

DOI: <https://doi.org/10.32353/khrife.1.2021.11>
УДК 343.983

Ю. С. Агаліді,

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
ТОВ «РЕГУЛА ФОРЕНЗІКС УА», м. Київ, Україна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3881-8591>,
e-mail: yuriy.agalidi@regulaforensics.com

О. Ю. Кошель,

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки
та судових експертиз Служби безпеки України, м. Київ, Україна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0421-7800>,
e-mail: okukraine@gmail.com

Підвищення достовірності експертної оцінки під час дослідження знищеного рельєфного маркування магнітооптичними приладами

Можливість відновлення даних видаленого рельєфного маркування залежить від чутливості інструментальних засобів дослідження та визначається співвідношенням сигнал/шум.

Останнім часом в експертній практиці для дослідження маркувальних даних металевих об'єктів використовують магнітооптичний метод, реалізацію якого в цій статті представлено на прикладі двох поколінь комплексів, для яких досі не було проведено комплексного порівняльного аналізу.

Метою статті є кількісна та якісна оцінка результатів візуалізації залишкових полів внутрішніх напружень для комплексів магнітооптичного обладнання моделей 2006 р. і 2018 р., а також презентація практичних результатів досліджень, у яких традиційні методи не мали успіху.

Ключові слова: *рельєфне маркування, магнітооптична візуалізація, відновлення даних видаленого маркування, неруйнівні методи.*

Постановка наукової проблеми. Під час дослідження знищеного рельєфного маркування спочатку виконують візуалізацію (невидимих) полів внутрішніх напружень у ділянці номерного майданчика, а потім проводять експертну оцінку здобутих інструментальних даних (непряме органолептичне спостереження результатів візуалізації), тобто достовірність експертної оцінки безпосередньо залежить від чутливості приладів та інформативності інструментальних даних.

Із теорії сигналів відомо, що ймовірність правильного розпізнавання сигналу (контурів знаків маркування) на тлі шуму (структурного шуму досліджуваної поверхні та шумів методу візуалізації) визначають співвідношенням сигнал/шум.

Тому завданням цієї роботи є порівняльна експериментальна оцінка відношення сигнал/шум і ймовірність правильного розпізнавання сигналу під час відновлення знищеного рельєфного маркування для двох комплексів магнітооптичної візуалізації — моделей 2006 р. і 2018 р.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Експертну практику використання магнітооптичних (далі — *МО*) приладів для дослідження рельєфного маркування розпочато нещодавно: перші комплекси запроваджено 2000 р.¹ Основні положення застосування такої техніки в експертизах представлено у відповідній методиці², подальше узагальнення теоретичних основ цього методу здійснено в науковій праці³. Згодом автори методики поглиблено дослідили технічні параметри й виконали апробацію приладів, а також здійснили метрологічне оцінювання їх основних характеристик⁴. Наступним етапом застосування нового інструментального методу стало вивчення його перспективності саме в експертних дослідженнях. Результати порівняння експериментальної оцінки чутливості для *МО*, магнітопорошкового й електрохімічного методів дослідження видаленого рельєфного маркування викладено в низці робіт⁵.

¹ Спосіб магнітооптичного контролю виробу : пат. 42880 Україна. № 99074257 ; заявл. 22.07.1999 р.; опубл. 15.11.2001 р., Бюл. № 10.

² Агалиди Ю. С., Левый С. В., Прохоров-Лукин Г. В. Реализация комплексной методики криминалистических исследований идентификационных номеров автотранспортных средств на программно-аппаратном уровне. *Криминалистика и судебная экспертиза*. 2003. Вып. 51. С. 24—29.

³ Агалиді Ю. С. Магнітооптична візуалізація магнітограм рельєфних зображень і структурних неоднорідностей поверхневого шару феромагнітних виробів : дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2006. 193 с.

⁴ Агалиди Ю. С., Левый С. В., Мачнев А. М. Экспериментальная оценка чувствительности и достоверности магнитооптической визуализации рельефных трасс. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування*. 2006. Вип. 32. С. 39—46 ; Их же. Методика исследований сигналов и шумов при магнитооптической дефектоскопии. *Учёные записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия: физика*. 2006. Вып. 19 (58). № 1. С. 23—29.

⁵ Их же. Сравнительный анализ магнитопорошкового и магнитооптического методов визуализации пространственного распределения магнитного поля при исследовании остаточных напряжений. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування*. 2006. Вип. 31. С. 18—24 ; Про затвердження Інструкції про порядок проведення криміналістичних досліджень транспортних засобів і реєстраційних документів, що їх супроводжують, працівниками Експертної служби МВС України : наказ МВС України від 31.05.2013 р. № 537. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1309-13> (дата звернення: 22.02.2021) ; Агалиди Ю. С., Левый С. В., Мачнев А. М., Прохоров-Лукин Г. В. Сравнительная оценка чувствительности магнитооптического, магнитопорошкового и электрохимического методов при исследовании удалённой рельефной маркировки. Ч. 1—3. *Криминалистика и судебная экспертиза*. 2008. Вып. 54. С. 80—119.

Результатом цих наукових праць ¹ став висновок про певні принципи переваги МО методу, серед яких основними є висока чутливість і неруйнівний характер досліджень, що дає змогу ефективно досліджувати навіть таку складну речовину, як шар іржі з поверхні номерного майданчика.

Підсумком успішної апробації МО приладів і відповідної методики стало впровадження цього методу в експертну практику дослідження маркування автомобілів ².

Наступний помітний крок у розвитку МО техніки для експертних досліджень — розроблення вихореструмового магнітного копіювання, зареєстрованого як національний патент України та міжнародні патенти. Ця технологія дала змогу суттєво підвищити чутливість та інформативність магнітного копіювання, а також розширити сферу застосування МО метода, додавши до переліку об'єктів дослідження не тільки магнітні, а й електропровідні матеріали.

Розвиток теорії методу МО візуалізації сприяв розвитку технічних засобів, які застосовують у криміналістичних лабораторіях понад 40 країн.

Мета статті. Публікації про технічні засоби МО візуалізації, які використовують для експертних досліджень, виходили друком переважно в закордонних виданнях і мало відомі фахівцям України.

У цій статті наведено результати експериментальної оцінки відношення сигнал/шум і ймовірність правильного розпізнавання сигналу під час відновлення знищеного рельєфного маркування для двох комплексів магнітооптичної візуалізації, що порівнюються.

Описано нові можливості МО технології для відновлення видаленого рельєфного маркування металевих магнітних та електропровідних об'єктів.

Презентовано результати експертних досліджень відновлення видаленого рельєфного маркування на реальних об'єктах, для яких здобуття даних про первісне маркування іншими методами було неефективним або неможливим.

Викладення основного матеріалу дослідження. Обладнання. Обидва порівнювані комплекси побудовано на подібних фізичних принципах: можна стверджувати, що вони демонструють еволюцію технічного вдосконалення пристроїв цього типу.

Принцип роботи таких МО приладів детально викладено в публікаціях ³, він полягає в послідовному виконанні низки операцій. Спочатку

¹ Агалиди Ю. С., Левый С. В., Мачнев А. М. Сравнительный анализ ... ; Агалиди Ю. С., Левый С. В., Мачнев А. М., Прохоров-Лукин Г. В. Сравнительная оценка чувствительности ...

² Про затвердження Інструкції про порядок проведення криміналістичних досліджень транспортних засобів ... URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1309-13> (дата звернення: 22.02.2021).

³ Пат. 42880 Україна ; Агалиді Ю. С. Магнітооптична візуалізація магнітограм ... ; Agalidi Yu., Kozhukhar P., Levyi S., Rogozhinsky Yu., Shumsky I. Eddy current fields/magnetic recording/magneto-optic imaging NDI method. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2012. Vol. 27. Is. 2. P. 109—119. DOI: <https://doi.org/10.1080/10589759.2011.610453> (дата звернення: 22.02.2021).

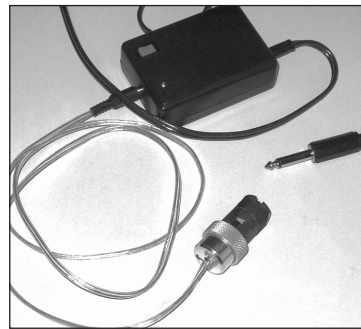
розмагнічують магнітну стрічку (проміжний носій даних). Потім магнітну стрічку вкладають на досліджувану поверхню і за допомогою магнітного сканера виконують магнітне копіювання (магнітографування) — записують на магнітну стрічку відклик магнітного поля з поверхневих шарів номерного майданчика металевого об'єкта дослідження. Відклик магнітного поля відображає рельєфні та структурні неоднорідності (зокрема, і внутрішнє напруження). Потім отриману магнітограму (магнітну стрічку з копією магнітних властивостей) розташовують у МО візуалізуючому приладі, де її покровоко зчитують і перетворюють на видиме зображення з використанням перетворювача на основі МО ефекту Фарадея.

Порівнювані комплекси МО устаткування різняться за конструкторськими та схемотехнічними рішеннями, елементною базою, технологічним рівнем виробництва, програмним і алгоритмічним забезпеченням, що, безумовно, позначається на їх основних функціональних характеристиках.

Так, комплект МО устаткування для досліджень рельєфного маркування моделі 2006 р. (рис. 1) містив: прилад МО візуалізації «Вій-5А», пристрій височастотного підмагнічування та металеву магнітну стрічку для цифрового запису зі сплаву ЕП-298 (як магнітний носій).



а) Прилад МО візуалізації «Вій-5А»



б) Пристрій височастотного підмагнічування

Рис 1. Комплект МО устаткування для досліджень рельєфного маркування (модель 2006 р.)

Прилад МО візуалізації «Вій-5А» (рис. 1) дає змогу копіювати ділянку, що візуалізується, розмірами 150×22 мм, зображення має фізичний розмір точки зображення 37 мкм. Пристрій височастотного підмагнічування використовує гармонійний сигнал частотою 400 Гц і амплітудою приблизно 40 кА/м, що дає змогу підвищити чутливість магнітографування до слабких сигналів полів внутрішніх напружень. Тип використаного магнітного носія — металева магнітна стрічка для цифрового запису ЕП-298 ТУ14-1-375-94 (ширина полоси — 25,4 мм). Цей тип магнітного носія має високу амплітуду записаного сигналу, проте, також має високий рівень структурних шумів.

Комплект МО устаткування для досліджень рельєфного маркування моделі 2018 р. (рис. 2) містить: прилад МО візуалізації «Регула 7505м», пристрій вихореструмового підмагнічування «Регула 7515м», магнітний носій — пластикову магнітну стрічку для аналогового запису *BASF Sm900*.



а) Прилад МО візуалізації «Регула 7505м»



б) Пристрій вихореструмового підмагнічування «Регула 7515м»

Рис. 2. Комплект МО устаткування для досліджень рельєфного маркування (модель 2018 р.)

Прилад МО візуалізації «Регула 7505м» (рис. 2) забезпечує копіювання ділянки, що візуалізується, розмірами 450×18 мм, і фізичний розмір точки зображення 14 мкм, що значно перевершує аналогічні показники попередньої моделі.

Пристрій вихореструмового підмагнічування «Регула 7515м» використовує імпульсний сигнал миттєвої частоти до 1 МГц із регульованою амплітудою, що дає змогу не лише підвищити чутливість магнітографування до слабких сигналів полів внутрішніх напружень, а й створити вихрові струми в поверхневому шарі (скін-ефект), додавши до магнітної компоненти аналізованих даних ще й електричну. Крім того, вживання вихореструмового підмагнічування дає змогу досліджувати не лише магнітні матеріали, а й електропровідні (зокрема — алюмінієві сплави)¹.

¹ Ibid ; Пат. 42880 Україна ; Patent Certificate for Invention (China) № ZL2009801595628, announcement date 30.07.2014 announcement number CN102449470. Inductor of eddy currents for magnetic tape scanning and scanner based thereon. Inventor: Levyi S., Agalidi Yu., Shumsky I. Forwarding letter for the Patent Certificate Y/R: I000364MZ-CN, O/R: PIUA1111850(YFK), filling date 01.07.2009. Patentee: Levyi S., Agalidi Yu., Shumsky I. ; Patent Certificate for Invention (EP) № EP2435822 A1, announcement date 04.04.2018 announcement number 09845325, 09845325.1, 2009845325, EP 2435822 A1, EP 2435822A1, EP-A1-2435822, EP09845325, EP20090845325, EP2435822 A1, EP2435822A1. Inductor of eddy currents for magnetic tape scanning and scanner based thereon. Inventor: Levyi S., Agalidi Yu., Shumsky I. Forwarding letter for the Patent Certificate EP20090845325 filling date 01.07.2009. Patentee: Levyi S., Agalidi Yu., Shumsky I.

Тип використаного магнітного носія — BASF Sm900 (магнітна стрічка для аналогового запису на полімерній основі, ширина магнітного носія — 25,4 мм). Цей тип магнітного носія має не тільки високу амплітуду записаного сигналу, а й низький рівень структурних шумів, що помітно покращує співвідношення сигнал/шум для записаних магнітограм.

Експериментальні дослідження. Метою експериментальних досліджень було отримати візуалізацію латентних зображень напруженого тест-об'єкта (далі — *ТО*); дослідження здійснювали на двох комплексах МО устаткування, які порівнювали.

ТО є пластиною з листового металу (сталь Ст 45 завтовшки 1,5 мм) із первісним маркуванням рельєфними знаками «865», виконаним методом механічної обробки тиском (холодне штампування). Розмір клейм «шрифт № 6» (висота знаків 6 мм), глибина рельєфу знаків 0,3—0,4 мм. Умови зміни первинного номера (видалення маркування): шліфівка зі зняттям шару металу завглибшки 0,5 мм (контури первісних знаків візуально визначити неможливо).

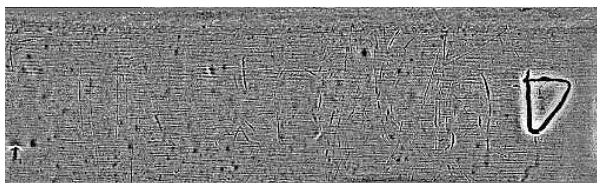
Зовнішній вигляд поверхні *ТО* наведено на рис. 3а, рельєфна мітка у вигляді трикутника праворуч слугує для маркування напруженого боку зразка (бік із видаленими знаками).

Якісна оцінка здобутих експериментальних даних (рис. 3) свідчить, що в результатах МО візуалізації внутрішнього напруження помітні істотні відмінності, зумовлені властивостями порівнюваних моделей комплексів.

Так, комплекс МО моделі 2006 р. (рис. 3б) упевнено візуалізує внутрішнє напруження в ділянці видалених знаків «865» на рівні, що дає змогу з'ясувати їх первісне значення (зображення отримано за результатами застосування вихореструмовеого сканера). Водночас МО зображення має помітні шуми магнітного копіювання — чорні траси від пласкопаралельного переміщення сканера позначають межі ширини ділянки магнітного копіювання. Також помітні структурні шуми металевої магнітної стрічки ЕП-298 — горизонтальні траси, що відповідають орієнтуванню доменної структури й утворилися під час виготовлення магнітної стрічки (прокату полоси). Також характерною особливістю високочастотного магнітного копіювання є висока чутливість до поверхневих дефектів типу подряпин — розташування подряпин в оптичному зображенні (рис. 3а) і МО зображенні (рис. 3б) практично однакове. Проте, за цього виду дослідження (відновлення знаків первісного маркування) такого роду поверхневі дефекти неінформативні: по суті, вони є шумами, які заважають зчитуванню сигналу поля внутрішнього напруження. Крім того, амплітуда сигналу в градаціях яскравості (рис. 3в) виглядає дещо несиметрично — пік яскравості «білого» сягає 209, тобто +81 щодо середнього рівня («сірий» — рівень 128), пік «чорного» складає всього 87 (або -41 від «сірого»).

Комплект МО моделі 2018 р. (рис. 3г) також упевнено візуалізує внутрішнє напруження в ділянці видалених знаків «865», при цьому

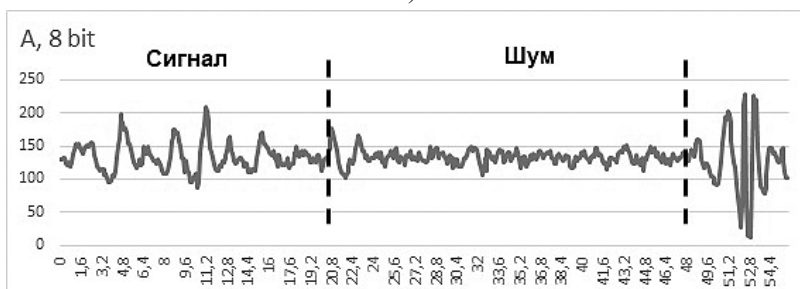
зображення має вищу якість. МО зображення цього комплексу не має помітних шумів — не видно жодних слідів траєкторії сканера під час виконання магнітного копіювання. Структурні шуми полімерної магнітної стрічки *BASF Sm900* практично не помітні, що відповідає дрібній зернистості (приблизно 0,5 мкм) і високій гомогенізації магнітної речовини. Також характерною особливістю вихореструмового магнітного копіювання є низька чутливість до поверхневих дефектів типу подряпин — розташування великих подряпин в оптичному зображенні (рис. 3а) і МО зображенні (рис. 3г) збігається, але дрібні подряпини в МО зображенні відсутні: їх відфільтровано завдяки збудженню вихрових струмів у більш глибокому приповерхневому скін-шарі.



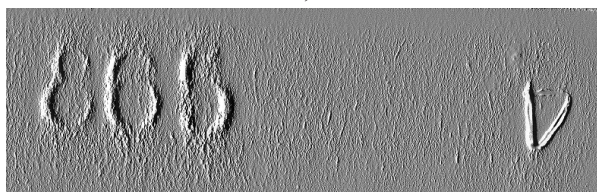
а)



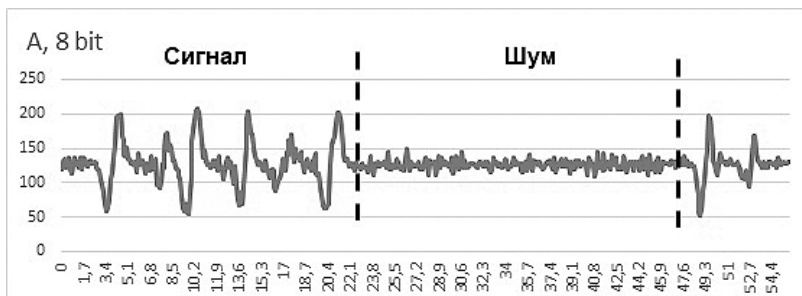
б)



в)



г)



д)

Рис. 3. ТО з внутрішнім напруженням металу в ділянці видалених рельєфних знаків: а) фото поверхні; б) МО візуалізація й амплітуда сигналу для приладу моделі 2006 р.; в) яскравість у горизонтальному перетині для МО зображення б); г) МО візуалізація для приладу моделі 2018 р.; д) яскравість у горизонтальному перетині для МО зображення г)

Зазначений вище скін-ефект дав змогу поліпшити деталізацію МО зображення контурів знаків за рахунок суперпозиції полів розсіяння від магнітних і електричних неоднорідностей у ділянках внутрішнього напруження поверхневого шару ТО. Амплітуда сигналу в градаціях яскравості (рис. 3д) виглядає симетрично — пік яскравості «білого» сягає 208, або +80 щодо середнього рівня («сірий» — рівень 128), при цьому пік «чорного» складає 55 (або -73).

Отже, кількісна оцінка графіків і візуальна оцінка зображень рис. 3 свідчать, що комплект МО устаткування моделі 2018 р. забезпечує вищий рівень сигналу внутрішнього напруження (у ділянці видаленого маркування) і нижчий рівень структурних шумів ТО (у ділянці без маркування).

Аналіз експериментальних даних. Для оцінки відношення сигнал/шум і ймовірності правильного розпізнавання сигналу використано методику¹, засновану на дослідженні експериментальних даних для розподілів сигналу та шуму — ділянки сигналу та шуму відокремлені вертикальними пунктирними лініями (рис. 3в, 3д).

За даними яскравості цих ділянок розраховували значення математичного очікування й середньоквадратичне відхилення (для сигналу та шуму відповідно), при цьому для оцінки сигналу та шуму використали амплітудні значення локальних екстремумів яскравості, розрахованих як модулі відхилення від рівня «сірого».

За граничне значення (поріг ухвалення рішення) правильності розпізнавання сигналу внутрішнього напруження на тлі шуму прийняли значення, за якого вірогідність помилкового виявлення сигналу дорівнює вірогідності

¹ Агалиди Ю. С., Левый С. В., Мачнев А. М. Методика исследований сигналов и шумов ...

пропуску сигналу. Значення квантиля, відповідного табличним значенням¹ для нормального розподілу з параметрами (0, 1), розраховували так:

$$u_p = \frac{|M_c - M_{ш}|}{\delta_c + \delta_{ш}}, \quad (1)$$

де: M , δ — математичне очікування і середньоквадратичне відхилення для сигналу (с) та шуму (ш).

У табл. 1 наведено значення математичного очікування і середньоквадратичні відхилення для сигналу та шуму, а також результати ймовірності правильного розпізнавання контурів знаків первісного маркування (рис. 3).

Таблиця 1

№ з/п	Комплект МО обладнання	$M_{ш}$	$\delta_{ш}$	M_c	δ_c	u_p	P
1	Модель 2006 р.	8,1	5,6	36,5	21,7	1,04	> 0,851
2	Модель 2018 р.	5,2	4,1	60,2	17,0	2,60	> 0,995

Аналіз даних табл. 1 свідчить про таке: комплект МО обладнання моделі 2018 р. має помітні переваги, що підтверджено вищим рівнем показників якості візуалізації — рівень сигналу збільшився на $20 \lg(60,2/36,5) = 4,35$ дБ, при цьому рівень шуму знизився на $20 \lg(5,6/4,1) = 2,71$ дБ.

Критерій перевищення граничного рівня миттєвим значенням амплітуди сигналу забезпечує виявлення/розпізнавання символів видаленого рельєфного маркування з імовірністю не гірше, ніж:

- 0,995 для комплекту МО устаткування моделі 2018 р.;
- 0,851 для комплекту МО устаткування моделі 2006 р.

Водночас в експертизах оцінку результатів інструментальних досліджень експерт визначає за цілою низкою чинників (стилем і розміром шрифту, характером структурного шуму поверхні та ін.), що слабко формалізуються, тобто розпізнавання первісного маркування за відновленими елементами знаків залежить також від індивідуальних зорових властивостей, особливостей психофізіологічного оброблення візуальної інформації та досвіду експертної практики тощо.

Результати практичних досліджень з використанням МО приладів «Регула 7505м» і «Регула 7515м». Унікальні характеристики сучасних магнітооптичних приладів дають змогу реалізувати рід нових видів досліджень, раніше недоступних або обмежено доступних для засобів криміналістичної техніки.

Так, на рис. 4 наведено результат практичного дослідження видаленого рельєфного маркування на рамі мотоцикла (сталева конструкція). Маркування видалено повністю, шар металу з рельєфними знаками видалено на

¹ Ивченко Г. И., Медведев Ю. И. Математическая статистика. Москва, 1984. 248 с.

глибину, що перевищує глибину рельєфу знаків, контури знаків візуально визначити неможливо.

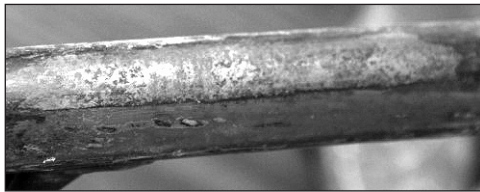
Особливостями цього дослідження є форма і стан поверхні номерного майданчика (рис. 4б) — номерний майданчик розташований на циліндричній поверхні (що не зручно для більшості способів трасологічних досліджень), крім того, поверхня шорстка, з кратерами від виразкової корозії внаслідок попереднього хімічного травлення (яке не було результативним).

Здобуті результати МО візуалізації полів внутрішніх напружень у ділянці видаленого маркування дали змогу визначити абсолютно всі знаки первісного маркування.

Крім того, деталізація МО зображення дала змогу уточнити метод виконання первісного маркування (лазерне гравірування) і спосіб його видалення — шліфування з використанням ручного інструмента з робочим органом невеликого діаметра (типу «дремель»; рис. 4в).



а) Зовнішній вигляд об'єкта



б) Збільшене зображення номерного майданчика



в) МО візуалізація полів внутрішніх напружень

Рис. 4. Результат практичного дослідження видаленого рельєфного маркування на рамі мотоцикла (феромагнітний матеріал — сталь)

У наступному прикладі практичного дослідження видаленого маркування об'єктом дослідження також є рама мотоцикла (рис. 5), але матеріал конструкції — немагнітний (алюмінієвий сплав).

Номерний майданчик (рис. 5б) розташований на плоскій поверхні й не має значної шорсткості. Маркування видалено також повністю, контури знаків візуально визначити неможливо.



а) Зовнішній вигляд об'єкта



б) Збільшене зображення номерного майданчика



в) МО візуалізація полів внутрішніх напружень

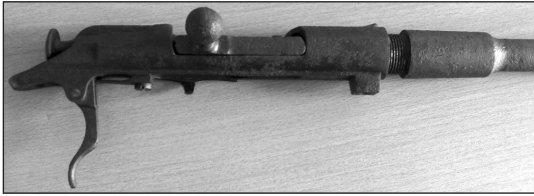
Рис. 5. Результат практичного дослідження видаленого рельєфного маркування на рамі мотоцикла (алюмінієвий сплав — немагнітний, електропровідний)

Як описано вище, дослідження МО методом внутрішніх напружень у неферомагнітних електропровідних матеріалах стало можливим тільки в моделях після 2018 р. (з появою вихореструмової технології магнітного копіювання). Амплітуда та глибина полів внутрішніх напружень для алюмінієвих сплавів (завдяки значній пластичності) менша, аніж для сталі.

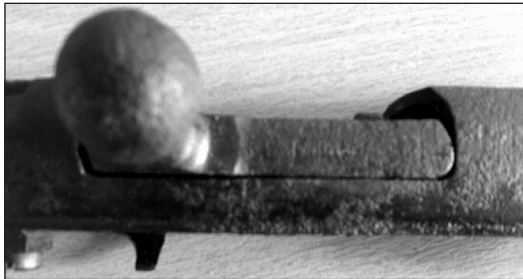
Проте, і в цьому разі результат МО візуалізації полів внутрішніх напружень у ділянці видаленого маркування (рис. 5в) дає змогу цілком відновити знаки первісного маркування. Також висока деталізація МО зображення дає змогу дійти висновку, що методом виготовлення первісного маркування є лазерне гравірування.

Дослідження, результати яких наведено на рис. 4 і 5, провели в одному з криміналістичних центрів США за участю спеціаліста компанії «Регула».

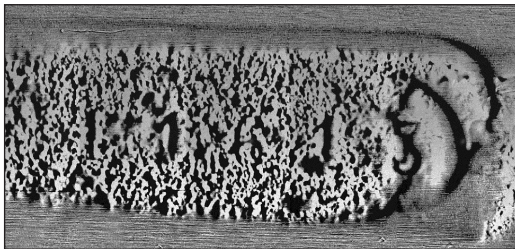
Наступне дослідження проводили в криміналістичному центрі Латвії; воно цікаво тим, що маркування пошкоджено внаслідок поверхневого корозійного процесу (рис. 6).



а) Зовнішній вигляд об'єкта



б) Збільшене зображення номерного майданчика



в) МО візуалізація полів внутрішніх напружень

Рис. 6. Результат практичного дослідження видаленого рельєфного маркування на затворі гвинтівки

Номерний майданчик знаходиться на затворі гвинтівки Мосіна, який має сильну корозію внаслідок тривалого перебування в ґрунті (рис. 6а, 6б), знаки маркування в рельєфній поверхні корозійного шару визначити неможливо.

Шар корозії має різномірну структуру внаслідок нерівномірного процесу корозії, зокрема через залежність рельєфу шару корозії від первісного рельєфу поверхні та від внутрішніх напружень поверхневого шару.

Як зауважено раніше, шар корозії є специфічним носієм даних, і його дослідження (особливо — у неруйнівний спосіб) сьогодні доступні¹, наскільки відомо, лише МО методом.

¹ Агалиди Ю. С., Левый С. В., Троицкий В. А., Посыпайко Ю. Н. Магнитооптическая дефектоскопия приповерхностных слоёв ферромагнитных изделий. Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2007. Вып. 4. С. 16—20.

Із експертної практики відомо, що для випадків, коли корозія проникає на глибину, більшу за глибину маркування, шар корозії може стати останнім доступним джерелом інформації.

За результатами проведених досліджень отримані зображення МО візуалізації полів внутрішніх напружень дали змогу визначити всі знаки первісного маркування (рис. 6в). Деталізація МО зображення достатня для того, щоб визначити спосіб виконання маркування (пластична деформація, клеймування). Ознак видалення первісного маркування не виявлено.

Далі наведемо результат практичного дослідження видаленого рельєфного маркування на ємності, виготовленій з товстого шару сталі (рис. 7а).

Маркування видалено на окремих ділянках номерного майданчика з метою позбутися значущої ідентифікаційної інформації, яку наносить виробник, а також у процесі проходження циклів обслуговування й наповнення. Знаки маркування видалено повністю, видимі елементи знаків первісного маркування відсутні.

Поверхня контейнера криволінійна, сфероподібна, унаслідок чого застосування методів відновлення маркування, у яких застосовують рідини, складно реалізувати.

Розміри номерного майданчика, порівняно зі звичними об'єктами досліджень (транспорт, зброя), незначні, а кількість знаків на номерному майданчику сягає кількох десятків. Приклад ділянки номерного майданчика наведено на рис. 7б.

Слід зазначити, що матеріалом, на який нанесено маркування (клеймування ударним способом вручну), є низьковуглецева нелегована сталь, що має високу пластичність і невисоку твердість, унаслідок чого залишкові внутрішні напруження малі (такого висновку фахівці дійшли за результатами численних експертних досліджень рельєфного маркування ударним способом на доволі різноманітних сталях — від середньовуглецевих до складнолегованих).

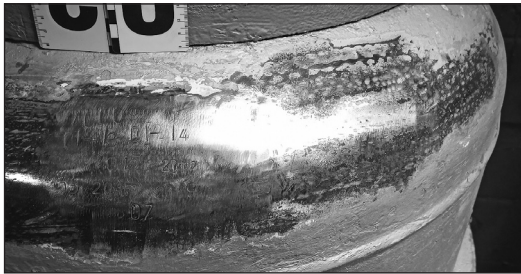
Завдання відновлення маркування на згаданих контейнерах є складним для всіх методів відновлення маркування, оскільки фізичну основу процесів, які застосовують у різних методах трасологічних досліджень з відновлення маркування, є структурні неоднорідності (і, відповідно, залишкові напруження).

Спроба використати метод хімічного травлення виявилася малоефективною через зазначені вище причини — криволінійність поверхні, розміри номерного майданчика, залишкові напруження.

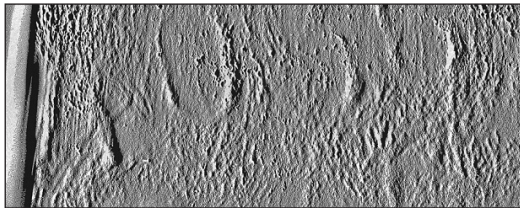
У результаті застосування для візуалізації полів внутрішніх залишкових напружень метода МО візуалізації, на ділянках із видаленим первісним рельєфним маркуванням вдалося відновити дані, які мають ідентифікаційне значення. Приклади відновлених даних наведено на рис. 7в і 7г.



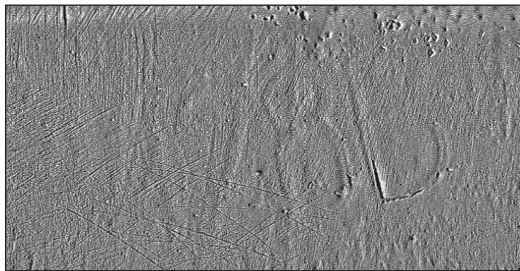
а) Зовнішній вигляд об'єкта



б) Збільшене зображення номерного майданчика



в) МО візуалізація 1



г) МО візуалізація 2

Рис. 7. Результат дослідження видаленого рельєфного маркування на товстостінному об'єкті (матеріал — низьковуглецева нелегована сталь)

Маємо зауважити, що метод МО візуалізації є неруйнівним: у всіх дослідженнях геометрія поверхні об'єктів залишилася в незмінному стані, без зміни полів залишкових напружень. Отже, МО технологія дає змогу багаторазово досліджувати за допомогою цього методу ті самі ділянки, наприклад, щоб уточнити елементи первісних знаків, способи видалення первісного маркування.

Виконані у згаданих працях ¹ дослідження щодо граничної чутливості магнітооптичного методу для феромагнітних сплавів свідчать, що завдяки застосуванню цього методу можна відновити знаки після видалення поверхневого шару металу завглибшки в 1,5 мм.

Висновки. Виконано порівняльні експериментальні дослідження з оцінки основних параметрів магнітооптичної візуалізації внутрішніх напружень видаленого рельєфного маркування для двох комплектів МО комплексів — моделей 2006 р. і 2018 р.

Кількісна оцінка здобутих експериментальних даних дає змогу дати числову оцінку основним показникам якості зображення для порівняних комплексів МО обладнання. Зауважено кращі показники моделі 2018 р. порівняно з аналогічними характеристиками моделі 2006 р.:

- рівень сигналу (контраст візуалізованих знаків маркування) збільшився на 4,35 дБ;
- рівень шуму (рельєф/фактура поверхні та шуми магнітного копіювання) зменшився на 2,71 дБ;
- імовірність правильного розпізнавання символів зросла на 14,9 % до $P > 0,995$ (для моделі 2006 р. цей показник становить $P > 0,851$).

Якісна оцінка здобутих експериментальних даних свідчить, що комплекс 2018 р. має помітні переваги над моделлю 2006 р., що підтверджено більш високою якістю візуалізації:

- поліпшено деталізацію відображення контурів відновлених знаків маркування в результаті суперпозиції полів розсіювання магнітних та електричних неоднорідностей у ділянці внутрішнього напруження (завдяки вихореструмовому характеру намагнічування об'єкта);
- поліпшено розрізнення/контраст відновлених знаків маркування на фоні згладжених рельєфних шумів поверхні номерного майданчика, що є одним з результатів вихореструмового характеру намагнічування у приповерхневому скін-шарі;
- помітно знижено шуми магнітного копіювання, що зумовлено адаптивною конструкцією гнучкого випромінювача вихорестру-

¹ Agalidi Yu., Kozhukhar P., Levyi S., Turbin D. Enhanced magneto-optical imaging of internal stresses in the removed surface layer. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2015. Vol. 30. Is. 4. P. 347—355 ; Agalidi Yu., Kozhukhar P., Levyi S., Rogozhinsky Yu., Shumsky I. Eddy current fields/magnetic ... DOI: <https://doi.org/10.1080/10589759.2011.610453> (дата звернення: 22.02.2021).

мового сканера та дрібнодисперсністю робочого шару полімерної магнітної стрічки.

Наведені результати практичних досліджень, здобуті з використанням сучасних моделей МО обладнання експертами різних країн, упевнено підтверджують ефективність МО технології для широкого спектра об'єктів із видаленим рельєфним маркуванням, зокрема — традиційно складних для інструментальних досліджень пластичних алюмінієвих сплавів і низьковуглецевої нелегованої сталі (із низьким рівнем внутрішніх напружень), товстого шару корозії на поверхні сталевих об'єктів (у разі знищення первісного рельєфу і, найчастіше, — приповерхневого шару залишкових напружень).

References

- Ahalidi, Yu. S. (2006). *Mahnitootychna vizualizatsiia mahnitohram reliefnykh zobrazhen i strukturnykh neodnorodnostei poverkhnevoho sharu feromagnitnykh vyrobiv* : dys. ... kand. tekhn. nauk. Kyiv [in Ukrainian].
- Agalidi, Yu., Kozhukhar, P., Levyi, S., Rogozhinsky, Yu., Shumsky, I. (2012). Eddy current fields/magnetic recording/magneto-optic imaging NDI method. *Nondestructive Testing and Evaluation*. Vol. 27. Is. 2. P. 109—119. DOI: <https://doi.org/10.1080/10589759.2011.610453> (data zvernennia: 22.02.2021).
- Agalidi, Yu., Kozhukhar, P., Levyi, S., Turbin, D. (2015). Enhanced magneto-optical imaging of internal stresses in the removed surface layer. *Nondestructive Testing and Evaluation*. Vol. 30. Is. 4. P. 347—355.
- Agalidi, Iu. S., Levyi, S. V., Machnev, A. M. (2006). Metodika issledovaniia signalov i shumov pri magnitoopticheskoi defektoskopii. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsionalnogo universiteta im. V. I. Vernadskogo*. Serii: fizika. Vyp. 19 (58). № 1 [in Russian].
- Agalidi, Iu. S., Levyi, S. V., Machnev, A. M. (2006). Sravnitelnyi analiz magnitoporoshkovogo i magnitoopticheskogo metodov vizualizatsii prostranstvennogo raspredeleniia magnitnogo polia pri issledovanii ostatochnykh napriazhenii. *Visnik NTUU «KPI»*. Serii: priladobuduvannia. Vyp. 31 [in Russian].
- Agalidi Iu. S., Levyi S. V., Machnev, A. M. (2006). Ehksperimentalnaia otsenka chuvstvitelnosti i dostovernosti magnitoopticheskoi vizualizatsii relefnykh trass. *Visnik NTUU «KPI»*. Serii: priladobuduvannia. Vyp. 32 [in Russian].
- Agalidi, Iu. S., Levyi, S. V., Machnev, A. M., Prokhorov-Lukin, G. V. (2008). Sravnitelnaia otsenka chuvstvitelnosti magnitoopticheskogo, magnitoporoshkovogo i ehlektrokhimicheskogo metodov pri issledovanii udalenoii relefnoi markirovki. CH. 1—3. *Kriminalistika i sudebnaia ehkspertiza*. Vyp. 54 [in Russian].
- Agalidi, Iu. S., Levyi, S. V., Prokhorov-Lukin, G. V. (2003). Realizatsiia kompleksnoi metodiki kriminalisticheskikh issledovaniia identifikatsionnykh numerov avtotransportnykh sredstv na programmno-apparatnom urovne. *Kriminalistika i sudebnaia ehkspertiza*. Vyp. 51 [in Russian].
- Agalidi, Iu. S., Levyi, S. V., Troitskii, V. A., Posypaiko, IU. N. (2007). Magnitoopticheskaia defektoskopiia pripoverkhnostnykh sloev ferromagnitnykh izdelii. *Tekhnicheskaiia diagnostika i nerazrushalushchii kontrol*. Vyp. 4 [in Russian].
- Ivchenko, G. I., Medvedev, Iu. I. (1984). *Matematicheskaiia statistika*. Moskva [in Russian].

Patent Certificate for Invention (China) № ZL2009801595628, announcement date 30.07.2014 announcement number CN102449470. Inductor of eddy currents for magnetic tape scanning and scanner based thereon. Inventor: Levyi S., Agalidi Yu., Shumsky I. Forwarding letter for the Patent Certificate Y/R: I000364MZ-CN, O/R: PIUA1111850(YFK), filling date 01.07.2009. Patentee: Levyi S., Agalidi Yu., Shumsky I.

Patent Certificate for Invention (EP) № EP2435822 A1, announcement date 04.04.2018 announcement number 09845325, 09845325.1, 2009845325, EP 2435822 A1, EP 2435822A1, EP-A1-2435822, EP09845325, EP20090845325, EP2435822 A1, EP2435822A1. Inductor of eddy currents for magnetic tape scanning and scanner based thereon. Inventor: Levyi S., Agalidi Yu., Shumsky I. Forwarding letter for the Patent Certificate EP20090845325 filling date 01.07.2009. Patentee: Levyi S., Agalidi Yu., Shumsky I.

Pro zatverdzhennia Instruksii pro poriadok provedennia kryminalistychnykh doslidzhen transportnykh zasobiv i reiestratsiinykh dokumentiv, shcho yikh suprovodzhulut, pratsivnykamy Ekspertnoi sluzhby MVS Ukrainy : nakaz MVS Ukrainy vid 31.05.2013 r. № 537. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1309-13> (data zvernennia: 22.02.2021) [in Ukrainian].

Sposib mahnitooptychnoho kontrollu vyrobu : pat. 42880 Ukraina. № 99074257 ; zaiavl. 22.07.1999 r.; opubl. 15.11.2001 r., BIul. № 10 [in Ukrainian].

Ю. С. Агалиди, А. Ю. Кошель

**Повышение достоверности экспертной оценки
при исследовании уничтоженной рельефной маркировки
магнитооптическими приборами**

При исследовании уничтоженной рельефной маркировки металлических объектов с помощью магнитооптического метода выполняют визуализацию (невидимых) полей внутреннего напряжения в зоне номерной площадки, а затем проводят экспертную оценку полученных инструментальных данных (непрямое органолептическое наблюдение за результатами визуализации); таким образом, достоверность экспертной оценки результатов непосредственно зависит от чувствительности приборов и информативности инструментальных данных.

Основной количественной характеристикой в данном случае выступает вероятность правильного распознавания сигнала (контуров знаков маркировки) на фоне шума (структурного шума исследуемой поверхности и шумов самого метода визуализации), определяемая соотношением сигнал/шум.

В данной статье представлены результаты сравнительной экспериментальной оценки отношения сигнал/шум и вероятности правильного распознавания сигнала при восстановлении уничтоженной рельефной маркировки для двух комплексов магнитооптической визуализации — моделей 2006 г. и 2018 г.

Целью статьи является количественная и качественная сравнительная оценка результатов визуализации внутренних напряжений на

участках полностью удалённой рельефной маркировки металлических объектов. Результаты успешных практических исследований, полученных экспертами разных стран, дают возможность оценить эффективность и перспективность применения метода магнитооптической визуализации.

В новой модификации магнитооптического комплекса:

- на 4,35 дБ выше уровень сигнала (контраст восстановленных знаков маркировки);
- на 2,71 дБ ниже уровень шума (рельеф/фактура поверхности и шумы магнитного копирования);
- вероятность правильного распознавания символов составляет $P > 0,995$ (возросла на 14,9 %).

Технические усовершенствования реализации метода магнитооптической визуализации позволили расширить диапазон материалов объектов исследования (исследованы магнитные и электропроводные материалы).

Высокую эффективность метода по восстановлению маркировки проиллюстрировано результатами экспертиз для материалов с низким уровнем остаточных напряжений (алюминиевого сплава, низкоуглеродистой стали), для которых метод химического травления не дал результатов.

Использование новой модификации позволяет исследовать слой ржавчины, вплоть до случаев коррозии на всю глубину знаков.

Учитывая неразрушающий характер магнитооптических исследований, возможность их многократного повторения без потери свойств объекта, этот метод (в соответствии с порядком применения видов исследований) заслуживает большего внимания для применения.

Ключевые слова: рельефная маркировка, магнитооптическая визуализация, восстановление данных удалённой маркировки, неразрушающие методы.

Yu. Agalidi, O. Koshel

Increasing reliability of forensic analysis while research on destroyed relief marking with magneto-optical devices

While research on destroyed relief marking of metal objects using the magneto-optical method, visualization of (invisible) fields of internal stress in the VIN plate area is performed and then a forensic analysis of obtained instrumental data is carried out (indirect organoleptic observation of the visualization results); thus, forensic analysis reliability of results directly depends on sensitivity of instruments and informativeness of instrumental data.

The main quantitative characteristic in this case is probability of correct signal recognition (contours of marking signs) against the background of noise (structural noise of investigated surface and the noise of the visualization method itself) determined by the signal-to-noise ratio.

This article presents results of a comparative experimental assessment of signal-to-noise ratio and probability of correct signal recognition while restoring

the destroyed relief markings for two complexes of magneto-optical imaging – models of 2006 and 2018.

This article purpose is a quantitative and qualitative comparative assessment of results of visualization of internal stresses in areas of completely removed relief marking of metal objects. The results of successful practical research obtained by forensic experts from different countries make it possible to assess effectiveness and prospects of using the magneto-optical imaging method.

In a new modification of the magneto-optical complex:

- *signal level is 4.35 dB higher (contrast of reconstructed marking signs);*
- *2.71 dB lower noise level (surface relief/texture and magnetic copying noise);*
- *probability of correct character recognition is $P > 0.995$ (increased by 14.9%).*

Technical improvements in implementation of magneto-optical visualization method made it possible to expand the range of materials for research objects (magnetic and electrically conductive materials were investigated).

The high efficiency of method for restoring marking is illustrated by results of forensic examinations for materials with a low level of residual stresses (aluminum alloy, low-carbon steel) which chemical etching method did not give results for.

The use of new modification allows examining the rust layer, up to cases of corrosion to the entire depth of marks.

Considering non-destructive nature of magneto-optical researches, possibility of their repeated repetition without losing object properties, this method (in accordance with the order of application of types of studies) deserves more attention for application.

Keywords: *relief marking, magneto-optical visualization, data recovery of remote marking, non-destructive methods.*

Надійшла до редколегії 31.03.2021 р.

Агаліді Ю. С., Кошель О. Ю. Підвищення достовірності експертної оцінки під час дослідження знищеного рельєфного маркування магнітооптичними приладами. *Теорія та практика судової експертизи і криміналістики* : зб. наук. пр. / редкол.: О. М. Ключев, В. Ю. Шепітько та ін. Харків : Право, 2021. Вип. 23. С. 148—166. DOI: <https://doi.org/10.32353/khrife.1.2021.11>.