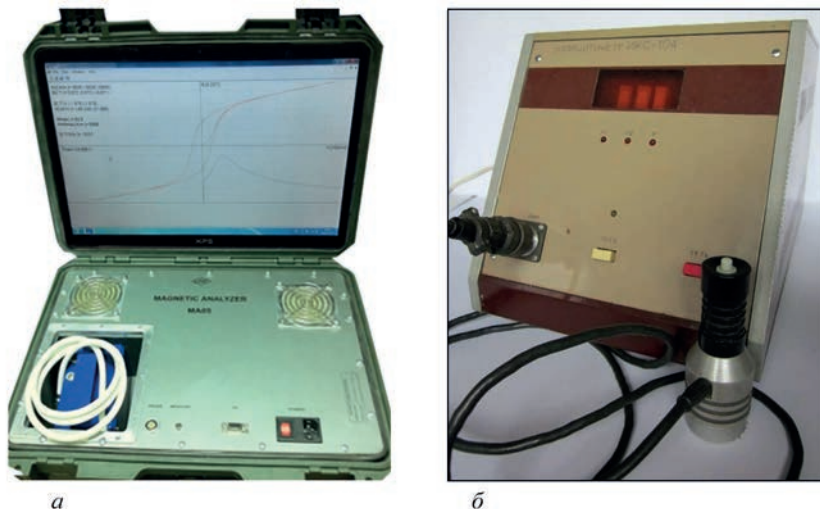


Рис. 4. Засоби вимірювання КС: а – магнітний аналізатор МА-5; б – коерцитиметр-структуроскоп ИКС-104

зміщення l між центром міжполюсного простору (надалі просто центром) П-подібних МП (рис. 5, а, б, точка O) або центром соленоїдального МП та стиком однорідних зразків КР-1 і КР-2. За початок відліку було прийнято лінію стику. Зміщення в сторону зразка КР-1 позначали знаком «-», а в сторону зразка КР-2 – «+». Схеми розміщення полюсів П-подібних МП на поверхні досліджуваних складених СЗ під час вимірювання їх ефективної КС наведено на рис. 5. Принципова відмінність між цими двома варіантами складених СЗ полягає у тому, що у випадку СЗ № 1 полюса П-подібного МП перетинають лінію стику по чергово, а у випадку СЗ № 2 – одночасно. Для МП типу приставного соленоїда (на рис. 5 не показано) внаслідок осесиметричності його конструкції обидва варіанти є ідентичними.

На результати вимірювання ефективної КС СЗ може впливати щільність прилягання однорідних зразків КР-1 і КР-2 один до одного. Тому для дослідження цього впливу між ними вводили штучний немагнітний зазор у вигляді діелектричних

прокладок різної товщини h (рис. 5, а) і досліджували ступінь впливу їх товщини h на розподіл H_c^{ef} .

За результатами проведених вимірювань ефективної КС СЗ № 1 і № 2 отримано залежності їх ефективної КС H_c^{ef} від зміщення l центру МП відносно стику, які характеризують розподіл ефективної КС досліджених СЗ.

Аналіз результатів. Характер залежностей $H_c^{ef} = f(l)|_{h=const}$ для СЗ № 1, отриманих із використанням П-подібних МП 1 і 2, свідчить про суттєвий вплив зміщення центру МП відносно стику на отриману ефективну КС (рис. 6, а, б). Для МП 1 повний діапазон зміни H_c^{ef} знаходиться в межах значень зміщення l від -20 до $+30$ мм. У ньому можна виділити п'ять чітко виражених ділянок залежно від змін H_c^{ef} при переміщенні МП. Для першої ($l = -20 \dots -10$ мм) і п'ятої ($l = +10 \dots +30$ мм) характерними є незначні зміни ефективної КС. Другій ($l = -10 \dots -5$ мм) і четвертій ($l = +2 \dots +10$ мм) відповідають помірні зміни H_c^{ef} .

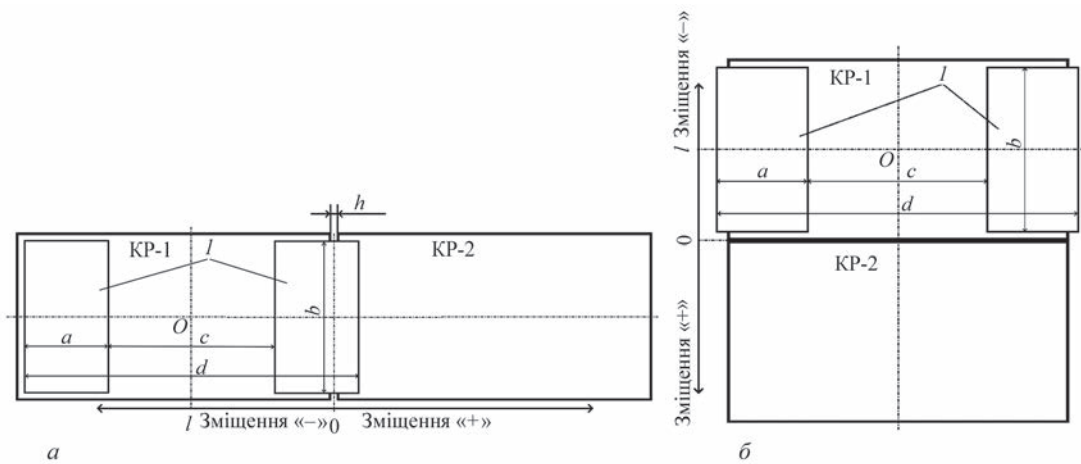


Рис. 5. Схеми вимірювання ефективної КС складених СЗ № 1 (а) та № 2 (б) з П-подібними МП 1 і 2; O – центр П-подібних МП; a, b, c і d – геометричні параметри полюсів П-подібних МП; h – товщина зазору між однорідними СЗ КР-1 і КР-2; l – зміщення МП відносно стику

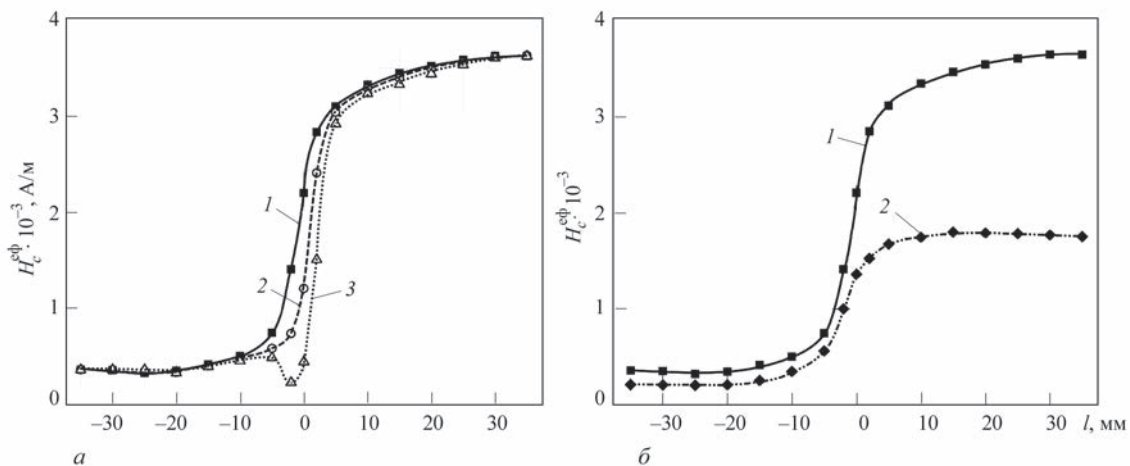


Рис. 6. Залежності ефективної КС СЗ №1 від положення П-подібних МП відносно стику: а – МП 1 за різних значень зазору між зразками КР-1 і КР-2 ($1 - h = 0, 2 - h = 0,1$ мм, $3 - h = 0,3$ мм); б – МП 1 і МП 2 за відсутності зазору ($1 -$ МП 1 в А/м, $2 -$ МП 2 в ум. од.)

І нарешті третя ділянка ($l = -5...+2$ мм) відповідає суттєвим змінам H_c^{ef} .

Незначний немагнітний зазор ($h = 0,1$ мм) між зразками КР-1 і КР-2, які утворюють СЗ № 1, якісно не змінює характер розподілу ефективної КС, але призводить до істотних кількісних змін ефективної КС в області стику ($l = -10...+5$ мм) (рис. 6, а, крива 2). Збільшення зазору до значення $h = 0,3$ мм викликає не тільки подальше зменшення H_c^{ef} , але також призводить до спотворення залежності $H_c^{ef} = f(l)|_{h=const}$, що проявляється у різкому зменшенні її значень в області стику з боку зразка КР-1 (рис. 6, а, крива 3). При цьому діапазон зміщень, у якому спостерігаються вказані зміни ефективної КС, збільшується в сторону зразка КР-2 до значень $l = -10...+25$ мм. Тобто немагнітний прошарок між однорідними зразками, з яких складається СЗ, викликає зменшення ефективної КС та нестабільність її значень поблизу стику. Для уникнення цього контактні поверхні однорідних зразків повинні бути абсолютно плоскими, відполірованими і ретельно припасованими одна до одної. Тому далі аналізуються тільки залежності ефективної КС від зміщення, отримані для стику без зазору ($h = 0$).

Аналогічну залежність $H_c^{ef} = f(l)$ отримано також для П-подібного МП 2 (рис. 6, б, крива 2), який відрізняється від МП 1 тільки меншими у $\approx 1,5$ рази розмірами (див. таблицю). Видно, що діапазон зміни ефективної КС для цього МП знаходиться в межах значень зміщення $l = -20...+10$ мм. Її порівняння з розглянутою вище аналогічною залежністю для МП 1 (рис. 6, б, крива 1) показує, що зменшення розмірів МП викликає зменшення діапазону змін ефективної КС. Причому це зменшення відбувається за рахунок ділянки, яка відповідає однорідному зразку КР-2 з більшим значенням КС. Це пояснюється більшою локалізацією зони вимірювань у МП меншого розміру, а також істотно більшим внеском висококоерцитивного зразка КР-2 у формування ефективної КС складеного СЗ порівняно з низькокоерцитивним зразком КР-1. Слід відмітити, що для кривих 1 (МП 1) і 2 (МП 2) на рис. 6, б характерною є велика ступінь симетрії відносно лінії стику. Точка симетрії відповідає значенню $l \approx -1$ мм, тобто зміщена в напрямку однорідного зразка КР-1 з меншим значенням КС.

Ефективна КС СЗ також залежить від способу перетинання лінії стику полюсами П-подібних МП. Порівняння залежностей $H_c^{ef} = f(l)$ для кожного з цих випадків (рис. 7), отриманих за допомогою П-подібного МП № 1 для СЗ № 1 (крива 1) і № 2 (крива 2), показує, що у випадку одночасного перетинання лінії стику полюсами МП (СЗ № 2) швидкість зростання H_c^{ef} є знач-

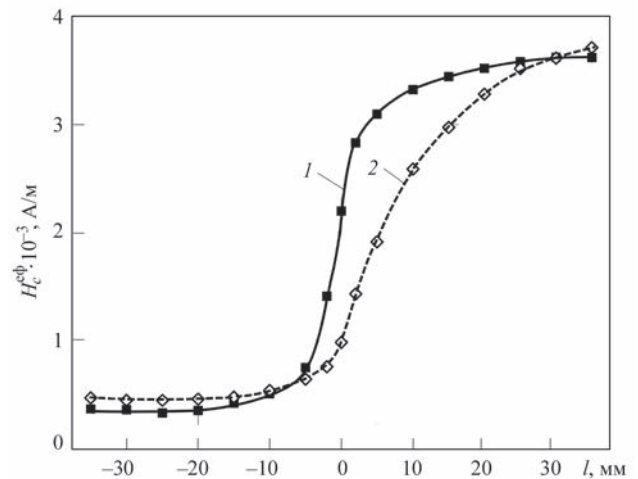


Рис. 7. Залежності ефективної КС СЗ № 1 (1) і № 2 (2) від положення П-подібного МП 1 відносно стику

но меншою. Збільшення ефективної КС відбуваються зі значно меншим градієнтом, але сама крива залежності $H_c^{ef} = f(l)$ набуває вираженої асиметрії відносно лінії стику. Діапазон змін H_c^{ef} СЗ № 2 знаходиться в межах $-10...+35$ мм і є значно зсунутим у бік однорідного зразка КР-2 з більшим значенням КС (рис. 7, крива 2). Плавніший характер залежності $H_c^{ef} = f(l)$ у СЗ № 2 порівняно з СЗ № 1 дозволяє точніше виставити П-подібний МП на задане значення КС. Тому він є придатнішим для використання для настроювання коерцитиметрів.

Розглянуті залежності $H_c^{ef} = f(l)$ відображають результати вимірювання ефективної КС у замкненому магнітному колі за допомогою приставних П-подібних МП. Для порівняння на рис. 8 показано графік аналогічної залежності для випадку вимірювань ефективної КС СЗ № 1 у розімкненому магнітному колі з використанням МП типу приставного соленоїда діаметром 35 мм, який працює за МТП. У даному випадку l є зміщенням центру МП відносно стику.

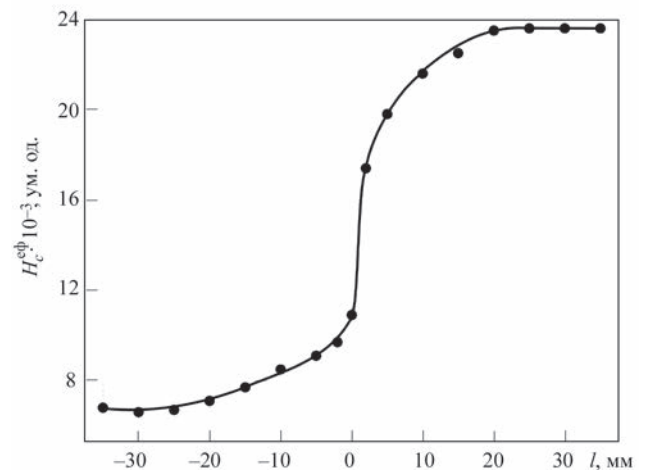


Рис. 8. Залежність ефективної КС СЗ № 1 від положення МП типу приставного соленоїда відносно стику

Характер наведеної залежності (рис. 8) якісно є подібним до графіків залежностей $H_c^{ef} = f(l)$ для СЗ № 1 (почергове перетинання полюсами лінії стику), отриманих за допомогою П-подібних МП (рис. 6 та рис. 7, крива 1). Відмінність полягає тільки у тому, що точка симетрії ($l \approx +1$ мм) трохи зсунута в протилежний бік, тобто в сторону однорідного зразка КР-2 з більшим значенням КС. Діапазон змін ефективної КС знаходиться в межах $-20...+20$ мм. У ньому можна виділити дві крайні ділянки ($l = -20...-2$ мм та $l = +5...+20$ мм), для яких характерною є помірна швидкість зміни H_c^{ef} , та центральну ділянку в околі стику ($l = -2...+5$ мм) з великою швидкістю зміни ефективної КС. Як бачимо, хоча за розмірами даний МП типу приставного соленоїда є найменшим порівняно з розглянутими раніше П-подібними МП 1 і 2, абсолютне значення діапазону змін ефективної КС, виміряної за його допомогою (40 мм), знаходиться посеред абсолютних значень аналогічних діапазонів змін H_c^{ef} для П-подібних МП 1 (50 мм) і 2 (30 мм). Це пояснюється тим, що внаслідок розімкненого характеру магнітного кола ОК – МП розміри області, яку займають створювані ним поля намагнічування та розмагнічування, є помітно більшими за розміри самого МП.

Отримані результати щодо розподілу ефективної КС досліджених СЗ показує принципову можливість їх використання в якості багатозначних зразків для перевірки роботи магнітних аналізаторів та коерцитиметрів з приставними МП різного типу. Крім того, СЗ дозволять моделювати методологічний підхід, пов'язаний з аналізом двовимірних зображень неоднорідного розподілу КС ферромагнітних конструкцій з великою площею поверхні [3].

Висновки

Досліджено розподіл ефективної КС СЗ у вигляді двох зістикованих однорідних зразків з суттєво різною КС приставними П-подібними МП різного розміру і приставним МП соленоїдального типу, який працює за МТП. Показано, що ефективна КС суттєво залежить від положення центру МП відносно стику СЗ. Якісний характер цього розподілу є однаковим для всіх досліджених МП. По мірі переміщення МП відносно стику від однорідного зразка з меншою КС до однорідного зразка з більшою КС ефективна КС збільшується в діапазоні між значеннями КС вказаних зразків. Кількісно характер розподілу ефективної КС СЗ залежить від типу МП коерцитиметра та його розмірів. Для приставних П-подібних МП розподіл ефективної КС залежить також від їх орієнтації відносно стику. За паралельної орієнтації полюсів П-подібного МП відносно стику характер зміни ефективної КС

є плавнішим. Стик не призводить до додаткових змін ефективної КС у цій зоні у випадку щільно стикованих пластин, а тому його впливом можна знехтувати. Наявність зазору між складовими частинами СЗ викликає зменшення ефективної КС і нестабільність її значень в області стику.

Для МП одного типу зменшення їх розмірів призводить до зменшення діапазону змін ефективної КС. На розміри області змін ефективної КС СЗ також впливає характер магнітного кола, у якому відбуваються вимірювання КС. Для розімкненого магнітного кола ці розміри є помітно більшими. Так, для приставного соленоїда діаметром 35 мм, який є найменшим за розмірами, ця зона складає 40 мм, що суттєво більше ніж у П-подібного МП 2 (30 мм) і менше ніж у П-подібного МП 1 (50 мм).

Отримані результати свідчать про принципову можливість використання СЗ для моделювання результатів контролю ферромагнітних конструкцій, який базується на аналізі двовимірного розподілу КС, та для метрологічного забезпечення приладів магнітної структуроскопії.

Список літератури/References

1. Kwun, H, Burkhart, G.L. (1987) Effects of grain size, hardness, and stress on the magnetic hysteresis loops of ferromagnetic steels. *Journal of Applied Physics*, 61(4), 1576–1579. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.338093>
2. Осташ О.П., Федірко В.М., Учанін В.М. та ін. (2007) *Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій*. В «Механіка руйнування і міцність матеріалів». Т.9. Панасюк В.В. ред.). Львів, Сполум.
3. Bezlyudko, G.Ya. (2003) Operational control of the fatigue condition and residual life of metal structures by nondestructive (coercimetric) method. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushiy kontrol*, 2, 20–26.
4. Bezlyudko, G., Popov, B., Solomakha, R. (2014) The metal fatigue operational monitoring using a non-destructive method of coercive force. practical and philosophical aspects. *In Proc. 11th European Conf. on Nondestructive Testing (EC-NDT 2014), Prague, Czech Republic, 6-10 October, 2014*. Available from: https://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/289_Solomakha.pdf
5. Bida, G.V., Nichipuruk, A.P. (2000) Coercive force measurements in nondestructive testing. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 36(1), 707–727. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02759255>
6. Uchanin, V., Ostash, O., Nardoni, G., Solomakha, R. (2020) *Coercive force measurements for structural health monitoring*. In *The Fundamentals of Structural Integrity and Failure*, ed. Richard M. Wilcox, Nova Science Publishers, New York, Ch. 5, pp. 163–192.
7. Uchanin, V., Ostash, O. (2019) Development of electromagnetic NDT methods for structural integrity assessment. *Procedia Structural Integrity*, 6, 192–197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.040>
8. Liu, J., Wilson, J., Davis, C.L., Peyton, A. (2019) Magnetic characterisation of grain size and precipitate distribution by major and minor BH loop measurements. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 8, 55–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.02.088>

9. Chulkina, A.A., Ul'yanov, A.I. (2009) Effect of the magnetic properties of cementite on the coercive force of high-carbon steels after quenching and tempering. *Physics of Metals and Metallography*, 108(6), 548–555. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0031918x09120059>
10. Ostash, O.P., Vol'demarov, O.V., Hladysh, P.V. (2014) Diagnostics of the structural-mechanical state of steels of steam pipelines by the coercimetric method and prediction of their service life. *Materials Science*, 49(5), 667–680. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-014-9661-3>
11. Morishita, K., Gilanyi, A., Sukegawa, T. et al. (1998) Magnetic non-destructive evaluation of accumulated fatigue damage in ferromagnetic steels for nuclear plant component. *Journal of Nuclear Materials*, 258 (Part 2), 1946–1952. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0022-3115\(98\)00150-0](https://doi.org/10.1016/s0022-3115(98)00150-0)
12. Govindaraju, M.R., Kaminski, D.A., Devine, M.K. et al. (1997) Nondestructive evaluation of creep damage in power-plant steam generators and piping by magnetic measurements. *NDT&E International*, 30(1), 11–17. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0963-8695\(96\)00042-4](https://doi.org/10.1016/s0963-8695(96)00042-4)
13. Kikuchi, H., Ara, K., Kamada, Y., Kobayashi, S. (2009) Effect of microstructure changes on Barkhausen noise properties and hysteresis loop in cold rolled low carbon steel. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(6), 2744–2747. DOI: <https://doi.org/10.1109/tmag.2009.2020545>
14. Самойлович Г.С. (1976) *Не разрушающий контроль металлов и изделий: Справочник*. Москва, Машиностроение.
15. Sandomirskii, S.G. (2006) Application of pole magnetization in magnetic structural analysis (Review). *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 42(9), 586–609. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106183090609004X>
16. Forster, F., Zizelman, G. (1954) Die schnelle zerstörungsfreie Bestimmung der Blechanisotropie mit dem Restpunktpolverfahren. *Zeitschrift für Metallkunde*, 45(4), 245–249.
17. Кифер И.И. (1969) *Испытания ферромагнитных материалов*. Москва, Энергия.
18. Kifer, I.I. (1969) *Tests of ferromagnetic materials*. Moscow, Energiya [in Russian].
19. Rybachuk, V.G., Uchanin, V.M. (2023) A recurrent formula for determination of the effective coercive force in layered ferromagnetic materials. *Materials Science*, 58(4), 533–539. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00695-1>

DISTRIBUTION OF EFFECTIVE COERCIVE FORCE OF COMPOSITE SAMPLES AT ITS MEASUREMENT BY ATTACHABLE MAGNETIC TRANSDUCERS

R.M. Solomakha^{1,2}, V.G. Rybachuk¹, V.M. Uchanin¹

¹G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU, 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: vuchanin@gmail.com

²SPF «Spetsialny naukovy rozrobky». 10 Svitla str., 61121, Kharkiv. E-mail: rsolomak@gmail.com

The paper presents the results of studying the distribution of effective coercive force (CF) in composite ferromagnetic standard samples assembled from two homogeneous samples with different CF values, abutted to each other. Two types of attachable U-shaped magnetic transducers (MT), which were connected to MA-5 type magnetic analyzer, were used for measurement of effective CF in a closed magnetic circuit. Measurements in an open magnetic circuit were performed using MT of attachable solenoid type, operating by the pole point method (PPM). This MT was connected to a coercimeter-structurescope of IKS-104 type. It is shown that for all MT types the effective CF of composite samples (CS) depends on their position relative to the butt. With MT movement relative to the butt from homogeneous sample with smaller CF to homogeneous sample with larger CF the effective CF increases in the range between CF values of these samples. Quantitatively, the nature of distribution of CS effective CF depends on MT type, its dimensions and type of their orientation relative to the butt for MT of non axisymmetric design. With parallel orientation of the poles of U-shaped MT relative to the butt, the nature of the changes in effective CF is smoother. Presence of a gap between CS parts causes a decrease of effective CF and instability of its values in the butt area. For MT of the same type reduction of their size leads to decrease of effective CF range. For MT of similar size the range of the change in CS effective CF, measured in an open magnetic circuit, is noticeably larger, compared to the one measured in a closed magnetic circuit. Shown is the principal possibility of CS application for metrological support of magnetic structurescopes, as well as for modeling the two-dimensional distribution of CF of ferromagnetic structures, which are characterized by surface inhomogeneity of magnetic parameters. 18 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

Keywords: nondestructive testing, magnetic structurescopy, coercive force, coercimeter, standard sample, U-shaped magnetic transducer, attachable solenoid

Надійшла до редакції 11.06.2023



Асоціація "ОКО"

OKO_{ndt} GROUP
УЛЬТРАЗВУКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ. СЕРІЙНІ ТА ЗА СПЕЦЗАМОВЛЕННЯМ.













(044) 531 37 26 (27)


sales@ndt.com.ua


www.ndt.com.ua


ProNDTSolutions