

ЗАСТОСУВАННЯ МАГНЕТООПТИЧНОГО МЕТОДУ ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ЗАКЛЕПКОВИХ З'ЄДНАНЬ

І. В. Стасишин^{1,2}, О. П. Максименко¹, Т. І. Вороняк¹, І. Б. Івасенко^{1,2},
О. Р. Берегуляк¹, І. Г. Стецько¹

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка
Національної академії наук України, Львів;

² Національний університет “Львівська політехніка”

E-mail: ihorgo@hotmail.com

З допомогою магнетооптичного методу неруйнівного контролю досліджено тестові зразки сталевих заклепкових з'єднань з контрольованими розмірами дефектів, які виготовлено згідно з технічними умовами. Встановлено, що магнетооптичний метод разом зі схемою реєстрації магнетооптичних зображень дає можливість надійно виявляти дефекти внутрішньої поверхні отворів, характерні для таких з'єднань. Постійне магнетне поле у зразку збуджене електромагнетним перетворювачем. Після опрацювання зареєстрованих магнетооптичних зображень встановлено параметри дефектів. Розмір мінімального дефекту поверхні отвору, зафіксованого за допомогою розробленої схеми, $0,2 \times 0,2 \text{ мм}^2$, а поля спостереження – $10 \times 15 \text{ мм}^2$. Під час опрацювання магнетооптичних зображень використано алгоритм вирівнювання гістограми, що дало змогу збільшити їх контраст і виявити малі дефекти.

Ключові слова: магнетооптичні зображення, ефект Фарадея, тріщина, неруйнівний контроль, оброблення зображень.

APPLICATION OF MAGNETO-OPTICAL METHOD FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF RIVETED JOINTS

I. V. Stasyshyn^{1,2}, O. P. Maksymenko¹, T. I. Voronyak¹, I. B. Ivasenko^{1,2},
O. R. Berehulyak¹, I. H. Stetsko¹

¹ Karpenko Physico-Mechanical Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv;

² Lviv Polytechnic National University, Lviv

Test samples of steel riveted joints with pre-formed controlled defects were analyzed during experimental studies using the magneto-optical method of non-destructive testing. The samples were manufactured in accordance with established technical conditions, which made it possible to reproduce real operating conditions and ensure the reproducibility of the results. The main focus was on detecting defects on the inner surface of holes characteristic of riveted joints, since this area is usually most susceptible to damage during loading and riveting.

An exciting constant magnetic field in the tested samples was created using a specially designed electromagnet, which was supplied with current in the range from 0.1 to 3 A. This approach made it possible to implement a controlled change in magnetic induction in the control area and to investigate the possibility of detecting defects of various sizes at different levels of magnetization. The formed field created local induction leaks at the damage sites, which led to the appearance of contrasting magneto-optical images after interaction with the optical system.

After recording and digital processing of the images, the geometric characteristics of the detected defects were determined. In particular, it was established that the minimum defect on the inner surface of the hole was $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$. The field of view was $10 \times 15 \text{ mm}^2$, which provided sufficient spatial coverage for visualizing both local damage and the overall surface structure. To improve the quality of visualization and the contrast of small defects, a histogram equalization algorithm was applied. The use of this digital processing method made it possible to significantly increase the visibility of defects that had low contrast in the original images.

© І. В. Стасишин, О. П. Максименко, Т. І. Вороняк, І. Б. Івасенко,
О. Р. Берегуляк, І. Г. Стецько, 2025

The results confirmed the effectiveness of the developed magneto-optical scheme for non-destructive testing of riveted joints. The proposed approach demonstrated the ability not only to detect defects on the inner surface of holes, but also to determine their geometric parameters with high accuracy. This opens up prospects for the use of magneto-optical methods to control the reliability of joints in critical structures where durability and safety requirements are critical.

Keywords: *magneto-optical images, Faraday effect, crack detection, non-destructive testing, image processing.*

Вступ. Магнетооптичний метод неруйнівного контролю (НК) часто використовують для діагностики металевих матеріалів. Сутність ефекту Фарадея полягає в повороті площини поляризації світла за проходження крізь магнетно-активне середовище, намагнечене вздовж напрямку поширення світлового пучка [1, 2]. Так візуалізують просторовий розподіл магнетного поля на поверхні об'єкта, а отже, виявляють локальні дефекти, неоднорідності структури та внутрішні напруження у феромагнетних матеріалах.

Магнетооптичні методи НК інтенсивно розвиваються впродовж останніх років. Зокрема, у праці Gao та ін. [3] продемонстровано використання магнетооптичного зображення для виявлення мікротріщин у зварних з'єднаннях високовуглецевої сталі. Для цього застосовували алгоритм підвищення контрасту з можливістю локалізувати дефекти розміром до 0,1, недоступні для традиційних вихрострумових методів.

Ма та ін. [4] реалізували комбіноване магнетне поле з вертикальною та горизонтальною компонентами, що дало можливість виявляти тріщини довільної орієнтації, включно з паралельними до напрямку основного магнетного поля, і значно підвищило чутливість контролю. Крім того, використовуючи алгоритми активних контурів для автоматичного аналізу зображень, поліпшили точність оцінювання геометрії дефектів.

Особливу увагу привертають дослідження Wang та ін. [5], де вивчено вплив змінного магнетного поля на контрастність магнетооптичних зображень. Автори встановили, що за збудження змінним полем можна реєструвати як поверхневі, так і підповерхневі тріщини. За залежністю інтенсивності відбитого сигналу від амплітуди та частоти поля оптимізували умови контролю для різних типів матеріалів.

Отже, магнетооптичні методи НК здатні забезпечити високу просторову роздільну здатність і чутливість до локальних змін магнетного потоку.

Як первинний перетворювач магнетного поля в зміну поляризації світла використовують прозоре магнетооптичне середовище, або сенсори. Особливістю магнетооптичних сенсорів [6], заснованих на ефекті Фарадея, є здатність відтворювати просторовий розподіл витоків магнетного потоку у вигляді зміни просторового розподілу інтенсивності зображення в реальному часі. Це забезпечує наочність результатів і значно спрощує їх інтерпретацію порівняно з традиційними дефектоскопічними методами, де часто потрібні складні алгоритми оброблення сигналів. Через високу чутливість до локальних змін магнетного поля вдається виявляти та ідентифікувати дрібні дефекти, які недоступні для класичного вихрострумового чи ультразвукового контролю. Крім того, магнетооптичні системи не потребують безпосереднього фізичного контакту з досліджуваним об'єктом, що послаблює вимоги до підготовки поверхні та мінімізує вплив зовнішніх чинників.

Ще одна суттєва перевага такого підходу – слабка залежність результатів від геометрії поверхні. Якщо ультразвукові та рентгенографічні методи мають суттєві обмеження під час контролю краю деталей зі складною конфігурацією або тонкостінних конструкцій через крайові ефекти, то магнетооптичний підхід ефективний для об'єктів довільної форми, включно з трубчастими зразками, зварними швами та елементами з нерівномірною товщиною [7, 8]. Тому перспективний для

авіаційної, енергетичної, транспортної та нафтогазової промисловості, де деталі складної геометрії критично навантажені.

У цьому дослідженні увагу зосереджено на розробленні та експериментальній перевірці компактної магнетооптичної системи, яка дає можливість оперативно виявляти пошкодження заклепкових з'єднань у феромагнетних зразках. Використовуючи ефект Фарадея, візуалізували розподіл магнетного поля й інтерпретували параметри дефектів. За одержаними результатами не лише локалізували пошкодження, а й відновили інформацію про їх протяжність, орієнтацію та геометричні характеристики.

Ефект Фарадея. Він ґрунтується на різниці показників заломлення для хвиль із правою n_+ та лівою n_- круговою поляризацією у магнетному середовищі [9, 10]. Через різницю фазових швидкостей площини поляризації обертаються, тобто

$$\Theta = \frac{\pi(n_+ - n_-)L}{\lambda},$$

де Θ – кут обертання; L – товщина магнетного середовища; λ – довжина хвилі світла у вакуумі.

Причина ефекту Фарадея – різні фазові швидкості поширення в магнетному середовищі хвилі з правою та лівою круговою поляризацією. Це відповідає показникам заломлення n_+ та n_- , різниця яких лінійно пропорційна індукції магнетного поля:

$$n_+ - n_- = V \frac{\lambda}{\pi} B,$$

де V – стала Верде; B – магнетна індукція. Підставивши цей вираз у перше рівняння, отримаємо

$$\Theta = VBL.$$

Таким чином, ефект є результатом наведеної оптичної анізотропії, індукованої магнетним полем.

Стала V найчастіше дисперсійно залежить від довжини хвилі. У наближенні її можна записати так:

$$V(\lambda) \propto \frac{1}{\lambda^2}.$$

Це означає, що за короткохвильового випромінювання (синій та зелений спектральні діапазони) ефект Фарадея проявляється сильніше, ніж за довгохвильового (червоний та інфрачервоний діапазони). Це важливо враховувати, вибираючи джерело світла для магнетооптичних вимірювань.

На практиці необхідно врахувати взаємодію світла з аналізатором. Інтенсивність світла, що проходить крізь нього під кутом α до початкової площини поляризації, описує закон Малюса [11, 12]:

$$I = I_0 \cos^2(\alpha + \Theta),$$

де I_0 – початкова інтенсивність.

Якщо аналізатор встановлений під кутом $\alpha = 45^\circ$, тоді

$$I(B) = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{4} + VBL\right).$$

За цією залежністю вдається реєструвати зміни інтенсивності під час вимірювання магнетного поля. Для малих поворотів ($VBL \ll 1$) вираз можна спростити:

$$I(B) \approx I_0 \left(\frac{\pi}{2} - VBL \right).$$

Отримуємо майже лінійну залежність інтенсивності від магнетного поля. Це зручно для створення вимірювальних систем, де важлива лінійна пропорційність між оптичним сигналом і розміром дефекту індукованого поля.

Ефект Фарадея у магнетооптичних системах НК ґрунтується саме на цих закономірностях. Дефекти у матеріалі локально викривляють магнетне поле, що створює просторові варіації кута повороту площини поляризації. Це проявляється у зміні інтенсивності світла після аналізатора. Тому можна отримати контрастні зображення тріщин, включень чи інших дефектів.

Опис установки. Для візуалізації дефектів у феромагнетних матеріалах створили макет оптико-електронної системи (рис. 1), що містить джерело світла, поляризаційні елементи, магнетооптичну плівку, електромагнетний перетворювач та блок управління. Така інтегрована конструкція забезпечує формування, трансформацію та детекцію зміни поляризації світла, модульованого локальними магнетними полями, які виникають у зонах пошкоджень матеріалу.

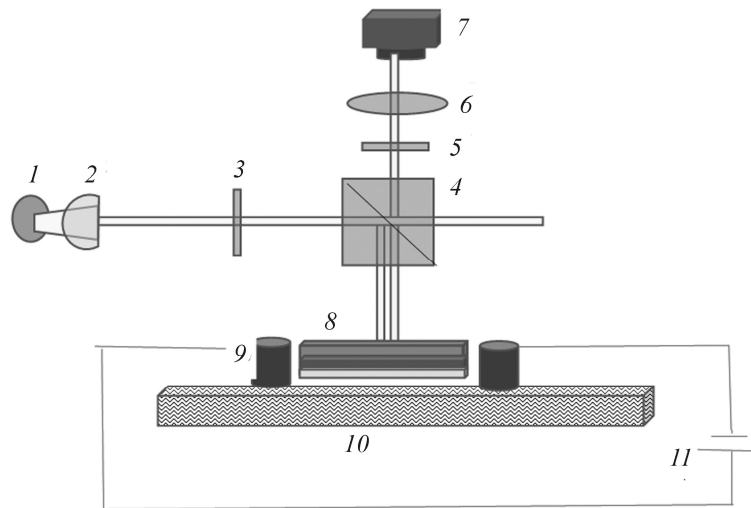


Рис. 1. Схема оптико-електронної системи: 1 – джерело білого світла; 2 – коліматор; 3 – поляризатор; 4 – світлоподільник; 5 – аналізатор; 6 – об'єктив; 7 – відеокамера; 8 – перетворювач; 9 – котушка на феромагнетному осерді; 10 – зразок; 11 – блок живлення електромагнетом.

Як джерело світла використали світлодіод із колімуючою оптикою, що забезпечує рівномірний та інтенсивний світловий потік. Джерело розташоване під кутом 90° до площини магнетооптичної плівки, через що вдається компактно інтегрувати схему та стабілізувати роботу. Для спрямування випромінювання до робочої поверхні плівки застосовували світлоподільник, який відхиляє промінь та забезпечує коректну геометрію освітлення. Перед світлоподільником розмістили поляризатор, який формує лінійно поляризоване випромінювання, необхідне для реєстрації ефекту Фарадея.

Магнетооптична плівка $(\text{Bi,Lu,Ca})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ та підкладка $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ завтовшки 3,5 мкм з чутливістю 1,1 град/мкм, на яку нанесли дзеркальне покриття, є основним робочим елементом системи, яка має сталу $V = 15$ радіан/(Т·м) [13]. Вона модифікує площину поляризації світла пропорційно локальним магнетним полям,

що проникають від зразка. Дзеркальний шар відбиває промінь у зворотному напрямку, забезпечуючи подвійний прохід крізь плівку, що підвищує чутливість системи. Феромагнетний об'єкт контролю розташували на мінімальній відстані від поверхні плівки, гарантуючи так точне передавання інформації про розподіл витоку магнетного поля, зумовлених дефектами.

Однорідне магнетне поле, необхідне для намагнетчування зразка та формування зони витоку магнетного потоку у місцях контролю, на ділянці розміром 10×15 мм створювали електромагнетом. За допомогою блока управління змінювали його інтенсивність та напрям згідно з вимогами експерименту та забезпечували стабільний струм збудження обмотки перетворювача від 0,3 до 3 А. Разом з оптико-електронною частиною ця магнетна система забезпечує високу інтенсивність магнетного поля для локалізації пошкоджень і дає можливість отримувати контрастні зображення дефектів у режимі реального часу.

Відбите світло від світлоподільника потрапляє на аналізатор, який виконує функцію селекції зміненої компоненти поляризації, зумовленої ефектом Фарадея. Таким чином, зі загального світлового потоку виділяється саме та частина сигналу, яка містить інформацію про локальні магнетні збурення в зоні дефектів. Реєструє зображення цифрова камера, що перетворює оптичний сигнал у цифровий формат для його комп'ютерного оброблення та візуалізації.

Принцип роботи установки ґрунтується на взаємодії лінійно поляризованого випромінювання з магнетним полем, спотвореним пошкодженим матеріалом. За нормального падіння світла на магнетооптичну плівку площина його поляризації обертається пропорційно до локального магнетного поля, товщини плівки та сталої Верде. У результаті після проходження аналізатора формується контрастне зображення, в якому дефекти, зокрема тріщини, відображені як локальні ділянки зміни інтенсивності. Його реєструємо камерою та передаємо в ПК для кількісного аналізу параметрів дефектів.

Перевірка роботоздатності установки. Заклепкові з'єднання найпоширеніші у машинобудуванні, авіаційній та транспортній галузях. Основна їх перевага – простота виготовлення, надійність та здатність витримувати значні динамічні навантаження. Водночас саме у зоні заклепок часто виникають локальні пошкодження, зумовлені концентраторами напружень, а також процесами зношування та втомного руйнування. Найнебезпечніші з них – вищерблення, порожнини та мікротріщини поверхні внутрішнього отвору, які входять або не виходять на поверхню, тому їх важко виявити іншими методами, зокрема, ультразвуковими і вихрострумовими. Саме через це магнетооптичні технології неруйнівної діагностики тут особливо зацікавлюють.

Для перевірки ефективності розробленої системи використали тестові зразки, виготовлені згідно з технічними умовами у вигляді сталевих пластин завтовшки 4 мм з отворами діаметром 5 мм, у які вставили імітатори заклепки. У частині заклепок навмисно сформували дефекти у крайовій ділянці – внутрішні вищерблення та локальні пустоти різного розміру. Так змодельовати реальні умови експлуатації, коли дефект може утворитися під час виготовлення, або ж тривалої роботи з'єднання. Розміри штучних дефектів варіювали від 0,2 до 1 мм, що дало змогу визначити мінімальний поріг чутливості системи до пошкоджень.

Під час експерименту зразки закріплювали у робочій камері так, щоб головка заклепки щільно контактувала з магнетооптичною плівкою. Зовнішнє магнетне поле створювали кільцевим двополюсним електромагнетним перетворювачем, силу струму в якому регулювали від 0,1 до 3 А. Це давало можливість змінювати інтенсивність намагнетчування, а отже, рівень витоку магнетного поля у зонах дефектів.

Встановили (див. рис. 2), що навіть внутрішні дефекти малого розміру ($\approx 0,2$ мм) проявлялися як локальні темні плями на магнетооптичних зображеннях. Зі збільшенням розміру дефекту контрастність зони витоку магнетного поля значно зростала, тому фіксували не лише пошкодження, а й оцінювали його геометричні характеристики. Найбільші вищерблення діаметром ≈ 1 мм створювали чіткі ділянки контрасту, які легко ідентифікували навіть без складного цифрового оброблення.

Для візуалізації дефектів обчислювали модуль різниці отриманих магнетооптичних зображень з додатною та від'ємною поляризацією струму. Далі вирівнювали гістограми зображення.

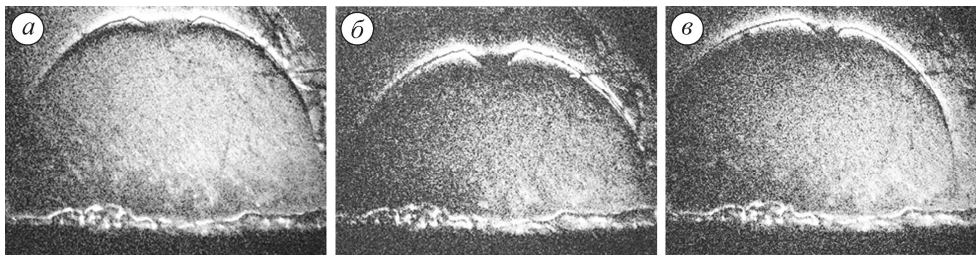


Рис. 2. Візуалізація дефектів заклепкового з'єднання за струмом 3 А та розміром:
а – 1 мм; б – 0,5; в – 0,1.

ВИСНОВКИ

Розроблено та експериментально досліджено магнетооптичний пристрій для неруйнівного виявлення тріщин у феромагнетних матеріалах на основі ефекту Фарадея. Він ефективно реєструє витоки магнетного поля в зонах дефектів та формувати висококонтрастні зображення поверхневих і підповерхневих тріщин у сталевих зразках. Випробовано зразки зі сталі 38ХС із тріщинами різних розмірів і підтверджено роботодатність системи, її спроможність локалізувати дефекти та відтворювати їх геометрію. Метод із змінним магнетним полем розширює функціональні можливості неруйнівного контролю не лише феромагнетних, але й парамагнетних матеріалів, це забезпечує ефективне виявлення дефектів у таких конструкційних металах, як алюміній та його сплави, що часто використовують в авіаційній та транспортній техніці, і підвищуючи надійність та експлуатаційну безпеку відповідальних елементів.

1. Heintzmann, R. Introduction to Optics and Photophysics. In *Fluorescence Microscopy: From Principles to Biological Applications*, 2nd ed.; Kubitscheck, U. Eds.; John Wiley & Sons, 2017, pp 1–22.
2. *Magneto-optical imaging*; Johansen, T.H., Shantsev, D.V., Eds.; Springer Science & Business Media, 2012.
3. Gao, X. et al. Magneto-optical imaging characteristics of weld defects under alternating and rotating magnetic field excitation. *Optics & Laser Technology* **2019**, *112*, 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.11.005>
4. Ma, N. et al. Magneto-optical imaging of arbitrarily distributed defects in welds under combined magnetic field. *Metals* **2022**, *12* (6), 1055. <https://doi.org/10.3390/met12061055>
5. Wang, C. et al. Research on microstructure characteristics of welded joint by magneto-optical imaging method. *Metals* **2022**, *12* (2), 258. <https://doi.org/10.3390/met12020258>
6. 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>
7. Maksymenko O.P., Voronyak T.I., Stasyshyn I.V., Syvorotka I.I. Evaluation of the characteristics of ferrite garnet films for magneto-optical control of materials. *Information Extraction and Processing* **2024**, *52* (128), 61–67. <https://doi.org/10.15407/vidbir2024.52.061>

8. Stasyshyn, I.; Suriadova, O. Application of the Magneto-Optical Effect in Non-Destructive Testing. *Materials Science and Surface Engineering: MSSE2023 Proceedings*, Lviv, Ukraine, September 27–29, 2023, pp 235–238. <https://doi.org/10.15407/msse2023.235>
9. Landau, L.D.; Lifshitz, E.M. *Electrodynamics of Continuous Media*; Pergamon Press, 1984. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-030275-1.50007-2>
10. Zvezdin, A.K.; Kotov, V.A. *Modern Magneto-optics and Magneto-optical Materials*; CRC Press, 1997. <https://doi.org/10.1201/9780367802608>
11. Inoue, M. et al. *Magnetophotonics: From Theory to Applications*; Springer, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35509-7>
12. Liu, Q.; Ye, G.; Gao, X.; Zhang, Y.; Gao, P.P. Magneto-optical imaging nondestructive testing of welding defects based on image fusion. *NDT&E International* **2023**, *138*, 102887. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102887>
13. Ghimire, K.; Haneef, H.F.; Collins, R.W.; Podraza, N.J. Optical properties of single-crystal $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ from the infrared to ultraviolet. *Phys. Status Solidi (B)* **2015**, *252*, 2191–2198. <https://doi.org/10.1002/pssb.201552115>

Одержано 28.04.2025

ORCID iDs

Stasyshyn I.V.  <https://orcid.org/0000-0003-2657-2878>
 Maksymenko O.P.  <https://orcid.org/0000-0002-2905-1771>
 Voronyak T.I.  <https://orcid.org/0000-0003-0011-0771>
 Ivasenko I.B.  <https://orcid.org/0000-0003-3795-9779>
 Berehulyak O.R.  <https://orcid.org/0000-0002-0428-1458>
 Stetsko I.H.  <https://orcid.org/0000-0002-8161-8704>