

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2026.04.067>

УДК 537.632

О.П. Максименко¹, <https://orcid.org/0000-0002-2905-1771>

І.Б. Івасенко^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0003-3795-9779>

І.В. Стасишин^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0003-2657-2878>

О.Р. Берегуляк¹, <https://orcid.org/0000-0002-0428-1458>

Р.А. Воробель¹, <https://orcid.org/0000-0001-5085-4301>

Я.П. Кулинич¹, <https://orcid.org/0000-0003-2148-6006>

Т.І. Вороняк¹, <https://orcid.org/0000-0003-0011-0771>

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

² Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна

E-mail: olena.berehulyak@gmail.com

Дефектометрія прихованих тріщин у металах за їхніми магнетооптичними зображеннями

Представлена членом-кореспондентом НАН України Л.І. Муравським

Запропоновано новий метод отримання та опрацювання магнетооптичних зображень прихованих тріщиноподібних дефектів у металевих виробах із використанням кристалічної магнетооптичної плівки. Створено пристрій для отримання магнетооптичних зображень. Застосування в схемі цього пристрою косоного освітлення та додаткової призми дало змогу збільшити площу ділянки контролю, а також підвищити чутливість до розсіяного дефектом магнетного поля. Експериментальні випробування цього пристрою на сталевих зразках із втомними тріщинами продемонстрували його ефективність. Для підвищення достовірності ідентифікації виявлених дефектів запропоновано алгоритм оброблення магнетооптичних зображень, який враховує їхні характерні особливості. З використанням дипольної моделі та нерівномірного розподілу магнетних зарядів на краях дефекту розраховано профілі вертикальної складової розсіяного дефектом магнетного поля, які добре узгоджуються з експериментальними даними.

Ключові слова: неруйнівний контроль виробів, магнетне поле, втомна тріщина, магнетооптичне зображення, оброблення зображень.

Ц и т у в а н н я: Максименко О.П., Івасенко І.Б., Стасишин І.В., Берегуляк О.Р., Воробель Р.А., Кулинич Я.П., Вороняк Т.І. Дефектометрія прихованих тріщин у металах за їхніми магнетооптичними зображеннями. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2026. № 4. С. 67—79. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2026.04.067>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вступ. Магнетооптичний (МО) метод, що ґрунтується на ефекті Фарадея, є одним із сучасних методів неруйнівного контролю металевих конструкцій і виробів. Ефект Фарадея зумовлює обертання площини поляризації світла, що проходить через МО середовище, вектор залишкової намагненості M якого має компоненту, орієнтовану вздовж напрямку поширення світлового променя. Типову конфігурацію МО пристрою для візуалізації витоку магнетного поля (МП) дефекту зображено на рис. 1.

Розподіл інтенсивності світла на фотоприймачі пристрою описується законом Малюса [1]

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1 + \cos(2(\beta \pm \Theta_F))}{2}, \quad (1)$$

де Θ_F — кут повороту площини поляризації світла, що проходить шлях l у плівці; I — інтенсивність світла на фотодетекторі, I_0 — інтенсивність джерела світла. У формулі (1) не враховано оптичні втрати світла та чутливість фотоприймача, проте фарадеївське обертання площини поляризації світла таких плівок добре апроксимується лінійною залежністю від величини H . Використання процедури віднімання двох МО зображень (МОЗ), отриманих за однакових за величиною, але різних за знаком кутів β (поляризатор / аналізатор) або різних напрямків H , дає змогу знехтувати невідомими параметрами оптичної схеми пристрою під час його калібрування [2].

Поєднання сучасних високошвидкісних фотокамер для реєстрації МОЗ із передовими методами їхнього цифрового оброблення забезпечує ефективну адаптацію МО плівкових пристроїв для неруйнівного контролю матеріалів і виробів. Зокрема, для виявлення локальних структурних змін у сталях під дією механічних та термічних навантажень; залишкових напружень, що виникають у процесі зварювання та механічного оброблення деталей; дефектів зварювання; мікротріщин; корозійних пошкоджень поверхні під захисними лакофарбовими покриттями та пітингів [3, 4].

МО плівкові сенсори (МОПС), що працюють на основі ефекту Фарадея, вирізняються високою чутливістю до локальних змін магнетного потоку та здатністю формувати контрастні зображення з великою просторовою роздільною здатністю в зоні витоку МП у режимі реального часу [5]. На відміну від класичних методів дефектоскопії, таких як вихрострумові, магнетопорошкові чи ультразвукові, МО не потребують прямого контакту з поверхнею об'єкта контролю і менш чутливі до геометричних особливостей дефектів поблизу країв виробів, отворів тощо. Це робить їх перспективними для контролю складних деталей і тонкостінних конструкцій [6—9].

Використання сучасних алгоритмів опрацювання зображень та нещодавно розроблених методів машинного навчання може істотно підвищити як достовірність, так і швидкість контролю на основі МОПС. Наприклад, F. Tian зі співавт. [10] запропонували статистичний алгоритм на основі подвійних граничних пікселів для розрахунку розмірів тріщин. Це дало змогу оцінити тріщини завширшки понад 0,1 мм, при цьому ймовірність точного визначення їхньої довжини становила 92 %. У роботі [11] було описано та оцінено модель нейронної мережі U-Net із новою функцією втрат DBCE Loss для покращення сегментації тріщин на зображеннях бетону, яку можна використовувати й для МОЗ. Досягнута достовірність сегментації становила 97 %. K. Laxman зі співавт. [12] розробили інтегровану CNN з регресійними моделями для прогнозування глибини тріщин.

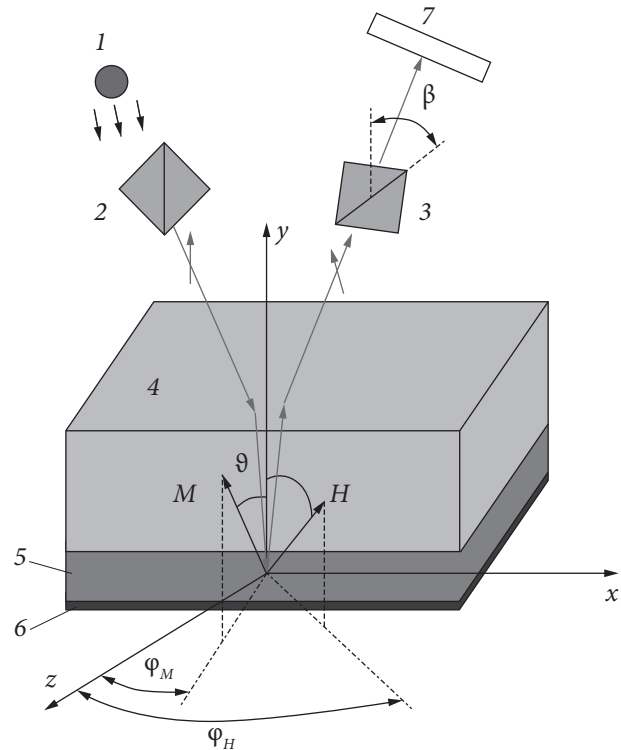


Рис. 1. Принципи формування магнетооптичного зображення: 1 — джерело світла; 2, 3 — поляризатор і аналізатор світла; 4 — підкладка з монокристалічного галій-гадолінієвого гранату (GGG); 5 — магнеточутлива плівка; 6 — дзеркало; 7 — фотоприймач; H — вектор напруженості зовнішнього МП; θ — кут орієнтації вектора M відносно площини плівки; β — кут зміщення відносно схрещеного положення поляризатора і аналізатора світла

Можливості технології МО неруйнівного контролю на основі ефекту Фарадея за останні роки значно розширено. Це пов'язано з розробленням високочутливих МОПС з контрольованою чутливістю та нових технологічних прийомів їх виготовлення, які не потребують значних енергетичних затрат і дають змогу створювати тонкі МО плівки ферит-гранатів, що містять оксиди заліза і рідкісноземельних металів. Серед таких сучасних технологій можна відзначити метод формування магнеточутливого шару на кристалічних підкладках GGG у насичених розчинах [13]. На таких підкладках за допомогою висушування і відпалу за температури 850 °С було отримано МОПС із фарадеївським обертанням 10°/мкм. Відомо також технологія створення МОПС завтовшки 1–4 мкм із дрібнодисперсних частинок гранатів $\text{Bi}_{0,5}\text{Y}_{2,5}\text{Fe}_{5,0}\text{O}_{12}$ на полімерній підкладці [14] за допомогою високообертової центрифуги. Хоча такі МОПС мають досить малий кут обертання $\pm 0,06^\circ$ за МП ± 6 мТ, завдяки гнучкій основі їх можна використовувати на викривлених поверхнях виробів.

Мета дослідження — розроблення методу виявлення прихованих тріщиноподібних дефектів у металах за їхніми МО зображеннями.

Огляд сучасної літератури свідчить, що для розвитку МО виявлення тріщин залишаються актуальними такі завдання:

- підвищення достовірності виявлення малих закритих тріщин на МОЗ з акцентом на відокремлення слабких сигналів від фонового шуму;
- забезпечення високої просторової роздільної здатності МОЗ, що є необхідним для прецизійного вимірювання розмірів тріщин, зокрема їхньої ширини та прогнозування глибини.

Результати числового моделювання. Для забезпечення не лише надійного виявлення дефектів у феромагнетних об'єктах за допомогою МО методів, але й оцінювання їхніх

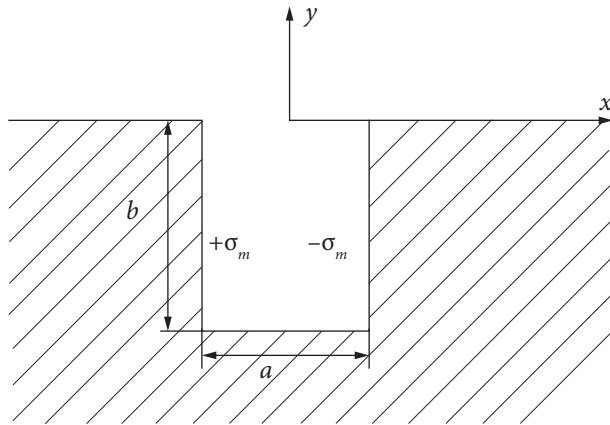


Рис. 2. Геометрія поперечного перерізу моделі тріщини у вигляді прямокутної канавки

розмірів необхідні теоретичні розрахунки розподілу МП розсіювання над поверхнею намагнетченого об'єкта в місцях дефектів. Очевидно, що топографія МП дефекту залежить від багатьох факторів, насамперед від його геометричних параметрів. У загальному випадку розрахунок МП розсіювання таких дефектів — складна трудомістка математична задача, розв'язання якої утруднює її інженерне застосування. Тому для дослідження розподілу МП над поверхнею намагнетченого об'єкта з тріщиною автори використали магнетну дипольну модель [15—17]. У цій моделі витоку МП у першому наближенні описували

як поле індукованих магнетних зарядів, що розташовані на стінках дефекту.

Дефекти типу тріщини характерні тим, що величина розкриття тріщини та її глибина значно менші за довжину. Тому такий дефект моделювали нескінченно протяжною канавкою прямокутного перерізу (рис. 2). МП витоку дефекту у формі канавки описували полем двох пластин, на поверхнях яких рівномірно розподілені магнетні заряди з щільністю $\pm\sigma_m$. Для їх розрахунку як функції глибини b , ширини a та магнетної проникності μ матеріалу використали апроксимацію, запропоновану Ферстером [18]:

$$\sigma_m = \frac{1}{2\pi} \frac{2b/a + 1}{(1/\mu) 2b/a + 1} F_L H_0, \quad (2)$$

де F_L — константа, яка залежить від величини поля намагнетчування H_0 і магнетних властивостей матеріалу.

Позитивним аспектом використання такої моделі є можливість дослідження характеру розподілу МП тріщини залежно від її геометричних параметрів. Розрахунок проведено для тестового об'єкта контролю намагнетченого зовнішнім однорідним МП, вектор інтенсивності якого спрямований перпендикулярно до бічних граней канавки. Для виробів зі сталі та за високих значень прикладеного МП приблизне значення константи становить $F_L \approx 2,62$ [18].

У вибраній системі координат (див. рис. 2) вираз для вертикальної складової МП над поверхнею намагнетченого об'єкта має вигляд [16]

$$H(x, y) = \frac{\sigma_m}{4\pi} \ln \left[\frac{((a/2-x)^2 + y^2)((a/2+x)^2 + (b+y)^2)}{((a/2+x)^2 + y^2)((a/2-x)^2 + (b+y)^2)} \right]. \quad (3)$$

За виразом (3) розраховували розподіл поля витоку дефекту типу канавки за різних геометричних параметрів та відстані від поверхні. Магнетні заряди вважалися розподіленими вздовж поверхонь канавки з густиною, обчисленою відповідно до рівняння (2). Для зручності графічного подання МП його значення було нормовано на величину поля на-

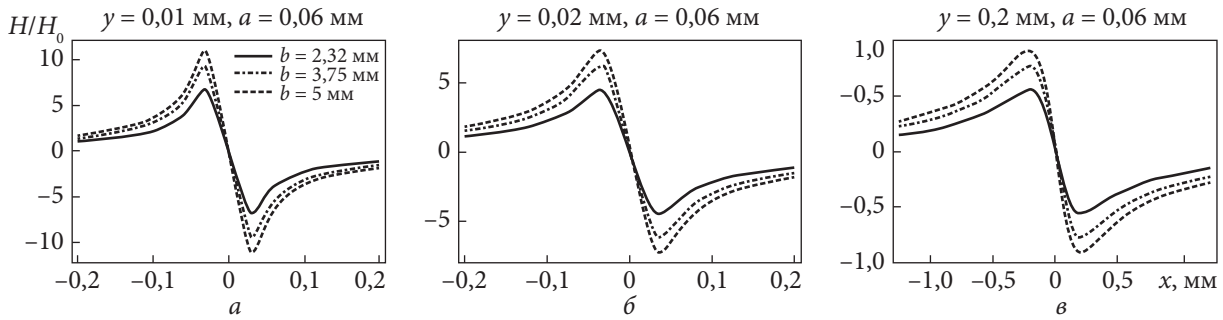


Рис. 3. Залежність вертикальної складової МП над канавкою для різних висот та геометричних параметрів

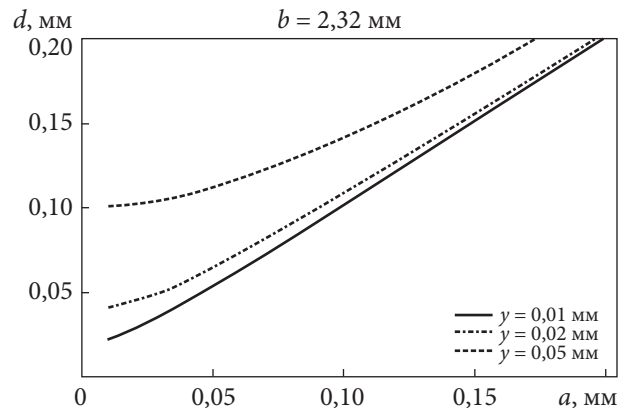


Рис. 4. Залежність проміжку між екстремальними точками вертикальної складової МП від відстані до поверхні намагнетченого об'єкта

магнетчування H_0 . Розраховані залежності вертикальної складової МП на різних висоті над поверхнею намагнетченого об'єкта для різних глибин канавки показано на рис. 3. Розміри модельних канавок вибирали близькими до розмірів реальних тріщиноподібних дефектів на зразках, які використовували під час експериментів.

Аналіз залежності витоку МП від геометричних параметрів канавки показує, що амплітуда вертикальної складової зменшується зі збільшенням відстані y до поверхні, приблизно у 10 разів для вибраного діапазону зміни y . Водночас зі збільшенням глибини канавки b збільшуються екстремальні значення вертикальної складової.

Також дослідили залежність проміжку між екстремальними точками d від відстані до поверхні намагнетченого об'єкта (рис. 4). Виявлено, що за невеликої відстані над поверхнею об'єкта $y \leq 0,1$ мм (сумірної з шириною канавки) проміжок між екстремальними точками вертикальної складової МП практично збігається з шириною канавки. Проте з подальшим збільшенням висоти залежність проміжку між екстремальними точками від висоти набуває нелінійного і монотонного характеру. Монотонність залежності забезпечує однозначність визначення (за певним алгоритмом) ширини канавки.

Експериментальні дослідження. У більшості випадків для отримання МОЗ застосовують дві стандартні схеми реєстрації: одну з освітленням, перпендикулярним до площини МОПС, іншу — з косим освітленням [5, 9, 16]. Косе освітлення, крім конструктивних особливостей оптичної системи, має перевагу в тому, що світловий промінь проходить довший шлях крізь МОПС, що зазвичай забезпечує більший кут повороту площини поляризації для одного й того самого типу МОПС.

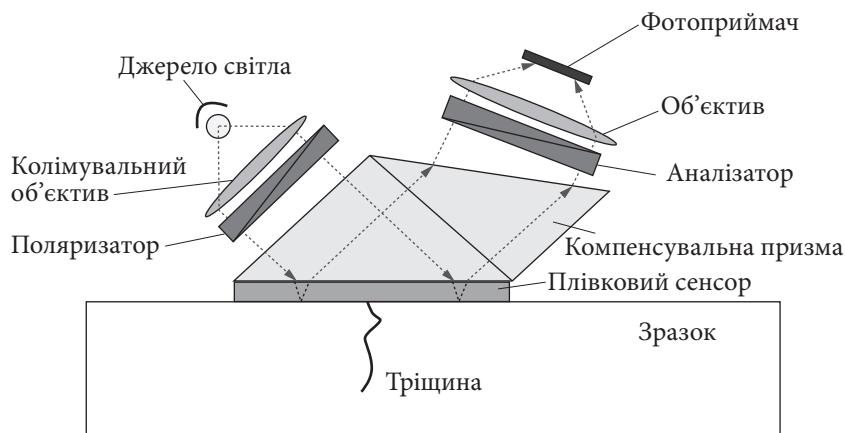


Рис. 5. Схема реєстрації МОЗ із застосуванням компенсувальної призми

Для контролю виробів під косим освітленням іноді використовують призму, розташовану над МОПС із дзеркальним покриттям (див. рис. 1) [9]. У такій конфігурації колімований промінь від джерела світла проходить крізь призму та потрапляє під кутом на МОПС. Відбившись від дзеркального покриття, нанесеного на МОПС, світло двічі проходить крізь нього, далі — через аналізатор і потрапляє на матричний фотоприймач відеокамери. Таким чином, за наявності витoku МП над дефектом під час проходження світла крізь МОПС відбувається зміна його площини поляризації пропорційно до напруженості МП, що дає змогу візуалізувати топографію МП дефекту.

Недоліком цього методу отримання МОЗ є те, що зображення, сформоване на фотоприймачі, має обмежену глибину різкості. Для усунення цього недоліку запропоновано нову схему отримання МОЗ (рис. 5). Вона відрізняється тим, що перед аналізатором використали компенсувальну призму, яка забезпечує високий контраст МОЗ усієї ділянки контролю. Ця схема формування МОЗ була реалізована в макеті МО пристрою під час дослідження серії зразків із втомними тріщинами.

Перед МО вимірюваннями на зразки наносили шар фарби так, щоб положення тріщин візуально не спостерігалось. Отримані МОЗ дефектів у тестових зразках, що виготовлені зі сталі 38ХС, наведено на рис. 6.

Під час експерименту в зразках індукували постійне МП за допомогою електромагнета, полюси якого розташовували по різні боки тріщини. Струм у обмотках електромагнету підтримували постійним на рівні 1,75 А для всіх зразків і за необхідності змінювали його напрям.

Для забезпечення оптимального функціонування пристрою більшість режимів його роботи автоматизовано, включно з опрацюванням зареєстрованих зображень. Для мінімізації випадкової похибки оцінювання розміру дефекту під час експерименту використовували усереднення кількох десятків магнетооптичних зображень, зареєстрованих без зміни положення магнетооптичного сенсора за короткий проміжок часу, який становив 1—2 с. При цьому система стабілізації пристрою підтримує в обмотці електромагнету постійну амплітуду змінного струму за зовнішньої температури від -5 до $+30$ °С та нормального атмосферного тиску. Повторюваність результатів оцінювання розмірів дефектів здебільшого визначається стабільністю положення магнетооптичного сенсора над дефектом.

Похибка оцінювання розмірів дефектів за МОЗ, очевидно, залежить від суб'єктивних навичок оператора; тому для отримання достовірних результатів і автоматизації процесів контролю необхідно розроблення нових та модифікація відомих алгоритмів опрацювання МОЗ.

Алгоритми опрацювання магнетооптичних зображень. Для виявлення дефектів зварювання за допомогою МОЗ було запропоновано метод об'єднання зображень на основі стандартного відхилення інтенсивності пікселів [19]. Експериментальні результати показали, що застосування швидкої фільтрації може істотно підвищити швидкість попереднього оброблення зображень та забезпечити хороший ефект згладжування. Порівняно з іншими алгоритмами об'єднання зображень запропонований метод дає змогу поліпшити якість зображення для виявлення дефектів на МОЗ і не потребує їхнього попереднього скринінгу. Для точнішого аналізу було створено тривимірну модель МОЗ на основі методу скінченних елементів, щоб зрозуміти зміну МП в області, що цікавить, під дією обертового МП.

І. Не зі співавт. [20] використовували МО прилад для отримання зображень зразків, виготовлених методом точкового контактного зварювання. Шляхом синтезу тривимірних напівтонових зображень, гістограм та характеристик зображень було сформульовано узагальнені правила візуалізації МОЗ зразків. Для оптимізації якості зображень було застосовано технологію їхнього покращення і проведено порівняння з методами вирівнювання гістограм, гамма-перетворення тощо. Набір даних зображень, покращених за допомогою відповідних методів, може бути використаний для подальших досліджень МО інформації зображень та виявлення дефектів зварювання.

Т. Fujita зі співавт. [21] запропонували МО дифракційну глибоку нейронну мережу (МО-D2NN). Вони змоделювали кілька МО-D2NN, що складаються з п'яти прихованих шарів, виготовлених із магнетного матеріалу, який містить 100×100 магнетних доменів із шириною домену 1 мкм та відстанню між шарами 0,7 мм. Мережі демонструють достовірність класифікації $>90\%$ для набору даних MNIST, коли як метрика класифікації використовується рівень сірого. Крім того, достовірність класифікації $>80\%$ досягається навіть для невеликого кута обертання Фарадея $\pi/100$ рад, коли як метрика класифікації використовується кут поляризації. МО-D2NN дає змогу перезаписувати приховані шари, що було неможливо в попередніх імплементаціях.

У цьому дослідженні використано новий МО пристрій, що дає змогу отримувати контрастні МОЗ великої зони моніторингу поверхні металевих зразків під час виявлення прихованих тріщин, а також визначення його ефективності. Також виконано порів-

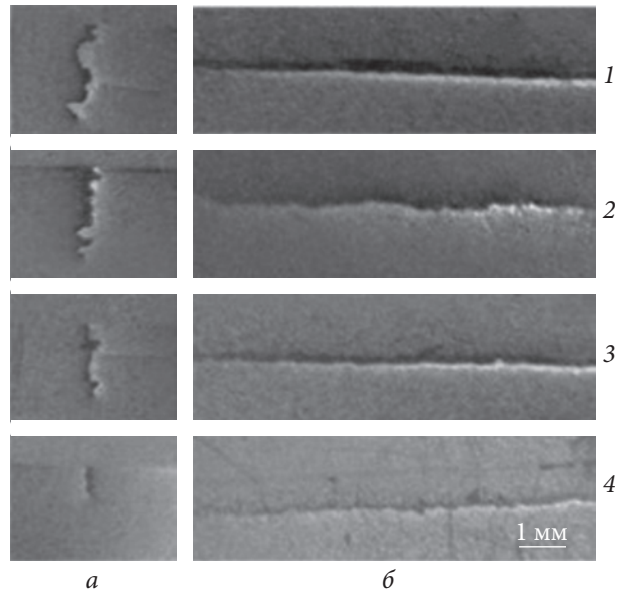


Рис. 6. МОЗ тріщин у зразках сталі 38ХС за струму збудження МП 1,75 А: а — вигляд збоку зразка; б — вигляд зверху зразка

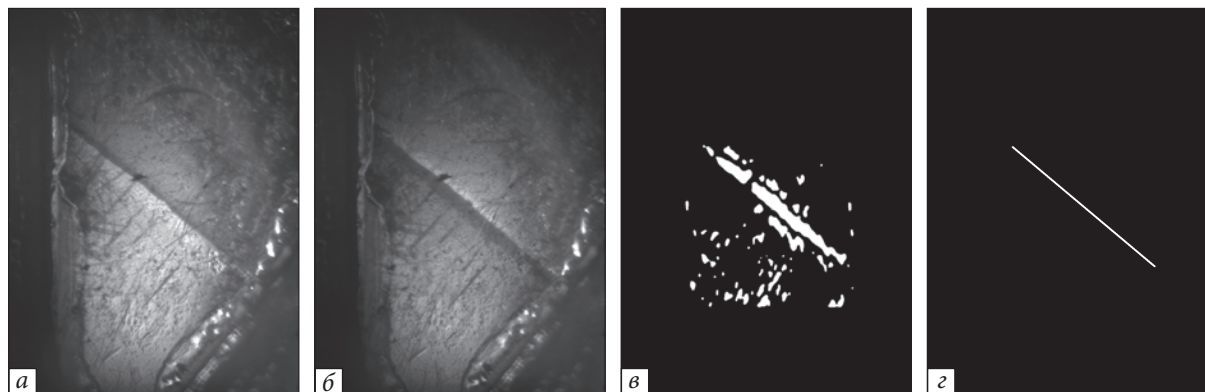


Рис. 7. Вхідні зображення з позитивною (а) та негативною (б) поляризацією струму, результат сегментації зображення тріщиноподібного дефекту (в) та локалізація тріщини (г)

няння розрахункових розподілів МП на імітації дефекту тріщиноподібного типу з експериментально отриманими профілями МП дефекту за його МОЗ. За допомогою ефекту Фарадея для відображення розподілу МП можна формувати висококонтрастні МОЗ прихованих дефектів і отримувати інформацію про їхню геометрію, що є важливим під час неруйнівного контролю й оцінювання надійності та довговічності металевих елементів конструкцій.

Для виявлення дефектів на технічних зображеннях необхідно застосовувати методи попереднього оброблення, локалізації дефектів, а також їх сегментації та класифікації. У цій частині роботи основну увагу приділено методам локалізації об'єктів та їх сегментації. Для візуалізації дефектів було підраховано різницю попередньо усереднених 10 МОЗ, отриманих за різних напрямків струму збудження електромагнету. Запропонований підхід передбачає такі кроки.

Крок 1. Оброблення МОЗ з використанням маски з профілем, що відповідає профілю дефекту за виразом

$$D(i, j) = \sum_{k=-w}^w M(k) V(i + k, j). \quad (4)$$

У результаті такого оброблення функція інтенсивності набуває більших значень у областях тріщини.

Результати оцінювання ширини втомних тріщин у тестових зразках

Номер зразка	Ширина за металографічним мікроскопом, мкм	Ширина за магнетооптичним зображенням, мкм	Середньоквадратичне відхилення ширини за магнетооптичним зображенням, мкм
1	225 ± 63	224	30
2	183 ± 35	210	46
3	184 ± 42	182	43
4	209 ± 85	112	21

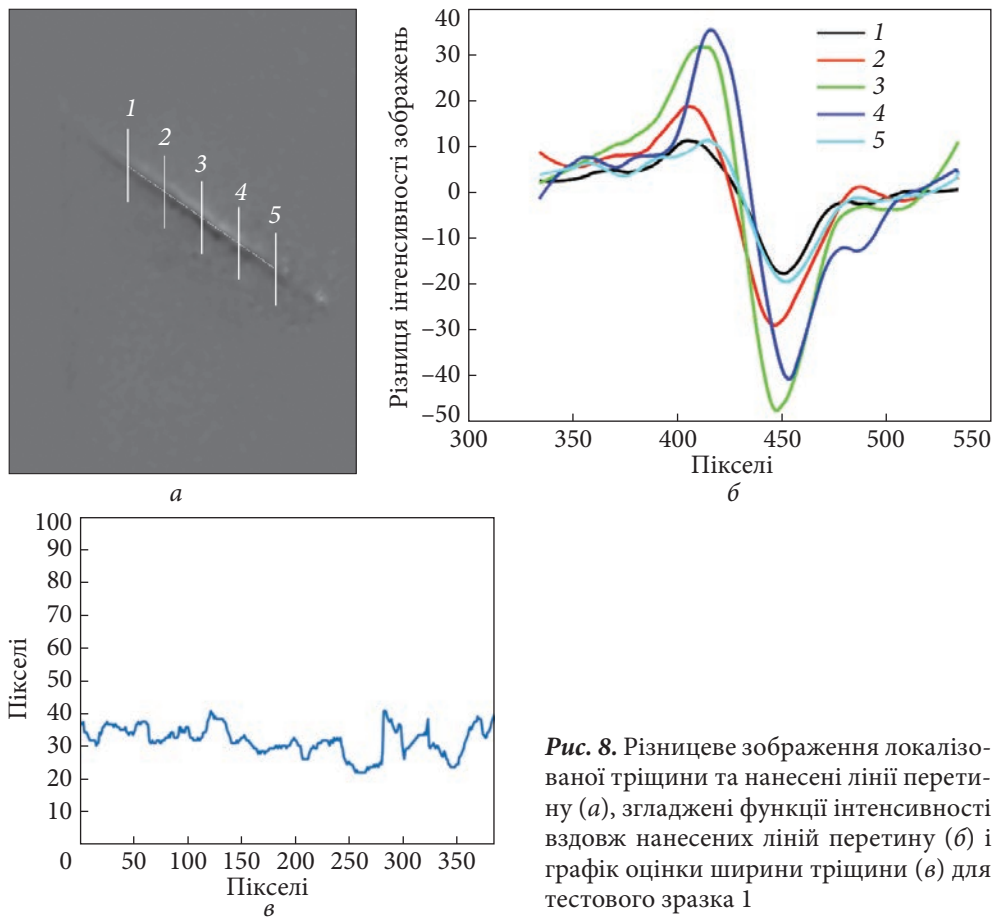


Рис. 8. Різницеве зображення локалізованої тріщини та нанесені лінії перетину (а), згладжені функції інтенсивності вздовж нанесених ліній перетину (б) і графік оцінки ширини тріщини (в) для тестового зразка 1

Крок 2. Сегментація МОЗ пороговим методом, морфологічне потоншення та апроксимація відрізком зони тріщини. Результати сегментації та локалізації зони тріщини зразка 1 наведено на рис. 7.

Крок 3. Побудова ліній, що перетинають тріщину для визначення характерних особливостей для подальшого аналізу її параметрів на різницевому зображенні, отриманому відніманням зображень з позитивною та негативною поляризацією струму (рис. 8, а). Функцію інтенсивності вздовж ліній згладжували методом Савицького—Голея [22].

Ширину тріщини оцінювали за різницею координат точок екстремумів інтенсивності вздовж перерізів тріщини для різницевих зображень з урахуванням нахилу тріщини відносно кадру зображення. Для чотирьох тестових зразків усереднені оцінки ширини тріщини становлять 32, 30, 26 та 16 пікселів відповідно, що становить 224, 210, 182 та 112 мкм.

Ширину втомних тріщин визначали за допомогою металографічного мікроскопа в різних точках уздовж їх довжини на поверхні зразка і оцінювали за магнетооптичними зображеннями (таблиця). Отримані експериментальні результати добре корелюють з розрахунковими відстанями між максимумами вертикальної складової МП над модельним дефектом канавкового типу, розміри якого відповідають розмірам тріщин на тестових зразках.

Висновки. Створено пристрій для МО виявлення прихованих тріщин у феромагнетних матеріалах, що ґрунтується на ефекті Фарадея. З використанням дипольної моделі виконано розрахунки розподілу МП розсіювання над поверхнею намагнетченого об'єкта з модельним дефектом типу канавки і отримано топографію поля цього дефекту залежно від його геометричних параметрів. Створена експериментальна установка дала змогу ефективно реєструвати витоки МП у зонах дефектів і формувати МОЗ прихованих поверхневих тріщин у зразках зі сталі. Завдяки запропонованій новій оптичній схемі реєстрації вдалося розширити ділянку контролю поверхні зразків і створити контрастні МОЗ.

Розроблено метод сегментації та локалізації тріщини на усереднених різницевих МОЗ, отриманих за різних напрямків струму збудження електромагнету. Досліджено нормалізований розподіл інтенсивності МОЗ уздовж поперечних перерізів тріщини та оцінено її ширину за відстанню між екстремальними точками на МОЗ.

Результати дослідження свідчать про ефективність запропонованих пристрою і методу опрацювання МОЗ для вирішення завдань неруйнівного контролю сталевих елементів конструкцій та виробів.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Gerken M., Sievers S., Schumacher H. W. Inhomogeneous field calibration of a magneto-optical indicator film device. *Meas. Sci. Technol.* 2020. **31**, № 7. 075009. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab816e>
2. Dorosinskiy L., Sievers S. Magneto-optical indicator films: fabrication, principles of operation, calibration, and applications. *Sensors*. 2023. **23**, № 8. 4048. <https://doi.org/10.3390/s23084048>
3. Agalidi Y., Kozhukhar P., Levyi S., Turbin D. Enhanced magneto-optical imaging of internal stresses in the removed surface layer. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2015. **30**, № 4. P. 347—355. <https://doi.org/10.1080/10589759.2015.1044527>
4. 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 directions. *Opt. Laser Technol.* 2020. **121**. 105772. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105772>
5. Neu V., Pedrini G., Soldatov I., Reichelt S., Schäfer R. Lensless magneto-optical imaging. *Sci. Rep.* 2025. **15**, № 1. 28277. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10005-1>
6. Максименко О. П., Вороняк Т. І., Стасишин І. В., Сиворотка І. І. Оцінювання характеристик ферит-гранатових плівок для магнетооптичного контролю матеріалів. *Відбір і обробка інформ.* 2024. Вип. 52 (128). С. 61—67. <https://doi.org/10.15407/vidbir2024.52.061>
7. Stasyshyn I., Maksymenko O. Visualization of hidden cracks in ferromagnetic materials by magnetooptical method. *Materials Science and Surface Engineering: International Young Scientists Conference* (Lviv, Ukraine, 24—26 Sept. 2025). Lviv, 2025. P. 276—279. <https://doi.org/10.15407/msse2025.01.276>
8. Стасишин І.В., Максименко О.П., Вороняк Т.І., Івасенко І.Б., Берегуляк О.Р., Стецько І.Г. Застосування магнетооптичного методу для неруйнівного контролю заклепкових з'єднань. *Відбір і обробка інформ.* 2025. Вип. 53 (129). С. 58—64. <https://doi.org/10.15407/vidbir2025.53.058>
9. Максименко О.П., Сурядова О.Д. Застосування магнетооптичного методу для виявлення змін структури матеріалу. *Відбір і обробка інформ.* 2021. Вип. 49 (125). С. 32—36. <https://doi.org/10.15407/vidbir2021.49.032>
10. Tian F., Zhao Y., Che X., Zhao Y., Xin D. Concrete crack identification and image mosaic based on image processing. *Appl. Sci.* 2019. **9**, № 22. 4826. <https://doi.org/10.3390/app9224826>
11. Prasetyo A., Purnama I.K.E., Yuniarno E.M., Suprobo P. Improving crack detection precision of concrete structures using U-Net architecture and novel DBCE loss function. *IEEE Access*. 2025. **13**. P. 20903—20922. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3534803>
12. Laxman K.C., Tabassum N., Ai L., Cole C., Ziehl P. Automated crack detection and crack depth prediction for reinforced concrete structures using deep learning. *Constr. Build. Mater.* 2023. **370**. 130709. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130709>

13. Kasahara K., Wang S., Ishibashi T., Manago T. Magneto-optical images of submicron-size Bi-substituted YIG patterns prepared by electron-beam irradiated metal-organic decomposition. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2019. **58**, № 6. 060906. <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab1fc7>
14. Hashimoto R., Itaya T., Uchida H., Funaki Y., Fukuchi S. Properties of magnetic garnet films for flexible magneto-optical indicators fabricated by spin-coating method. *Materials*. 2022. **15**, № 3. 1241. <https://doi.org/10.3390/ma15031241>
15. Feng B., Wu J., Tu H., Tang J., Kang Y. A review of magnetic flux leakage nondestructive testing. *Materials*. 2022. **15**, № 20. 7362. <https://doi.org/10.3390/ma15207362>
16. Li H., Chen Z., Zhang D., Sun H. Reconstruction of magnetic charge on breaking flaw based on two-layers algorithm. *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.* 2016. **52**. P. 1133—1139. <https://doi.org/10.3233/JAE-162148>
17. Trevino D.A.G., Dutta S.M., Ghorbel F.H., Karkoub M. An improved dipole model of 3-D magnetic flux leakage. *IEEE Trans. Magn.* 2016. **52**, № 12. P. 1—7. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2475429>
18. Förster F. New findings in the field of non-destructive magnetic leakage field inspection. *NDT Int.* 1986. **19**, № 1. P. 3—14. [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(86\)90134-3](https://doi.org/10.1016/0308-9126(86)90134-3)
19. 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 Int.* 2023. **138**. 102887. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102887>
20. He J., Gao X., Yang H., Gao P., Zhang Y. Analysis of image formation laws and enhancement methods for weld seam defects based on infrared and magneto-optical sensor technology. *J. Nondestruct. Eval.* 2024. **43**, № 4. 101. <https://doi.org/10.1007/s10921-024-01118-0>
21. Fujita T., Sakaguchi H., Zhang J., Nonaka H., Sumi S., Awano H., Ishibashi T. Magneto-optical diffractive deep neural network. *Opt. Express*. 2022. **30**, № 20. P. 36889—36899. <https://doi.org/10.1364/OE.470513>
22. Luo J., Ying K., Bai J. Savitzky—Golay smoothing and differentiation filter for even number data. *Signal Process.* 2005. **85**, № 7. P. 1429—1434. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2005.02.002>

Надійшла до редакції 03.07.2026

REFERENCES

1. Gerken, M., Sievers, S. & Schumacher, H. W. (2020). Inhomogeneous field calibration of a magneto-optical indicator film device. *Meas. Sci. Technol.*, 31, No. 7, 075009. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab816e>
2. Dorosinskiy, L. & Sievers, S. (2023). Magneto-optical indicator films: fabrication, principles of operation, calibration, and applications. *Sensors*, 23, No. 8, 4048. <https://doi.org/10.3390/s23084048>
3. Agalidi, Y., Kozhukhar, P., Levyi, S. & Turbin, D. (2015). Enhanced magneto-optical imaging of internal stresses in the removed surface layer. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 30, No. 4, pp. 347-355. <https://doi.org/10.1080/10589759.2015.1044527>
4. Li, Y., Gao, X., Zhang, Y., You, D., Zhang, N., Wang, C. & Wang, C. (2019). Detection model of invisible weld defects by magneto-optical imaging at rotating magnetic field directions. *Opt. Laser Technol.*, 121, 105772. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105772>
5. Neu, V., Pedrini, G., Soldatov, I., Reichelt, S. & Schäfer, R. (2025). Lensless magneto-optical imaging. *Sci. Rep.*, 15, No. 1, 28277. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10005-1>
6. Maksymenko, O. P., Voronyak, T. I., Stasyshyn, I. V. & Syvorotka, I. I. (2024). Evaluation of the characteristics of ferrite garnet films for magneto-optical control of materials. *Information Extraction and Processing*, Iss. 52, pp. 61-67 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/vidbir2024.52.061>
7. Stasyshyn, I. & Maksymenko, O. (2025, September). Visualization of hidden cracks in ferromagnetic materials by magnetooptical method. *International Young Scientists Conference on Materials science and surface engineering* (pp. 276-279). Lviv. <https://doi.org/10.15407/msse2025.01.276>
8. Stasyshyn, I. V., Maksymenko, O. P., Voronyak, T. I., Ivasenko, I. B., Berehulyak, O. R. & Stetsko, I. H. (2025). Application of magneto-optical method for non-destructive testing of riveted joints. *Information Extraction and Processing*, Iss. 53, pp. 58-64 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/vidbir2025.53.058>
9. Maksymenko, O. P. & Suriadova, O. D. (2021). Application of magneto-optical method for detection of material structure changes. *Information Extraction and Processing*, Iss. 49, pp. 32-36 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/vidbir2021.49.032>
10. Tian, F., Zhao, Y., Che, X., Zhao, Y. & Xin, D. (2019). Concrete crack identification and image mosaic based on image processing. *Appl. Sci.*, 9, No. 22, 4826. <https://doi.org/10.3390/app9224826>

11. Prasetyo, A., Purnama, I. K. E., Yuniarno, E. M. & Suprobo, P. (2025). Improving crack detection precision of concrete structures using U-Net architecture and novel DBCE loss function. *IEEE Access*, 13, pp. 20903-20922. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3534803>
12. Laxman, K. C., Tabassum, N., Ai, L., Cole, C. & Ziehl, P. (2023). Automated crack detection and crack depth prediction for reinforced concrete structures using deep learning. *Constr. Build. Mater.*, 370, 130709. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130709>
13. Kasahara, K., Wang, S., Ishibashi, T. & Manago, T. (2019). Magneto-optical images of submicron-size Bi-substituted YIG patterns prepared by electron-beam irradiated metal-organic decomposition. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 58, No. 6, 060906. <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab1fc7>
14. Hashimoto, R., Itaya, T., Uchida, H., Funaki, Y. & Fukuchi, S. (2022). Properties of magnetic garnet films for flexible magneto-optical indicators fabricated by spin-coating method. *Materials*, 15, No. 3, 1241. <https://doi.org/10.3390/ma15031241>
15. Feng, B., Wu, J., Tu, H., Tang, J. & Kang, Y. (2022). A review of magnetic flux leakage nondestructive testing. *Materials*, 15, No. 20, 7362. <https://doi.org/10.3390/ma15207362>
16. Li, H., Chen, Z., Zhang, D. & Sun, H. (2016). Reconstruction of magnetic charge on breaking flaw based on two-layers algorithm. *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, 52, pp. 1133-1139. <https://doi.org/10.3233/JAE-162148>
17. Trevino, D. A. G., Dutta, S. M., Ghorbel, F. H. & Karkoub, M. (2015). An improved dipole model of 3-D magnetic flux leakage. *IEEE Trans. Magn.*, 52, No. 12, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1109/tmag.2015.2475429>
18. Förster, F. (1986). New findings in the field of non-destructive magnetic leakage field inspection. *NDT Int.*, 19, No. 1, pp. 3-14. [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(86\)90134-3](https://doi.org/10.1016/0308-9126(86)90134-3)
19. Liu, Q., Ye, G., Gao, X., Zhang, Y. & Gao, P. P. (2023). Magneto-optical imaging nondestructive testing of welding defects based on image fusion. *NDT & E Int.*, 138, 102887. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102887>
20. He, J., Gao, X., Yang, H., Gao, P. & Zhang, Y. (2024). Analysis of image formation laws and enhancement methods for weld seam defects based on infrared and magneto-optical sensor technology. *J. Nondestruct. Eval.*, 43, No. 4, 101. <https://doi.org/10.1007/s10921-024-01118-0>
21. Fujita, T., Sakaguchi, H., Zhang, J., Nonaka, H., Sumi, S., Awano, H. & Ishibashi, T. (2022). Magneto-optical diffractive deep neural network. *Opt. Express*, 30, No. 20, 36889. <https://doi.org/10.1364/oe.470513>
22. Luo, J., Ying, K. & Bai, J. (2005). Savitzky—Golay smoothing and differentiation filter for even number data. *Signal Process.*, 85, No. 7, pp. 1429-1434. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2005.02.002>

Received 03.07.2026

O.P. Maksymenko¹, <https://orcid.org/0000-0002-2905-1771>

I.B. Ivasenko^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0003-3795-9779>

I.V. Stasyshyn^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0003-2657-2878>

O.R. Berehulyak¹, <https://orcid.org/0000-0002-0428-1458>

R.A. Vorobel¹, <https://orcid.org/0000-0001-5085-4301>

Ya.P. Kulynych¹, <https://orcid.org/0000-0003-2148-6006>

T.I. Voronyak¹, <https://orcid.org/0000-0003-0011-0771>

¹ Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

² Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

E-mail: olena.berehulyak@gmail.com

DEFECTOMETRY OF HIDDEN CRACKS IN METALS BY THEIR MAGNETO-OPTICAL IMAGES

A new method for the acquisition and processing of magneto-optical images of hidden crack-like defects in metal products using a crystalline magneto-optical film is proposed. A device for capturing magneto-optical images of ferromagnetic materials based on the Faraday effect has been developed. The use of oblique illumination in the device's design, along with an additional compensating prism placed in front of the analyzer, has made it possible to increase the inspection area, enhance sensitivity to the magnetic field scattered by defects, and ensure high contrast in the magneto-optical image of the entire inspected area. Experimental testing of this device on steel specimens with fatigue cracks demonstrated its effectiveness. To improve the reliability of defect detection, an algorithm for processing magneto-optical images was proposed; this algorithm is designed to segment and locate cracks by taking into account the characteristic features of the image. An assessment of crack width was performed based on an analysis of the normalized intensity distribution of a magneto-optical image along cross-sections of the crack. Theoretical calculations were performed to determine the distribution of the scattered magnetic field above the surface of a magnetized object at defect locations. Using a dipole model and a non-uniform distribution of magnetic charges along the edges of the defect, the profiles of the vertical component of the magnetic field scattered by the defect were calculated. The topography of the defect field as a function of its geometric parameters was obtained. The results obtained are in good agreement with experimental data. The results of the study indicate the effectiveness of the proposed device and methods for processing magneto-optical images for the non-destructive testing of steel structural elements and products.

Keywords: non-destructive testing of products, magnetic field, fatigue crack, magneto-optical image, image processing.