

ЗАСТОСУВАННЯ МАГНЕТООПТИЧНОГО МЕТОДУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ЗМІН СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛІВ

О. П. Максименко, О. Д. Сурядова

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

E-mail: maksymenko@ipm.lviv.ua

Розглянуто можливість застосувати магнетооптичні сенсори для контролю пошкоджень матеріалів і виробів. Встановлено, що сучасні магнетооптичні сенсори мають високі чутливість та просторову роздільну здатність, а отже, перспективні для неруйнівного контролю. Їх можна використовувати не тільки для виявлення дефектів типу тріщин, але і для встановлення змін у структурі матеріалу, зумовлених деформаціями та дефектами.

Ключові слова: *магнетооптичний сенсор, ефект Фарадея, неруйнівний контроль, виявлення дефектів, корозійні пошкодження, деградація матеріалу.*

APPLICATION OF MAGNETO-OPTICAL METHOD FOR DETECTION OF MATERIAL STRUCTURE CHANGES

O. P. Maksymenko, O. D. Suriadova

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

The possibilities of magneto-optical sensors to control the damage of ferromagnetic and paramagnetic materials and products are considered. In the introduction it is shown that modern magneto-optical materials used in creating sensors have a high sensitivity and spatial resolution. So, on their basis it is possible to develop sensitive and informative means of non-destructive testing for a wide range of applications. For example, it is used to detect microcracks, corrosion damage, degradation changes in the material structure, surface deformations, and subsurface defects. The method ability to detect appearance of magnetic phases in paramagnetic materials, that are precursors of fracture, is of a special importance. The advantage of magneto-optic sensors is a large observation area and high spatial resolution. Resolution of the sensor is determined by the period and size of the domain structure, which averages 13...50 μm . High sensitivity of the sensor is due to a small saturation field of the magneto-optic material from 0.1 mT to 0.7 mT. In addition, these parameters are controlled by changing the temperature of the sensor, direction and intensity of the magnetic field.

In this paper an optical scheme based on magneto-optical garnet film for visualization of fatigue cracks, which are formed in compact samples during their experimental investigation on fatigue failure is described. The developed scheme allowed us to visualize and fix position of the crack and determine its actual length, considering the closed part of the crack. A further direction of research will be to increase the sensitivity of the developed scheme and reduce the noise of magneto-optical images to identify the initial stages of the degradation process of ferromagnetic and paramagnetic materials and products.

Keywords: *magneto-optical sensor, Faraday effect, non-destructive testing, defect detection, corrosion damage, material degradation*

Вступ. Діагностика та контроль металічних матеріалів і виробів низькочастотними електромагнетними полями – усталений метод, який широко використовують на практиці і має значні напрацювання [1]. Його переваги – велика глибина проникнення зондувального поля та проста технічна реалізація пристроїв, основними елементами яких є передавачі і приймачі сигналів у вигляді котушок. До недоліків можна віднести недосконалість візуального подання просторового розподілу інтенсивності розсіяного магнетного поля над малими за розмірами

© О. П. Максименко, О. Д. Сурядова, 2021

дефектами, що потребує спеціальних систем сканування і алгоритмів оброблення масиву даних [2]. Застосувати магнетопорошковий метод для просторової візуалізації дефектів не завжди технічно можливо, до того ж за чутливістю і просторовим розділенням він поступається магнетооптичному [3, 4].

Магнетооптичний контроль. Фізичне явище, на основі якого побудовано магнетооптичні перетворювачі, називають ефектом Фарадея. Воно полягає у повороті площини поляризації світла під дією магнетного поля під час його проходження крізь середовище. Коли промінь світла пронизує середовище товщиною t , площина його поляризації повертається на деякий кут θ_F (рис. 1), який пропорційний сталій Верде V магнетооптичного матеріалу (МОМ), інтенсивності магнетного поля B і товщині півки t [5]:

$$\theta_F = V \cdot B \cdot t. \quad (1)$$

Вираз (1) свідчить, що на кут повороту площини поляризації світла впливає інтенсивність магнетного поля. Зазвичай стала Верде та товщина середовища незмінні. Отже, розподіл інтенсивності намагненості на контрольованій поверхні виробу можна визначити за кутами повороту площини поляризації світла. В свою чергу, однорідність магнетного поля на поверхні порушується залежно від розмірів дефекту, тому за зміною кута площини поляризації світла на різних ділянках поверхні вдається виявити приховані дефекти і візуалізувати їх. Для збільшення чутливості магнетооптичних сенсорів використовують спеціальні матеріали, здебільшого – ферит-гранатові півки з різними домішками, які володіють підвищеним значенням константи Верде [5], та найчастіше напилюють дзеркальну поверхню, щоб подвоїти фарадееве обертання. В таких матеріалах, коли напрямки поширення світла і намагненості збігаються, площина поляризації повертається на деякий кут проти годинникової стрілки, а якщо вони протилежні – за годинниковою стрілкою. За впливу зовнішнього поля у МОМ формується доменна структура – ділянки однорідної намагненості, розділені доменними стінками, де намагненість різко змінює свій напрямок на протилежний. Природна доменна структура в півках лабіринтна. Магнетні домени через магнетну анізотропію орієнтовані лише перпендикулярно до площини півки, а їх розміри і форма змінюються внаслідок руху доменних стінок за впливу зовнішнього магнетного поля.

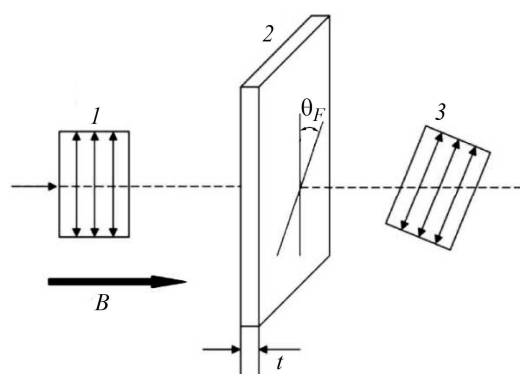


Рис. 1. Ефект Фарадея в тонких півках:
1 – початкова площина поляризації світла;
2 – магнетооптична півка; 3 – площина поляризації світла після проходження МОМ;
B – напрямок магнетного поля.

Магнетооптичні сенсорі для неруйнівного контролю. Відомі два базові режими роботи магнетооптичних сенсорів (МС) залежно від частоти магнетного поля – статичний і динамічний [6]. В динамічному режимі МС через магнетне поле відтворює просторові зміни розподілу електричного опору на контрольованій поверхні деталі, а в статичному – зміни розподілу інтенсивності постійного магнетного поля. В обох випадках МС, розміщений на невеликій відстані від поверхні, дає можливість візуалізувати поля розсіяння, викликані дефектами (тріщинами), слабкі зміни магнетної фази у немагнетних матеріалах після корозійних пошкоджень [7], ударного оброблення поверхні, зварювання [8], пластичного деформування [9] тощо.

У статичному режимі домени орієнтуються залежно від напрямку вектора магнетного потоку, тому навколо тріщини формуються дві її ділянки з протилежною орієнтацією. Якщо напрямок потоку паралельний довжині тріщини, то збурення магнетного поля біля поверхні мінімізується, і тріщину важко виявити. Щоб запобігти цьому, використовують випромінювач перехресного типу, який формує два взаємно перпендикулярні магнетні потоки [10]. Як показано у праці [11], за статичного режиму можна фіксувати достатньо малі тріщини. Використовуючи МОМ з чутливістю $0,03^\circ/\text{mT}$ і лазерне світло (635 нм), інтенсивність якого реєстрували кремнієвим PIN-фотодіодом після проходження через гранатову плівку та аналізатор, виявили тріщини довжиною від 2 мм, з розкриттям від 0,3 мм і глибиною від 0,3 мм у металевій пластині товщиною 1,5 мм. Просторову роздільну здатність МС визначають розміри доменів, ширина яких за нормальних температур становить 20...30 мкм і які можна змінювати, застосовуючи їх залежність від температури, а отже, підвищити просторову чутливість методу.

Під час динамічного режиму роботи МС високочастотний струм, який протікає у фользі або котушці, розміщених над контрольованим зразком, індукує вихрове магнетне поле у зразку. Згідно з відомими результатами [12, 13], вертикальний складник магнетної індукції внаслідок індукованого струму навколо малих тріщини незначний, тому, щоб виявити малі тріщини, зменшують розміри доменів, наприклад, підтримуючи температуру в певному діапазоні. У праці [14] виявили, що ширина домену зменшується з ростом температури в діапазоні від 20 до 100° , а далі з її підвищенням не змінюється.

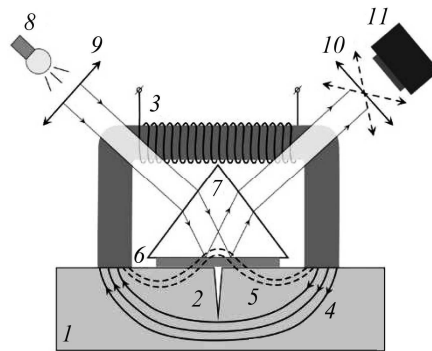
Найчастіше, щоб виявити втому матеріалів і виробів [15], використовують МС у статичному режимі, наприклад, α -Fe фазу в аустенітних сталях, які деградували за експлуатаційного навантаження [16]. Оскільки зміни магнетного поля від таких дефектів невеликі, застосували складний алгоритм оброблення магнетооптичних зображень поверхні деталі, які ділили на $11 \times 14 = 154$ секції. Коерцитивність матеріалу H_c визначали в кожній як півширину локальної петлі гістерезису, щоб знайти частку площі $AF = 0,5$, яку розраховували як відношення площ магнетних доменів S_d у вибраному напрямку до загальної площі магнетооптичного зображення $S_{\text{заг}}$:

$$AF = S_d / S_{\text{заг}} \quad (2)$$

Серед продуктів, що виникли в контрольованій деталі, зафіксували ферромагнетні шпінелі Fe_3O_4 або NiFe_2O_4 . Передбачили, що висока температура, механічне навантаження та агресивне середовище призвели до деградації матеріалу деталі і рівень “магнетизму матеріалу” в окремих її місцях може слугувати мірою цього процесу. Результати, отримані раніше [17], свідчать, що механічна обробка деталей може також викликати фазові зміни поверхні сталей і збільшення коерцитивної сили.

Візуалізація втомної тріщини. Досліджуючи втомне руйнування матеріалів, використовують компактні зразки, які піддають циклічним навантаженням. Визначають довжину тріщини і її підростання за певну кількість циклів. Оскільки тріщини дуже малі і майже непомітні, поверхню зразка шліфують і застосовують мікроскоп. Щоб зменшити витрати на підготовку зразків і автоматизувати контроль за поширенням тріщини, використовували магнетооптичний метод, який виявляє приховані тріщини. Під час його реалізації використали типову поляризаційну оптичну схему (рис. 2), в якій МОМ слугував кристал ферит-гранату діаметром 40 мм і завтовшки 2 мм. За відсутності дзеркального покриття на поверхні МОМ застосовували призму, яка забезпечила подвійне проходження світла крізь кристал.

Рис. 2. Схема МС для спостереження за ростом тріщини: 1 – досліджуваний зразок; 2 – тріщина; 3 – котушка на феромагнетному осерді для збудження магнетного потоку у зразку; 4 – напрямок намагнечування; 5 – витік магнетного потоку біля тріщини; 6 – МОМ; 7 – трикутна призма; 8 – джерело світла; 9 – поляризатор; 10 – аналізатор; 11 – відеокамера.



Випробовували сталевий компактний зразок з втомною тріщиною. Поверхню зразка шліфували, щоб порівняти довжину видимої на поверхні тріщини з довжиною спостережуваної на магнетооптичному зображенні. Ширина видимої біля її вершини становила всього 100 мкм, а довжина 19 мм. Магнетооптичне зображення зразка в околі вершини тріщини, зафіксоване відеокамерою 11, подано на рис. 3. Тут можна чітко виділити частину видимої тріщини, яка потрапила в область спостереження 1, і закриту 2, що непомітна. Також є ділянки зміни магнетних властивостей матеріалу 3 внаслідок росту тріщини. За магнетооптичними зображеннями встановили, що реальна довжина тріщини 23 мм з урахуванням закритої її частини.

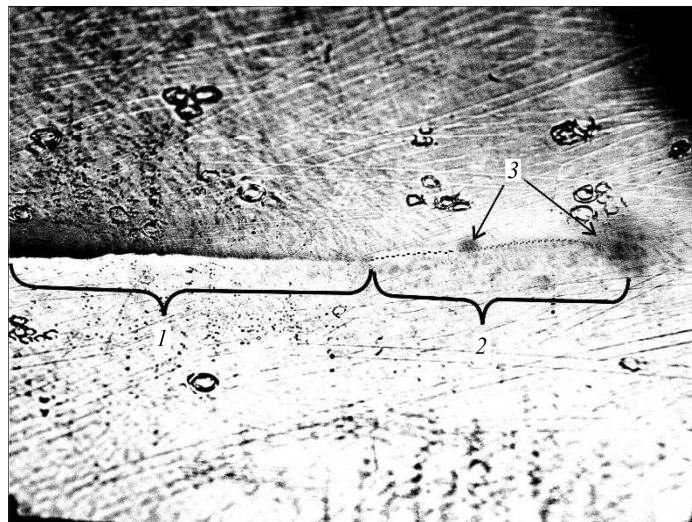


Рис. 3. Магнетооптичне зображення втомної тріщини.

ВИСНОВКИ

Магнетооптичні сенсори – перспективні засоби неруйнівного контролю, які виявляють мікротріщини, корозійні ураження, зміни в структурі матеріалів, деформації поверхні та підповерхневі дефекти. Особливої уваги заслуговує їх здатність фіксувати появу магнетних фаз в парамагнетних матеріалах. Перевага цих приладів – велика спостережувана площа і висока просторова роздільна здатність, яка залежить від періоду доменної структури (в середньому 13...50 мкм) за малого поля насичення магнетооптичного матеріалу від 0,1 до 0,7 мТ, а також можливість керувати нею, змінюючи температуру сенсора та інтенсивність магнетного поля.

Розроблено схему для візуалізації втомної тріщини в компактних зразках під час досліджень втомного руйнування, яка дала можливість чітко фіксувати положення тріщини і визначати її реальну довжину з урахуванням закритої частини.

1. Ключев, В.В.; Мужикский, В.Ф.; Горкунов, Э.С.; Щербинин, В.Е. Неразрушающий контроль, *Машиностроение, Москва*, **2006**, 848.
2. Хомяк, Ю.В.; Гонтар, В.Ю.; Юданова Н.М.; Єфремов, М.О. Розподіл електромагнетного поля поверхневого дефекта в металевому виробі, *Вісник Нац. техн. унів. "ХПИ". Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка*, **2018**, 8, 1–13. <https://doi.org/10.20998/2079-4525.2018.18.02>
3. Unang, P.; Udpa, L.; Stockman, G.C. Motion-based filtering of magneto-optic imagers, *Image and Vision Computing*, **2004**, 22, 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2003.10.001>
4. Агалиди, Ю.С.; Левый, С.В.; Мачнев, А.М. Сравнительный анализ магнитопорошкового и магнитооптического методов визуализации пространственного распределения магнитного поля при исследовании остаточных напряжений, *Вісник НТУУ "КПІ". Серія: Приладобудування*, **2006**, 31, 18–24.
5. Звездин, А.К.; Котов, В.А. Магнитооптика тонких пленок, *Наука, Москва*, **1988**, 192.
6. Novotný, P.; Sajdl, P.; Macháč, P. A magneto-optic imager for NDT applications, *NDT & E. International*, **2004**, 37.8, 645–649. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.05.002>
7. Nath, S.; Sun, B.; Chan, M.; Mandayam, S.; Lord, W. Image processing for enhanced detectability of corrosion in aircraft structures using the Magneto-Optic Imager, *Proceeding of SPIE*, **1996**, 2945, 96–103. <https://doi.org/10.1117/12.259082>
8. Li, Y.; Gao, X.; Zhang, Y.; You, D.; Zhang, N.; Wang, C.; Wang, C. Detection model of invisible weld defects by magneto-optical imaging at rotating magnetic field direction, *Optics and Laser Technology*, **2020**, 121, 105772. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105772>
9. Salem, A.; Underhill, P.R.; Krause, T.W. Non-contact measurement of residual magnetization caused by plastic deformation of steel, *J. of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*, **2020**, 3, 1–4. <https://doi.org/10.1115/1.4047292>
10. Le, H.M.; Lee, J.; Lee, S.; Shoji, T. A simulation technique of non destructive testing using magneto-optical film, *E. Journal of Advanced Maintenance*, **2011**, 3.1, 25–38.
11. Tehranchi, M.M.; Hamidi, S.M.; Eftekhari, H.; Karbaschi, M.; Ranjbaran, M. The inspection of magnetic flux leakage from metal surface cracks by magneto-optical sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, **2011**, 172.2, 365–368. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.09.010>
12. Lee, J.Y.; Hwang, J.S.; Shoji, T. Numerical analysis of magneto-optical eddy current imaging using FEM, *Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd.*, **2006**, 321, 1451–1456. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.321-323.1451>
13. Deng, Y.; Liu, X.; Fan, Y.; Zeng, Z.; Udpa, L.; Shih, W. Characterization of Magneto-Optic Imaging Data for Aircraft Inspection, *IEEE Transactions on Magnetics*, **2006**, 42.10, 3228–3230. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.878419>
14. Lee, J.; Wang, R.; Shoji, T.; Hong, S. Non-destructive testing in the high-temperature regime by using a magneto-optical film, *NDT & E. International*, **2008**, 41.6, 420–426. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.03.002>
15. Takaya, S.; Nakagiri, T.; Suzuki, T. Magnetic property change of SUS304 steel due to fatigue at elevated temperature, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation. IOS Press Amsterdam*, **2005**, 9, 167–174.
16. Novotný, P.; Macháč, P.; Kučera, M.; Nitsch, K.; Skrbek, B. Diagnosis of austenitic steel valves with the magneto-optical method, *NDT & E. International*, **2007**, 40.3, 203–207. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2006.10.010>
17. Novotný, P.; Macháč, P.; Sajdl, P. Diagnostics of austenitic steels by coercivity mapping, *NDT & E. International*, **2008**, 41.7, 530–533. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.05.003>

Одержано 16.08.2021