

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАКЛАДНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

С. М. Глоба,

кандидат технічних наук, доцент кафедри приладів та методів неруйнівного контролю Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків



Проаналізовано перспективи використання та особливості застосування вихрострумowego неруйнівного контролю. За допомогою сучасного програмного забезпечення ANSYS Maxwell проведено комп'ютерне моделювання накладного вихрострумowego перетворювача для вирішення польових задач вихрострумовой дефектоскопії.

The paper analyzes the prospects of use and application features of eddy-current non-destructive testing. The computer simulation of the attachable eddy-current transducer with modern software ANSYS Maxwell was conducted in order to solve field problems of eddy-current flaw detection.

Вступ

На сучасному етапі розвитку промислового обладнання неруйнівний контроль (НК) є однією із найголовніших складових частин оцінки якості продукції, що забезпечує можливість подальшої її придатності за призначенням без порушень.

Наявність поверхневих дефектів є важливим показником, що впливає на якість металургійної продукції. Особливо небезпечні тріщини, які не дають можливості для виконання подальших операцій технологічного процесу або експлуатації металовиробів. Для контролю такого роду дефектів використовують різні методи, серед яких особливо можна виділити вихрострумовой контроль (ВСК).

На цей час методи вихрострумowego контролю є одними з перспективних методів НК і технічної діагностики (ТД), товщинометрії, дефектоскопії та ін. [1–5].

Методи ВСК ґрунтуються на аналізі взаємодії вихрострумowego перетворювача (ВСП) із електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться збуджувальною котушкою в електропровідному об'єкті контролю (ОК). ВСК дозволяє виявляти як поверхневі, так і підповерхневі дефекти. Його застосовують тільки для контролю об'єктів із електро-

провідних матеріалів. Як джерело первинної інформації використовується ВСП [1].

Переваги методів ВСК: відсутність контактної рідини між ВСП і ОК (на відміну від ультразвукового методу); можливість вимірювання через зазор від часток міліметрів до декількох міліметрів (без контакту ВСП і ОК); висока чутливість до мікроскопічних дефектів, розташованих безпосередньо на поверхні або близько до поверхні металевого ОК (підповерхневі дефекти); висока точність і повторюваність виявлення дефектів; висока швидкість контролю; мінімальні вимоги до стану поверхні; можливість контролю через захисні непровідні покриття; можливість контролю об'єктів зі складною геометрією і місць важкого доступу; вихрострумовой метод нетоксичний та не є небезпечним для здоров'я оператора [1, 4].

Аналіз літературних джерел інформації та постановка проблеми

Проаналізувавши сучасні підходи побудови засобів вихрострумовой дефектоскопії (ВСД) [1–9], можна виділити декілька основних напрямків підвищення ефективності їхнього застосування: вивчення й поліпшення методик проведення ВСК; виявлення особливостей і закономірностей впливу дефектів на вихідний сигнал; розробка й вивчення способів порушення й прийому полів вихрових струмів; розробка первинних ВСП; удосконалення методів обробки й виділення корисної інформації; збір і обробка статистичних даних про виявлені дефекти.

У роботі [4] показано, що значну кількість недоліків традиційних методів ВСК можливо виключити при використанні вихрострумowych перетворювачів трансформаторного типу з двома котушками без осердя. Особливістю конструкції вихрострумowego перетворювача є взаємна перпендикулярність площин збуджувальної та реєструючої (вимірювальної) котушок, що дозволяє компенсувати суттєвий вплив величини зазору та якості поверхні ОК на точність результатів контролю.

Переваги та недоліки методу ВСК вже не раз відзначались у роботах [2–6], що дає подальший розвиток цього напрямку дослідження при вирішенні

сучасних різнопланових практичних завдань ВСД і ТД промислових об'єктів. Саме недоліки методу ВСД знижують надійність контролю, які полягають у впливі на результати контролю зміни електропровідності, магнітної проникності, стану і структури поверхні та ін. Таким чином, на сучасному комп'ютеризованому етапі необхідно знайти оптимальне поєднання переваг і недоліків, виявити особливості проведення ВСК і, як наслідок, приділити достатню увагу комп'ютерному моделюванню ВСП при вирішенні сучасних практичних завдань ВСД.

Наразі комп'ютерне моделювання знаходить широке розповсюдження при вирішенні сучасних різнопланових наукових завдань. Особливої уваги заслуговує провідне програмне забезпечення ANSYS Maxwell (ANSOFT Maxwell), яке характеризується вигідним на фоні аналогів сполученням широти можливостей і простоти освоєння. ANSYS Maxwell – це сучасне, високопродуктивне програмне забезпечення для моделювання електромагнітних полів, яке використовується для проектування, аналізу й дослідження двовимірних і тривимірних моделей двигунів, давачів, трансформаторів та багатьох інших електричних і електромеханічних пристроїв різного застосування [10]. Математичною основою Maxwell є метод кінцевих елементів (Finite Element Method – FEM), завдання якого полягає у знаходженні єдиного можливого розподілу електромагнітного поля в заданій розрахунковій області при зазначених граничних умовах і порушеннях, що точно розраховує статичні, гармонічні електромагнітні й електричні поля, а також перехідні процеси в польових завданнях. У Maxwell передбачено бібліотеку властивостей матеріалів, зручні засоби для параметризації моделі й автоматизації розрахунків при різних сполученнях параметрів, а для складних ситуацій є можливість автоматичного запису й редагування скрипту. ANSYS Maxwell стрімко розвивається та має перспективи розповсюдженого використання для вирішення високопродуктивних завдань із високою точністю й максимальною швидкістю.

Метою роботи є обґрунтування можливості побудови фізичної моделі накладного ортогонального ВСП на підставі сучасного комп'ютерного моделювання ВСП за допомогою ANSYS Maxwell для вирішення польових завдань ВСД і ТД щодо підтвердження збігу отриманих комп'ютерних даних з результатами експерименту.

Основний текст

У роботі [2] подальший розвиток отримали фізична та математична моделі взаємодії ортогонального трансформаторного ВСП з електропровідним виробом за наявності поверхневих дефектів, що дало можливість отримати залежності корисного дефектоскопічного сигналу від геометричних параметрів ВСП і дефекту, а також визначити орієнтацію і форму дефекту типу “тріщина”.

На рис. 1 наведено розташування обмоток ортогонального накладного ВСП над ОК із дефектом типу “тріщина”.

Робочі ділянки котушок накладного ортогонального ВСП розміщують на поверхні металовиробу ОК. У збуджувальній котушці створюється змінний чи імпульсний височастотний струм так, що у поверхневому шарі металовиробу ОК формується вихровий струм. Взаємодія збуджувального електромагнітного поля та поля від вихрового струму приводить до виникнення електрорушійної сили (ЕРС) у реєструючій котушці ВСП, амплітуда якої залежить від багатьох параметрів і характеристик контролю.

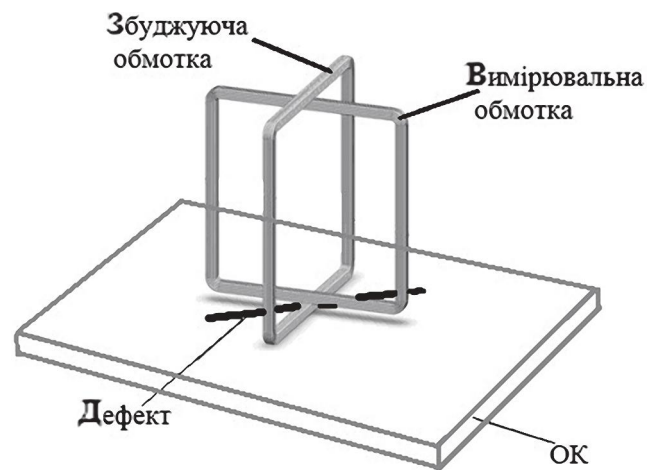


Рис. 1. Розташування обмоток ортогонального накладного ВСП над ОК із дефектом типу “тріщина”

Вираз для сигналів на виході накладного ВСП через магнітний потік $\Phi(t)$ має такий вигляд [1]:

$$e(t) = -W_p \cdot d\Phi(t)/dt = -U(t),$$

де $\Phi(t)$ – магнітний потік; $U(t)$ і $e(t)$ – напруга та ЕРС реєструючої котушки ВСП; W_p – кількість витків реєструючої котушки ВСП.

Магнітний потік можна подати таким чином [1]:

$$\Phi(t) = B(t) \cdot S = \mu_0 \mu_r H(t),$$

де μ_0 – постійна магнітна проникність, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ_r – магнітна проникність матеріалу зразка ОК; $H(t)$ – напруженість магнітного поля; $B(t)$ – індукція магнітного поля; S – площа перетину зразка ОК.

Відзначимо, що визначення залежностей сигналів ВСП від параметрів дефектів ОК є однією з важливих задач дефектоскопії. Для оцінки взаємодії ВСП і ОК з поверхневою тріщиною застосовують різні сучасні розрахункові методи і моделі, які мають складний обчислювальний апарат при аналітичних і чисельних розрахунках. Це можуть бути моделі, що базуються на використанні автоматичних мереж, графові моделі та комбінаторні методи розрахунку, тензорні моделі, моделі та методи, що використовують

ють апарат керування випадкових процесів, а також моделювання динамічних процесів, що побудовані на основі Fuzzy-logic або нейронних мереж [9, 10]. Крім того, останнім часом певного розвитку набули засоби вирішення оптимізаційних завдань, що формалізуються на основі цих моделей [8, 9]. Передусім, це аналітичні методи, методи математичного програмування, евристичні методи та ін.

Усебічне дослідження методу ВСК, побудова залежностей та розрахунок вихідних параметрів ВСП можливі лише за допомогою фізичних і математичних моделей із використанням високоєфективних сучасних ПК для отримання важливих залежностей корисного сигналу від геометричних параметрів ВСП і дефекту ОК.

Знайти точний розподіл електромагнітного поля в заданій розрахунковій області при зазначених граничних умовах і порушеннях стало можливим тільки за допомогою сучасного комп'ютерного моделювання, що розраховує гармонічні електромагнітні поля в польових завданнях [4].

При комп'ютерному моделюванні для завдань із вихровими струмами в загальному вигляді прийнято такі обмежувальні припущення:

- квазістаціонарність (струми зсуву не враховуються);
- розгляд обмеженої області G ; вихрові струми локалізовано в підобласті $S \subset G$ (див. рис. 2);
- гладкість границь $\Gamma(S)$ і $\Gamma(G)$;
- лінійність електромагнітних властивостей матеріалів: $B = \mu(x)H$, $J = \sigma(x)E$, $x \in G$.

Синусоїдальні умови: $B = B_0 \exp(i\omega t)$ і т.п. для комплексних функцій $B(x)$, $J(x)$, ..., $x \in G$.

Таким чином, рівняння Максвелла запишемо у вигляді

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mu H &= 0 \text{ в } G; \operatorname{rot} H = J \text{ в } S; \\ \operatorname{rot} H &= J_0 \text{ в } S_0; \operatorname{rot} E = -i\omega \mu H \text{ в } S, \end{aligned}$$

де $J_0(x)$ – відома функція; $x \in S_0$; $J = \sigma E$ входить в S .

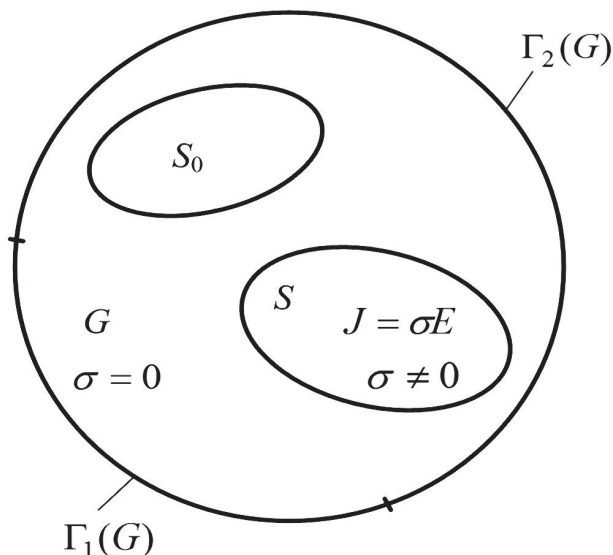


Рис. 2. Розрахункова область задач із вихровими токами

Задаємо такі граничні умови:

$$H_\tau = 0 \text{ на } \Gamma_1(G); H_n = 0 \text{ на } \Gamma_2(G);$$

$$\Gamma_1(G) \cup \Gamma_2(G) = \Gamma(G),$$

де H_τ, H_n – тангенціальні та нормальні компоненти H . На внутрішніх границях H_τ, E_τ, B_n, J_n безперервні.

Поставлені задачі з вихровими струмами із зазначеними граничними умовами було вирішено у формулюванні T -омега методом кінцевих елементів FEM [10]. У результаті використання сучасного, високопродуктивного програмного забезпечення ANSYS Maxwell проведено комп'ютерне моделювання накладного ортогонального ВСП [3].

Збуджувальна обмотка накладного ВСП була виготовлена як прямокутна мідна рамка з перетином обмотки 0,25 x 0,25 мм, а вимірювальна обмотка була задана як ідеально тонка площина довжиною 15 мм і висотою 14,5 мм.

ВСП був розташований над штучним дефектом ОК у вигляді тріщини довжиною 40 мм і товщиною 1 мм. Струм збуджувальної обмотки ВСП був заданий 10 А із частотою 100 кГц.

У результаті комп'ютерного моделювання за допомогою ANSYS Maxwell було високопродуктивно проаналізовано вплив орієнтації дефекту ОК, обмоток накладного ВСП і його глибини на сигнал вимірювальної обмотки [3, 4]. На рис. 3–5 наведено результат моделювання у вигляді розподілу щільності вихрових струмів поблизу тріщини ОК та вплив її розташування щодо обмоток ВСП на корисний сигнал.

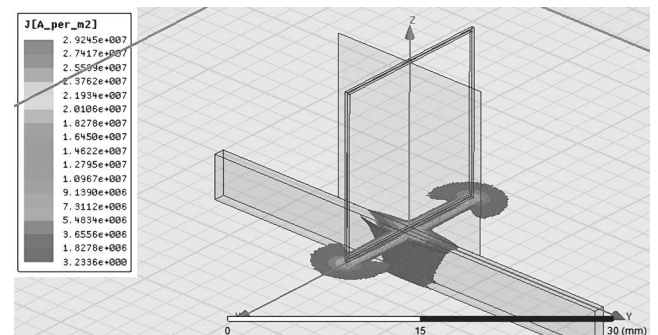


Рис. 3. Розташування вимірювальної обмотки ВСП паралельно дефекту

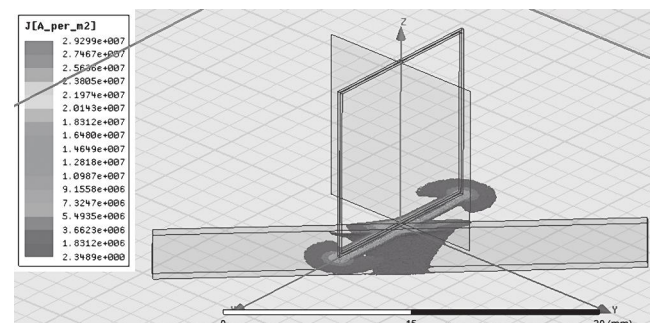


Рис. 4. Розташування дефекту під кутом 45° до вимірювальної обмотки ВСП

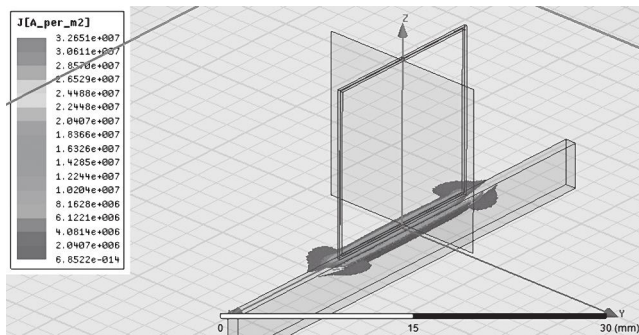


Рис. 5. Розташування вимірювальної обмотки ВСП перпендикулярно дефекту

На рис. 6, 7 наведено залежності дійсної й уявної складової напруги від кута повороту тріщини α [2, 5]. На рис. 8, 9 показано вплив глибини дефекту на сигнал вимірювальної обмотки ВСП (залежності були отримані при $\alpha = 45^\circ$) [2, 5]. Експериментально встановлено, що ефективне виявлення дефектів поверхні феромагнітних металовиробів забезпечується при частоті живлення накладного ортогонального ВСП у діапазоні 20...60 кГц, а наявність дефектів у виробі та їх розміри визначають за максимальною величиною амплітуди прийнятого сигналу [2].

ReU, В

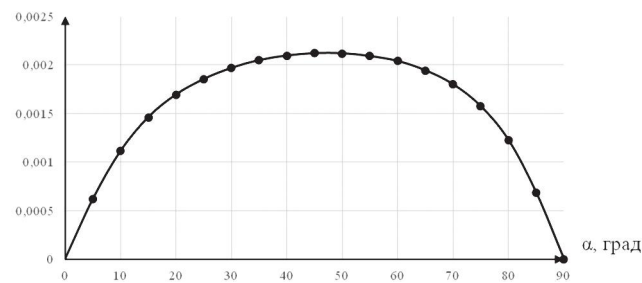


Рис. 6. Залежність ReU від кута повороту тріщини α

ImU, В

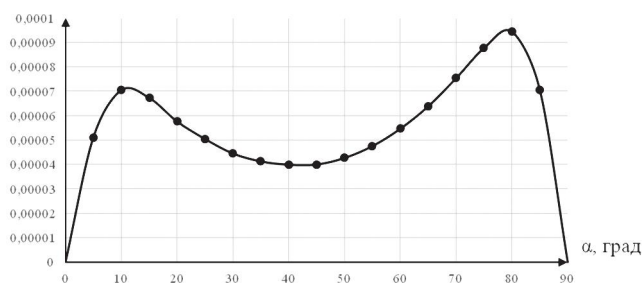


Рис. 7. Залежність ImU від кута повороту тріщини α

ReU, В

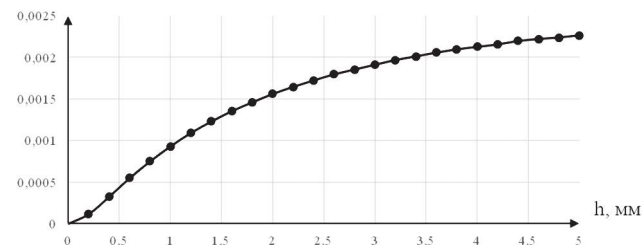


Рис. 8. Залежність ReU від глибини дефекту h

ImU, В

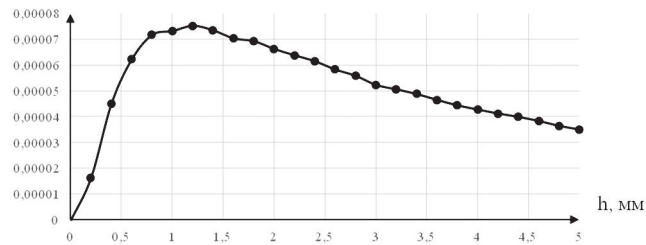


Рис. 9. Залежність ImU від глибини дефекту h

У роботі [2] експериментально доведено, що для забезпечення максимального виявлення дефектів типу “тріщина” робочу зону накладного ортогонального ВСП необхідно орієнтувати під кутом 40...50° відносно напрямку найбільшого розвитку тріщини, а саме комп’ютерне моделювання ВСП при використанні ANSYS Maxwell показало найбільш точне розташування обмоток ВСП над дефектом ОК типу “тріщина” з розрахунковою орієнтацією під кутом 45° відносно тріщини. Слід відзначити, що наявність дефектів у металовиробі ОК та їх розміри визначають за максимальною величиною амплітуди вимірювальної обмотки ВСП прийнятого сигналу.

Висновки

Шляхом комп’ютерного моделювання накладного ВСП трансформаторного типу проаналізовано вплив орієнтації обмоток ВСП відносно поверхневого дефекту та його глибини на вихідний сигнал у вимірювальній обмотці за допомогою сучасного, високопродуктивного програмного забезпечення для моделювання двомірних і тримірних електромагнітних полів методом кінцевих елементів. Результати комп’ютерного моделювання не суперечать загальній теорії фізики розподілу електромагнітного поля та добре узгоджуються з експериментальними даними.

На наявність дефектів у результаті ВСК металовиробів і чутливість контролю впливає відома величина орієнтації обмоток ВСП над дефектом ОК та частота струму в збуджувальній котушці ВСП. Таким чином, вдається підвищити достовірність вирішення конкретного практичного завдання ВСК різнопланових металовиробів на наявність дефектів, при цьому можливо змінювати чутливість ВСП у різних діапазонах вимірювальних параметрів.

Комп’ютерне моделювання накладного ВСП полягає у знаходженні можливого розподілу електромагнітного поля в заданій розрахунковій області при зазначених граничних умовах і припущеннях, що має перспективні напрямки подальших досліджень у галузі неруйнівного контролю.

Список літератури

1. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. Т. 2: в 2 кн. Кн 2: Вихретоковый контроль / под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2006. – 688 с.
2. Хомяк Ю. В. Вихрострумний дефектоскоп з компенсацією впливу стану поверхні феромагнітних металовиробів: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Ю. В. Хомяк. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2013. – 168 с.
3. Глоба С. Н. Вихрострумний контроль глибоких поверхневих дефектів / С. Н. Глоба, Ю. В. Хомяк // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах: Тези доп. 2 Міжнар. наук. конф. ВКДТС–2013. – Вінниця: ВКНТУ, 2013. – С. 144.
4. Применение моделирования в вихретоковой дефектоскопии / Светлана Глоба, Григорий Сучков, Юрий Хомяк [и др.] // Metrology and metrology assurance 2014: Proceeding of 24th National Scientific Symposium with International Participation, September 07–11, 2014. – Sozopol, Bulgaria, 2014. – P. 139–143.
5. Особенности построения портативного вихретокового дефектоскопа / Светлана Глоба, Григорий Сучков, Юрий Хомяк, Антон Слободчук // Metrology and metrology assurance 2015: Proceeding of 25th National Scientific Symposium with International Participation, September 07–11, 2015. – Sozopol, Bulgaria, 2015. – P. 139–143.
6. Распределение плотности вихревых токов в металлическом образце, возбуждаемых полем линейного тока / Г. М. Сучков, Ю. В. Хомяк, С. Н. Глоба, А. Ю. Слободчук // Вісник НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2014. – № 44 (1087). – С. 170–175. – (Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії).
7. Вихретоковый дефектоскоп с низкой чувствительностью к шероховатости поверхности объекта контроля / Г. М. Сучков, Ю. В. Хомяк, С. Н. Глоба [и др.] // Методи та прилади контролю якості. – 2015. – № 1 (34). – С. 14–18.
8. Семенов С. Г. Виявлення особливих точок при вимірюванні та неруйнівному контролі авіаційної техніки / С. Г. Семенов, С. М. Глоба, Р. П. Мигущенко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: наук. журн. – Харків: ХУПС ім. Івана Кожедуба. – 2015. – № 4 (21). – С. 35–37.
9. Моделювання накладного вихрострумowego перетворювача для контролю металовиробів / С. М. Глоба, С. Г. Семенов, Ю. В. Хомяк [та ін.] // Актуальні проблеми автоматики та приладобудування: II Всеукр. наук.-техн. конф., 10–11 грудня 2015 р.: матеріали. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2016. – С. 106–108.
10. <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-Maxwell>.