

УДК 620.179.14

ОСОБЛИВОСТІ КОНТРОЛЮ АНІЗОТРОПНИХ НЕМАГНЕТНИХ МАТЕРІАЛІВ ВИХРОСТРУМОВИМИ ДАВАЧАМИ З КОЛОВИМИ ОБМОТКАМИ

В. Г. РИБАЧУК, В. М. УЧАНІН, Я. П. КУЛИНИЧ

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

Розглянуто особливості взаємодії накладного вихрострумowego давача з коловими концентричними обмотками на феритовому осердді під час його збудження гармонічним струмом з об'єктом контролю у вигляді немагнетної пластини з однією анізотропією питомої електропровідності (ПЕП). Отримано аналітичний вираз для внесеної напруги вимірювальної обмотки давача та проаналізовано його числовими розрахунками. Показано, що для такого типу давачів анізотропія ПЕП є додатковим джерелом похибок та встановлено закономірності її впливу на параметри внесеної напруги. Виявлено, що залежність амплітуди внесеної напруги від коефіцієнта анізотропії є суттєво меншою порівняно зі залежністю від зазору і проявляється в обмеженому діапазоні значень узагальненого параметра контролю. Вплив зазору можна усунути відповідним вибором режиму контролю. На противагу цьому дія анізотропії ПЕП на фазу внесеної напруги є співмірною із впливом зазору і проявляється в широкому діапазоні значень узагальненого параметра з дуже повільним загасанням з ростом останнього. Показано, що контролювати, використовуючи фазу внесеної напруги вихрострумowego давача з коловими обмотками, можна тільки немагнетні матеріали з малою анізотропією, де коефіцієнт анізотропії ПЕП $\leq 0,04$.

Ключові слова: *неруйнівний контроль, вихрострумний давач, колова обмотка, питома електропровідність, анізотропія, пластинка.*

Peculiarities of the interaction of the attachable eddy-current probe (ECP) with circular concentric windings on the ferrite core with the plate with uniaxial anisotropy of specific electrical conductivity (SEC) are investigated. The ECP drive winding is excited by the current of harmonic shape. An analytical expression for added voltage of the ECP measuring winding is obtained and analyzed by numerical calculations. It is shown that for such ECP type the SEC anisotropy is an additional stray factor, and the regularities of its influence on the added voltage parameters have been established. It is found that the degree of dependence of the added voltage amplitude on the anisotropy coefficient is significantly less compared to the dependence on the lift-off and is evident in a limited range of values of the generalized parameter of eddy current testing. It can be eliminated by choosing a suitable testing mode. On the contrary, the influence of the SEC anisotropy on the added voltage phase is comparable to the effect of the lift-off and exists in a wide range of the generalized parameter values. It slowly attenuates as the value of the generalized parameter increases. It is shown that testing by using the added voltage phase of the ECP with circular windings can be used only for materials with a low level of anisotropy, which does not exceed ≤ 0.04 .

Keywords: *non-destructive testing, eddy current probe, circular winding, specific electrical conductivity, anisotropy, plate.*

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

Вступ. У практиці неруйнівного контролю матеріалів та виробів широко застосовують вимірювання питомої електропровідності (ПЕП) вихрострумовим методом [1–4], зокрема для оцінки деградації алюмінієвих сплавів авіаційних конструкцій [5, 6]. У відомих працях [7, 8] з теоретичного аналізу цього методу вважають, що матеріал об'єкта контролю є ізотропним. Проте реальні конструкційні матеріали здебільшого є анізотропними за своїми фізичними властивостями, в т.ч. і за ПЕП. Ступінь анізотропії ПЕП конструкційних матеріалів може змінюватися в широких межах. Для алюмінієвих сплавів максимальна відносна різниця ПЕП вздовж головних осей анізотропії становить трохи менше 0,04 [9]. Водночас у вуглеволокнистих композитних матеріалах співвідношення ПЕП у різних напрямках, згідно з працею [10], може досягати 12,5.

Причинами електричної анізотропії можуть бути текстурні особливості матеріалу [9], деформації внаслідок дії механічних навантажень [11, 12], залишкові напруження [13]. Причому відносно невелика анізотропія ПЕП може супроводжуватися суттєвою анізотропією механічних характеристик матеріалу. Так, для виробів зі сплавів Д16 і В95, виготовлених пресуванням, різниця середніх значень границь міцності уздовж і поперек напрямків пресування може сягати 40%, а твердості – 12% [9].

Раніше встановлено, що анізотропія ПЕП впливає на сигнали анаксіальних накладних вихрострумових давачів подвійного диференціювання, які застосовують у дефектоскопії [14]. Водночас дію анізотропії ПЕП на сигнали накладних давачів з коловими концентричними обмотками (осі обмоток збігаються), які переважно використовують у вимірювачах електропровідності, не досліджували. Такі дослідження необхідні для коректної інтерпретації показів вихрострумових вимірювачів електропровідності, які калібрують на ізотропних стандартних зразках ПЕП, а застосовують для вимірювання ПЕП матеріалів з електричною анізотропією. Електричні властивості анізотропного матеріалу на відміну від ізотропного характеризуються кількома значеннями ПЕП, які відповідають головним осям анізотропії. За вихрострумового контролю вихрові струми протікають у відносно тонкому поверхневому шарі матеріалу замкненими контурами, площини яких паралельні до поверхні матеріалу, і тоді характерна одновісна анізотропія. Її описують двома значеннями ПЕП у вздовж головних осей анізотропії, які взаємно перпендикулярні та паралельні поверхні матеріалу [15]. Мета роботи – дослідити вплив такого типу анізотропії ПЕП на результати її вимірювання накладним вихрострумовим давачем з коловими концентричними обмотками.

Формулювання задачі та її розв'язок. Для вирішення задачі розглянуто розрахункову модель накладного вихрострумового давача трансформаторного типу з двома коловими концентричними одношаровими обмотками (збуджувальною та вимірювальною), намотаними на феритовому осерді (рис. 1). Давач розташовано на поверхні тонкої немагнетної провідної пластини з одновісною анізотропією ПЕП так, що повздовжня вісь осердя перпендикулярна поверхні пластини. Через збуджувальну обмотку пропускають змінний струм з часовою залежністю $\exp(j\omega t)$, де ω – циклічна частота збуджувального поля. Внаслідок того, що осердя виконує функцію концентратора магнетного потоку, а також припускаючи, що зазор між поверхнею пластини і осердям є значно менший за діаметр останнього, вважаємо, що магнетний потік первинного збуджувального поля H_0 обмежується поперечним перерізом осердя і спрямований перпендикулярно поверхні пластини. Початок декартової системи координат (x, y, z) та зв'язаної з нею циліндричної системи координат (r, θ, z) O знаходиться в середині пластини.

Внесена напруга вимірювальної обмотки поданого вихрострумового давача протилежна за знаком електрорушійній силі, індукованої в ній магнетним полем

вихрових струмів, і залежить від нормальної складової \dot{B}_z магнетної індукції [1]. Оскільки амплітуда \dot{B}_z є невеликою і за своїм значенням суттєво меншою, ніж індукція насичення феритового осердя, магнетну проникність останнього можна вважати сталою величиною. Врахувавши це, внесену напругу можна подати так:

$$\dot{U} = j\omega w \mu' \mu_0 \iint_s \dot{H}_z ds, \quad (1)$$

де w – кількість витків вимірювальної обмотки; μ' – відносна магнетна проникність феритового осердя; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/м – магнетна стала; s – площа поперечного перерізу осердя.

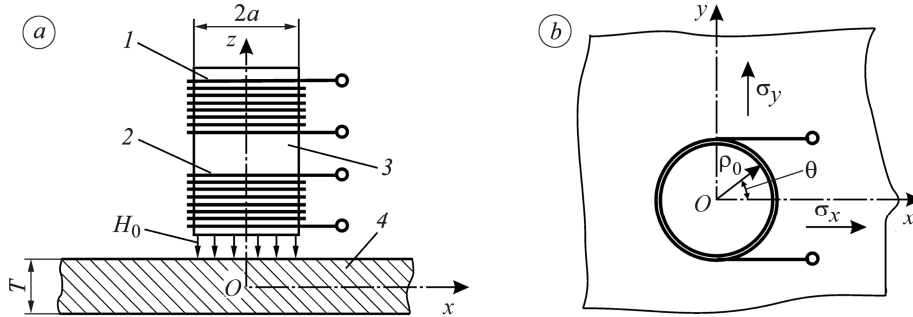


Рис. 1. Вертикальний (1 і 2 – збуджувальна та вимірювальна обмотки; 3 – феритове осердя; 4 – тонка немагнетна провідна пластина) (а) та горизонтальний (σ_x та σ_y – значення головних компонент тензора ПЕП, які відповідають осям x , y) (б) перерізи накладного вихрострумowego давача з коловими обмотками, розміщеного над пластинною з одновісною анізотропією ПЕП.

Fig. 1. Vertical (1 and 2 – exciting and measuring windings; 3 – ferrite core; 4 – thin non-magnetic conductive plate) (a) and horizontal (σ_x and σ_y – values of the main components of the SEC tensor corresponding to the x , y axes) (b) cross-sections of the attachable eddy current probe with circular windings placed above the plate with SEC uniaxial anisotropy.

Нормальну складову вектора напруженості магнетного поля вихрових струмів, які протікають у анізотропній електропровідній пластині, описують так [14]:

$$\dot{H}_z = -j \frac{\kappa}{\rho} H_0 \int_0^\infty \frac{J_1(g)}{g} \left\{ \frac{1+k_\sigma}{s+j\kappa(1+k_\sigma)} \left[\sin^2 \theta J_1(\rho g) + \cos^2 \theta F(\rho g) \right] + \frac{1}{g+j\kappa} \left[\cos^2 \theta J_1(\rho g) + \sin^2 \theta F(\rho g) \right] \right\} \exp(-qg) dg, \quad (2)$$

де $F(\rho g) = \rho g J_0(\rho g) - J_1(\rho g)$; $\rho = \sqrt{x^2 + y^2} / a$ – полярна координата у площині x , y , нормована до радіуса обмотки a ; θ – кутова координата; $k_\sigma = (\sigma_y - \sigma_x) / \sigma_x$ – коефіцієнт одновісної анізотропії ПЕП; $q = z/a$ – нормований зазор; $\kappa = \omega \mu_0 \sigma_x a T / 2$ – узагальнений параметр; $J_0(m)$ і $J_1(m)$ – функції Бесселя дійсного аргументу першого роду нульового та першого порядків.

Конструктивною особливістю всіх вихрострумowych давачів є те, що діаметр їх обмоток суттєво більший за діаметр проводу, яким вони намотані. Тому для давача з одношаровими обмотками можна вважати, що їх діаметр збігається з діаметром феритового осердя, тобто теж дорівнює $2a$. Також необхідно врахувати, що у системі нормованих полярних координат (ρ , θ , q) радіусу феритового осердя відповідає полярна координата $\rho_0 = 1$, а площа його поперечного перерізу відповідно становить $s_0 = \pi \rho_0^2 = \pi$.

Після підстановки виразу (2) у формулу (1) і математичних перетворень з врахуванням вказаних зауважень отримано аналітичний вираз для внесеної напруги вимірювальної обмотки досліджуваного давача. В нормованому вигляді її описують так:

$$\dot{U}' = \kappa \int_0^{\infty} \frac{J_1^2(g)}{g} \left[\frac{1+k_{\sigma}}{g+j\kappa(1+k_{\sigma})} + \frac{1}{g+j\kappa} \right] \exp(-qg) dg. \quad (3)$$

Нормовано до модуля напруги вихрострумowego давача у повітрі без пласти-ни. Він дорівнює $|\dot{U}''| = \pi \omega \mu' \mu_0 w H_0$. Для обчислення інтеграла (3) застосовано адаптивний алгоритм з використанням квадратурної формули Гауса–Кронрода [16]. Для числового моделювання внесеної напруги вимірювальної обмотки його обчислювали з похибкою $\varepsilon \leq 10^{-5}$.

Аналіз результатів. Аналіз виразу (3) показує, що він не залежить від куто-вої координати θ , яка є у формулі (2) для нормальної складової напруженості маг-нетного поля вихрових струмів. Тому на противагу багатоелементним накладним давачам анаксіального типу [14], вихідний сигнал накладного вихрострумowego давача з концентричними коловими обмотками не залежить від його кутової орі-єнтації стосовно напрямків головних осей анізотропії. Водночас k_{σ} у підінте-гральній частині виразу (2) вказує на залежність параметрів \dot{U}' , а відповідно і по-казів вихрострумowych вимірювачів електропровідності, від ступеня анізотропії ПЕП матеріалу пластины.

За результатами числового аналізу виразу (3) отримано залежності ампліту-ди $|\dot{U}'|$ (рис. 2a) та фази φ (рис. 2b) напруги \dot{U}' від узагальненого параметра κ в діапазоні зміни його значень від 0 до 14 для коефіцієнта анізотропії ПЕП $k_{\sigma} = 0$ (матеріал ізотропний) і $k_{\sigma} = 0,5$ (значення ПЕП анізотропного матеріалу вздовж головних осей анізотропії відрізняються у 1,5 рази) за фіксованих значень норма-ваного зазору q .

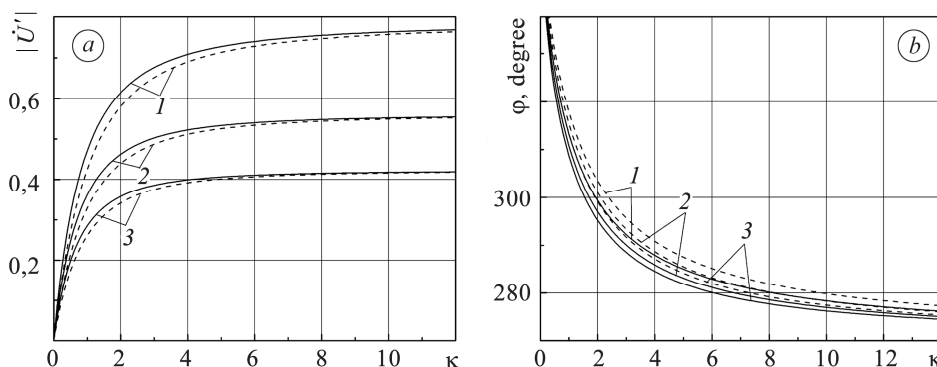


Рис. 2. Залежності амплітуди (a) та фази (b) внесеної напруги від узагальненого параметра контролю κ для фіксованих значень зазору (суцільні лінії – $k_{\sigma} = 0,5$; штрихові – $k_{\sigma} = 0$):
1 – $q = 0,1$; 2 – $q = 0,3$; 3 – $q = 0,5$.

Fig. 2. Dependences of amplitude (a) and phase (b) of the added voltage on the generalized parameter of testing κ for fixed values of lift-off (solid lines – $k_{\sigma} = 0.5$; dashed – $k_{\sigma} = 0$):
1 – $q = 0.1$; 2 – $q = 0.3$; 3 – $q = 0.5$.

Характер поданих залежностей свідчить, що під час вихрострумowych вимі-рювань ПЕП анізотропія останньої є додатковим джерелом похибок (основне – зазор). Її дія на амплітуду внесеної напруги проявляється у деякому зростанні останньої і є протилежною до впливу зазору, а також помітно меншою за нього.

Причому це зростання сильно залежить від узагальненого параметра контролю κ , а також від зазору. Зі збільшенням зазору дія анізотропії ПЕП на амплітуду \dot{U}' помітно зменшується (рис. 2а). Але незалежно від нього для узагальненого параметра $\kappa > 10$ впливом анізотропії ПЕП на амплітуду \dot{U}' можна нехтувати (рис. 2а). Для конкретних вихрострумів давачів і об'єкта контролю значення κ залежить лише від робочої частоти. Тому під час застосування амплітудних вихрострумів вимірювачів електропровідності відлаштування від впливу анізотропії ПЕП здійснюють вибором робочої частоти.

У зв'язку з широким використанням фазових вимірювачів електропровідності [1, 2, 4, 6], значний інтерес становить оцінка впливу анізотропії ПЕП на фазу внесеної напруги \dot{U}' . Характер її змін під дією цього чинника суттєво відрізняється від поведінки амплітуди. По-перше, на відміну від амплітуди фаза \dot{U}' з ростом коефіцієнта анізотропії k_σ зменшується (рис. 2б, рис. 3). Тут дія анізотропії ПЕП подібна до впливу зазору. По-друге, залежність фази \dot{U}' від k_σ з ростом узагальненого параметра κ зменшується досить повільно і зберігається за значень $\kappa > 10$, що видно з нахилу відповідних графіків (рис. 3). Тому реалізувати у фазових вимірювачах електропровідності відлаштування від дії анізотропії ПЕП простим збільшенням робочої частоти практично неможливо, оскільки її вибирають з огляду на виконання умов суттєвого зменшення впливу зазору та забезпечення максимальної чутливості до ПЕП [4, 8].

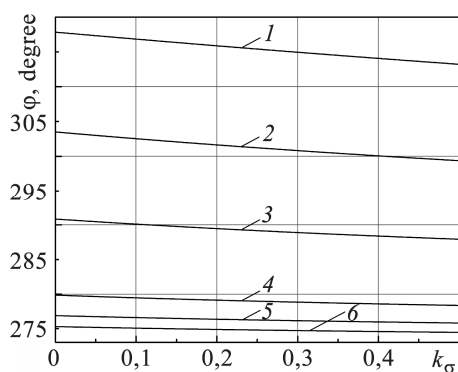


Рис. 3. Залежності фази внесеної напруги від коефіцієнта анізотропії k_σ за різних значень узагальненого параметра контролю κ і нормованого зазору $q = 0,1$: 1 – $\kappa = 1$; 2 – $\kappa = 2$; 3 – $\kappa = 4$; 4 – $\kappa = 10$; 5 – $\kappa = 15$; 6 – $\kappa = 20$.

Fig. 3. Dependences of the phase of the added voltage on the anisotropy coefficient k_σ for different values of the generalized parameter κ and normalized lift-off value $q = 0,1$: 1 – $\kappa = 1$; 2 – $\kappa = 2$; 3 – $\kappa = 4$; 4 – $\kappa = 10$; 5 – $\kappa = 15$; 6 – $\kappa = 20$.

У зв'язку з цим доцільно встановити умови, за виконання яких вплив анізотропії ПЕП на фазу напруги \dot{U}' є мінімальним. Зі залежностей ϕ від k_σ (рис. 3) видно, що їх характер дуже близький до лінійних і за невеликих коефіцієнтів анізотропії фазові зміни є дуже незначні. Як зазначено вище, для алюмінієвих сплавів коефіцієнт анізотропії ПЕП не перевищує 0,04. Його можна прийняти за граничне значення цих матеріалів. Розрахунки за формулою (3) показують, що максимальні зміни фази внесеної напруги вихрострумів давача для мінімального зазору ($q = 0,1$) при цьому не перевищують $0,413^\circ$ (відповідає узагальненому параметру $\kappa = 1,38$). Така ж зміна фази відповідає приросту ПЕП ізотропного матеріалу на 2%. Це означає, що за використання давача з коловими концентричними обмотками для вихрострумів вимірювань ПЕП матеріалів з малим рівнем анізотропії ($k_\sigma \leq 0,04$) додаткова похибка від дії анізотропії $< 2\%$, тобто не перевищує основної похибки фазових вимірювачів електропровідності.

ВИСНОВКИ

Запропонована модель накладного трансформаторного вихрострумів давача з коловими концентричними обмотками на феритовому осерді, розміщеному над пластиною з однією анізотропією електропровідності. З її допомогою встановлено закономірності впливу анізотропії на параметри внесеної напруги

вихрострумового давача. Показано, що анізотропія ПЕП є джерелом додаткової похибки. При цьому її дія на амплітуду внесеної напруги є суттєво слабшою порівняно з впливом зазору і швидко зменшується з ростом узагальненого параметра контролю. Її можна усувати відповідним вибором режиму контролю. Дія анізотропії ПЕП на фазу внесеної напруги є співмірною з впливом на неї зазору і проявляється у широкому діапазоні значень узагальненого параметра контролю. Зі зростанням останнього залежність фази від коефіцієнта анізотропії ПЕП зменшується дуже повільно. Кількісне оцінювання цього впливу на результати вимірювання ПЕП показало, що для немагнетних матеріалів з малою анізотропією ($k_{\sigma} \leq 0,04$) додаткова похибка від дії анізотропії не перевищує 2%.

1. *Клюев В. В., Соснин Ф. Р., Ковалев А. В.* Неразрушающий контроль и диагностика: Справ. / Под ред. В. В. Клюева. 3-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
2. *Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Остап, В. М. Федірко, В. М. Учанін, С. А. Бичков, О. Г. Моляр, О. І. Семенець, В. С. Кравець, В. Я. Дереча // Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. пос. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Львів: Вид-во “Сполом”, 2007. – 9. – 1068 с.*
3. *Nagy P. B.* Electromagnetic nondestructive evaluation (book chapter). Ultrasonic and Electromagnetic NDE for Structure and Material Characterization: Engineering and Biomedical Applications / Ed.: Tribikram Kundu. – London–New York: CRC Press. Taylor and Francis Group, 2016. – Chapter 3. – P. 169–248.
4. *Назарчук З. Т., Учанін В. М., Кулинич Я. П.* Оптимізація параметрів вихрострумового контролю деградаційних змін питомої електропровідності алюмінієвих сплавів // Відбір і обробка інформації. – 2019. – Вип. 47(123). – С. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2019.47.005>
5. *Evaluation of aluminium alloys degradation in aging aircraft / О. Ostash, V. Uchanin, O. Semenets, Y. Holovatyuk, L. Kovalchuk, V. Derecha // Research in Nondestructive Evaluation (American Society for NDT). – 2018. – 29, № 3. – P. 156–166. DOI: <https://doi.org/10.1080/09349847.2017.1302622>*
6. *Вихрострумовий моніторинг деградації алюмінієвих сплавів під час тривалої експлуатації авіаційної техніки / В. М. Учанін, О. П. Остап, С. А. Бичков, О. І. Семенець, В. Я. Дереча // Техн. діагностика та неруйнівний контроль. – 2021. – № 1. – С. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.01.01>*
7. *Соболев В. С., Шкарлет Ю. М.* Накладные и экранные датчики. – Новосибирск: Наука. Сибирское отд-ние, 1967. – 144 с.
8. *Дякин В. В., Сандовский В. А.* Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. – М.: Наука, 1981. – 136 с.
9. *Наумов Н. М., Микляев П. Г.* Резистометрический неразрушающий контроль алюминиевых деформируемых сплавов. – М.: Металлургия, 1974. – 200 с.
10. *Characterization of anisotropic electrical conductivity of carbon fiber composite materials by a microwave probe pumping technique / Н. Lee, O. Galstyan, A. Babajanyan, B. Friedman, G. Berthiau, J. Kim, Do S. Han, and K. Lee // J. of Composite Materials. – 2016. – 50, № 15. – P. 1999–2004. DOI: 10.1177/0021998315599591*
11. *Akulov N. S.* The statistical theory of dislocations // *Phylosophical Magazine*. – 1964. – 9. – P. 767–769.
12. *Гораздовский Т. Я., Татарников В. М.* Индуктивное измерение реологических напряжений в ферромагнитных металлах // *Дефектоскопия*. – 1973. – № 5. – С. 30–33.
13. *Стеблев Ю. Н., Денисов В. А.* Электромагнитный контроль механических напряжений в немагнитных металлах // *Неразрушающие физические методы и средства контроля: Тез. докл. IX Всесоюз. науч.-техн. конф. (Минск, 26–28 мая 1981 г.)*. – Минск, 1981. – Секция Б: Электромагнитные методы. – С. 196–198.
14. *Учанін В. М.* Вихрострумові накладні перетворювачі подвійного диференціювання. – Львів: Сполом, 2013. – 266 с.
15. *Савин М. Г.* Проблема калибровки Лоренца в анизотропных средах. – М.: Наука, 1979. – 123 с.
16. *Laurie D. P.* Calculation of Gauss–Kronrod quadrature formulas // *Mathematics of Computation*. – 1997. – 66, № 219. – P. 1133–1145. DOI: 10.1090/S0025-5718-97-00861-2

Одержано 10.02.2021