

ПРАКТИЧНИЙ ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РІЗНИХ МАГНІТНИХ СУСПЕНЗІЙ

В.С. Якотюк¹, С.М. Глабець^{1,2}, Ю.Ю. Лисенко¹, А.С. Момот¹

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: j.lysenko@kpi.ua

²ТОВ «НВФ «Діагностичні прилади». 03061, м. Київ, вул. Патріотів, 103. E-mail: s.hlabets@kpi.ua

Магнітопорошковий контроль є ефективним методом неруйнівного контролю, що використовується для виявлення дефектів у феромагнітних матеріалах. Незважаючи на постійний розвиток і впровадження сучасних технологій, практичні аспекти застосування та аналіз ефективності витратних матеріалів, зокрема магнітних суспензій, залишаються вкрай важливими. Особливої актуальності це набуває в умовах обмеженого доступу до нових ресурсів. У статті проаналізовано практичний досвід застосування різних магнітних суспензій та проведено експериментальну оцінку їхньої ефективності на стандартних зразках MTU-3 та MT Тип 2, що відносяться відповідно до типів 1 та 2 згідно з EN ISO 9934-2:2015. Дослідження містило аналіз готових до застосування суспензій в аерозольних балонах, концентратів і суспензій з різним терміном експлуатації та приготування. Результати експериментів демонструють вплив якості суспензії та терміну її придатності на ефективність виявлення дефектів, підкреслюючи необхідність ретельного вибору та контролю стану витратних матеріалів для забезпечення надійності. Виявлені відмінності в ефективності різних суспензій та вплив терміну їхньої експлуатації на чутливість контролю мають важливе практичне значення для фахівців з неруйнівного контролю. Бібліогр. 15, рис. 4.

Ключові слова: магнітопорошковий контроль, сучасні технології неруйнівного контролю, флуоресцентні суспензії, магнітні концентрати, ефективність, аналіз придатності, виявлення дефектів, опрацювання зображень

Вступ. Магнітопорошковий контроль (МПК) залишається важливим методом неруйнівного контролю (НК) протягом тривалого часу. Це зумовлено його ефективністю, відносно низькою вартістю та простотою застосування для виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів у феромагнітних матеріалах [1, 2]. У сучасній промисловості зростають вимоги до якості та надійності виробів, що стимулює постійний розвиток методів НК. Останні технологічні досягнення надають нові можливості для покращення чутливості, точності та продуктивності МПК, адаптуючи його до сучасних промислових потреб.

Сучасні системи для МПК оснащуються вдосконаленими джерелами намагнічування, що дає змогу точніше контролювати параметри магнітного поля та оптимізувати процес виявлення дефектів [3, 4]. Покращення характеристик магнітних порошків, таких як форма, розмір і магнітні властивості частинок, поліпшує їхню здатність скупчуватись у зоні дефектів, збільшуючи контрастність і чіткість індикацій дефектів [5]. Як наслідок, на ринку матеріалів для МПК зараз представлені магнітні порошки з флуоресцентними та кольоровими пігментами, що забезпечують кращу візуалізацію дефектів за різних умов освітлення та кольору поверхні ОК.

Автоматизація є ще одним ключовим напрямком розвитку МПК. Впровадження роботизованих систем дає змогу точніше контролювати параметри магнітного поля та оптимізувати процес виявлення дефектів [3, 4].

них систем для нанесення магнітного порошку та сканування поверхні об'єкта контролю дає змогу значно підвищити продуктивність і відтворюваність контролю, оптимізувати витрати розхідних матеріалів, а також зменшити вплив людського фактора [6]. Автоматизовані системи аналізу зображень, отриманих під час МПК, забезпечують отримання швидкої та об'єктивної оцінки результатів контролю та можливість їх документування, мінімізуючи вплив суб'єктивного фактора на інтерпретацію індикацій [7–9].

Актуальні дослідження в області технологій МПК спрямовані на створення нових типів магнітних частинок з покращеними фізичними властивостями. Зокрема розробляються магнітні порошки з частинками з низькою схильністю до скупчення, що забезпечує кращу дисперсність і рівномірне нанесення суспензії на поверхню об'єктів контролю (ОК), а також частинки з підвищеною чутливістю до малих дефектів. Використання наноматеріалів у магнітних порошках відкриває нові перспективи для підвищення чутливості та роздільної здатності МПК [10, 11].

Не менш важливим для забезпечення надійності МПК є розроблення матеріалів і модернізація методик контролю, що знижують вплив зовнішніх факторів, таких як: температура, вологість і забруднення поверхні. Впровадження захисних покриттів

С.М. Глабець – <https://orcid.org/0009-0004-2740-9209>, Ю.Ю. Лисенко – <https://orcid.org/0000-0001-9110-6684>, А.С. Момот – <https://orcid.org/0000-0001-9092-6699>

© В.С. Якотюк, С.М. Глабець, Ю.Ю. Лисенко, А.С. Момот 2025

та оптимізованих складів суспензій дає змогу проводити контроль якісно та відтворювано незалежно від умов навколишнього середовища [12–14].

Враховуючи сучасні тенденції розвитку та критичну важливість практичного застосування МПК в умовах обмеженого доступу до нових і високоякісних витратних матеріалів, **метою** даної статті є аналіз придатності магнітних суспензій – зокрема тих, чий термін придатності минув або наближається до завершення (або навіть перевищений). Таке дослідження має практичне значення для оперативного контролю в нестандартних, зокрема польових (військових) умовах [15].

Магнітні суспензії та концентрати. Магнітні суспензії та концентрати відіграють ключову роль як витратні матеріали МПК. За своєю суттю вони являють собою дрібнодисперсні феромагнітні частинки, дисперговані в рідині-носії, якою може бути вода або нафтопродукти (масло, гас та ін.). Вибір конкретного типу суспензії визначається комплексом факторів, включаючи вимоги до чутливості контролю, стану виробу, що досліджується, просторової орієнтації поверхні ОК та умови проведення інспекції.

Виробники пропонують широкий спектр витратних матеріалів для МПК, які відрізняються властивостями, класом чутливості та призначенням. Розрізняють сухі порошки, рідкі концентрати для приготування суспензій та готові суспензії в аерозольних балонах. На практиці найбільш поширені:

- флуоресцентні магнітопорошкові суспензії, які використовуються для виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів (MR-76F від MR Chemie, 14A від Magnaflux). Флуоресцентні частинки, що входять до їхнього складу, забезпечують високу контрастність індикацій при освітленні ультрафіолетовим (УФ) світлом, що значно полегшує процес виявлення дефектів;

- кольорові (чорні, зелені, червоні тощо) магнітопорошкові суспензії, які застосовуються для широкого спектра завдань контролю, зокрема виявлення тріщин і макродефектів (Magnaflux 7HF, 8A).

Залежно від конкретних вимог, ці суспензії можуть бути як флуоресцентними, так і кольоровими.

Магнітні концентрати використовуються для приготування робочих суспензій шляхом їх розведення у відповідній рідині-носії. Використання концентратів є економічно вигідним і забезпечує зручність транспортування та зберігання, особливо за необхідності виконання значних обсягів МПК. Серед магнітних концентратів, що отримали позитивні відгуки на практиці, можна виділити наступні:

ступні: MR-158 (високочутливий флуоресцентний концентрат), FW1 AC (для приготування суспензій загального призначення), Magnaflux 14A (для водорозчинних суспензій із задовільною розчинністю та стабільністю), Magnaflux 20B (флуоресцентний концентрат для високочутливих суспензій), Magnaflux 14AM (для суспензій з високою чутливістю та довговічністю) тощо. Вибір оптимального магнітного концентрату залежить від специфічних вимог до контролю, таких як: необхідна чутливість, тип дефектів, що підлягають виявленню, та конкретні умови проведення перевірки.

Експериментальне дослідження ефективності магнітних суспензій.

Матеріали та методи. Для оцінювання ефективності різних магнітних суспензій було проведено експериментальне дослідження з використанням стандартних зразків MTU-3 Тип 1 (висота 10 мм, діаметр 50 мм, ширина розкриття тріщин 2...10 мкм) та MT Тип 2 (довжина 154 мм, ширина 40 мм, висота 18 мм). MTU-3 та MT Тип 2 відповідають зразкам типу 1 та 2 відповідно до EN ISO 9934-2:2015 [13]. Паспортні зображення, характерні для використовуваних зразків, наведено на рис. 1. Відповідно до методики, зазначеної у EN ISO 9934-1 [13], зразки були підготовлені – проведено їх очищення від забруднень, попередній візуальний огляд, для MT Тип 2 проведено градуювання згідно з методикою EN ISO 9934-2 [14].

У процесі експерименту напруженість магнітного поля, виміряна магнітометром Novotest МФ-1, у ділянках зразка з мітками «+4» та «-4» становила +100 та -100 А/м відповідно.

Використовувались наступні магнітні суспензії:

1. суспензія №1: FW1 AC, виробництва 2024 р. (термін придатності 2 роки), розведена перед експериментальним дослідженням;

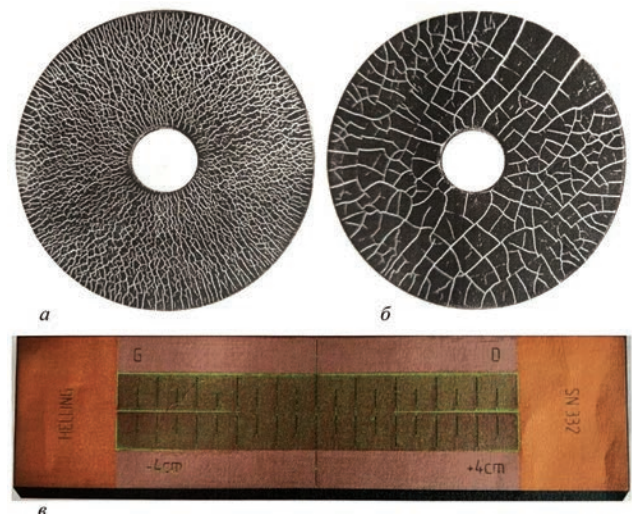


Рис. 1. Паспортні зображення зразків MTU-3 Тип 1 (а – сторона А, б – сторона Б) та MT Тип 2 (в)

2. суспензія №2: MR 76 F, виробництва 2024 р. (термін придатності 3 роки), має масляну основу в аерозольному балоні;

3. суспензія №3: MR – 158, приготована у 2021 р. з концентрату 2016 р. випуску (термін придатності концентрату 3 роки);

4. суспензія №4: MR – 158, приготована безпосередньо перед експериментом з концентрату 2016 р. випуску (термін придатності 3 роки).

Контроль проводився у затіненому приміщенні з використанням УФ-освітлення з параметрами, що рекомендовано для флуоресцентних суспензій. Результати контролю оцінювалися візуально за якістю нанесеного покриття та чіткістю індикацій дефектів, порівнюючи їх з еталонними зображеннями зразків.

Результати експерименту та їх обговорення. Результати експерименту, проведеного 2025 р., продемонстрували різну ефективність випробуваних магнітних суспензій. На зразку MTU-3 суспензії №1 та №2 виявилися найбільш ефективними, чітко відобразивши усі дефекти, передбачені паспортом зразка (рис. 2).

Суспензія №3 очікувано продемонструвала незадовільні результати. Як видно з рис. 3, а та рис. 3, б, дефекти на стороні А не були виявлені, а на стороні Б – є ледь помітними. У той же час, суспензія №4 показала певні проблеми з рівномірністю покриття, що також ускладнює проведення якісного контролю (рис. 3, в та рис. 3, г). Однак у порівнянні з резуль-

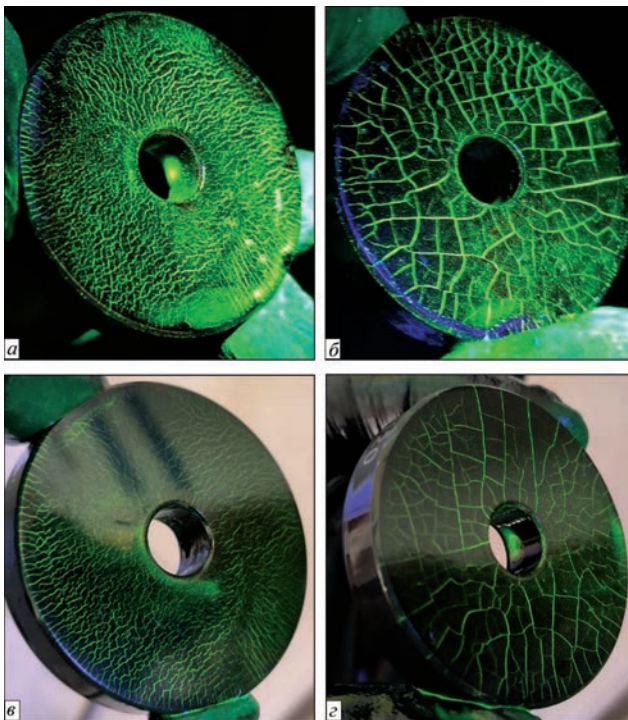


Рис. 2. Зразок MTU 3 з нанесеними суспензіями №1 (а та б відповідає сторонам А та Б) та №2 (в та г відповідає сторонам А та Б)

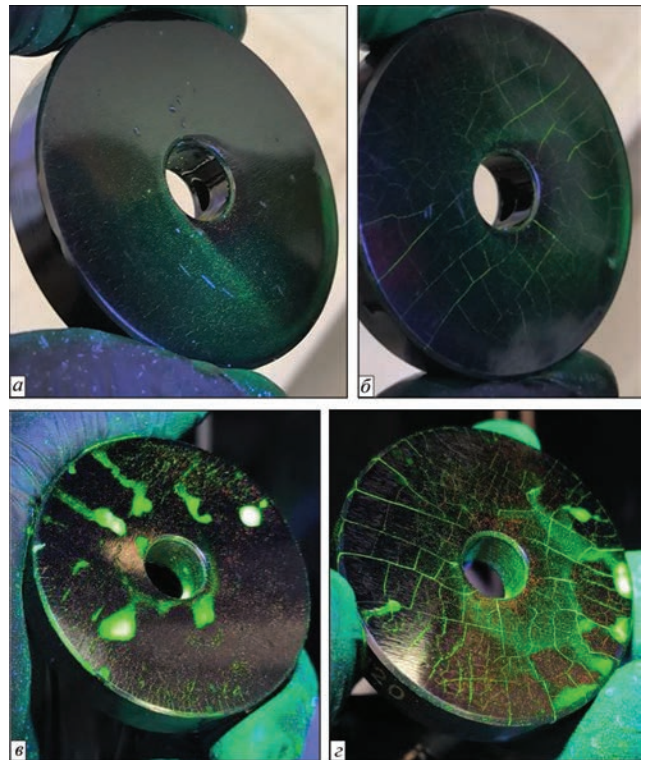


Рис. 3. Зразок MTU 3 з нанесеними суспензіями №3 (а та б відповідає сторонам А та Б) та №4 (в та г відповідає сторонам А та Б)

татами суспензії №3 результати є кращими, хоч і не відповідають паспорту зразка повною мірою.

На рис. 4 наведено результати тестування зразка МТ Тип 2, на якому випробувані суспензії виявили очікувані індикації відповідно до паспорта зразка, хоча й з різною рівномірністю покриття поверхні. Так, суспензії №1 та №2 продемонстрували довжину індикацій 88 та 87 мм відповідно (рис. 4, а та рис. 4, б). У той же час, суспензія №3 дозволила отримати індикацію завдовжки 77 мм (рис. 4, в), а така ж суспензія, що була приготована безпосередньо перед експериментом (суспензія №4), не надала впевненого результату (рис. 4, г).

Результати експерименту підтверджують важливість контролю якості магнітних суспензій та умов їхнього зберігання та експлуатації для ефективності МПК. Суспензії №1 та №2 продемонстрували рівномірне покриття поверхні зразка та показали високу надійність виявлення дефектів.

Суспензія №3 показала прийнятну покриваність поверхні зразка, але така ж суспензія, приготована безпосередньо перед експериментом, мала серйозніші проблеми із рівномірністю покриття поверхні, що ускладнило якісний контроль. Погана ефективність суспензії №3, очевидно, пов'язана із закінченням терміну її придатності, що призвело до погіршення її властивостей. Незадовільна рівномірність покриття у свіжоприготованій суспензії №4 може свідчити про аналогічну проблему з концентратом.

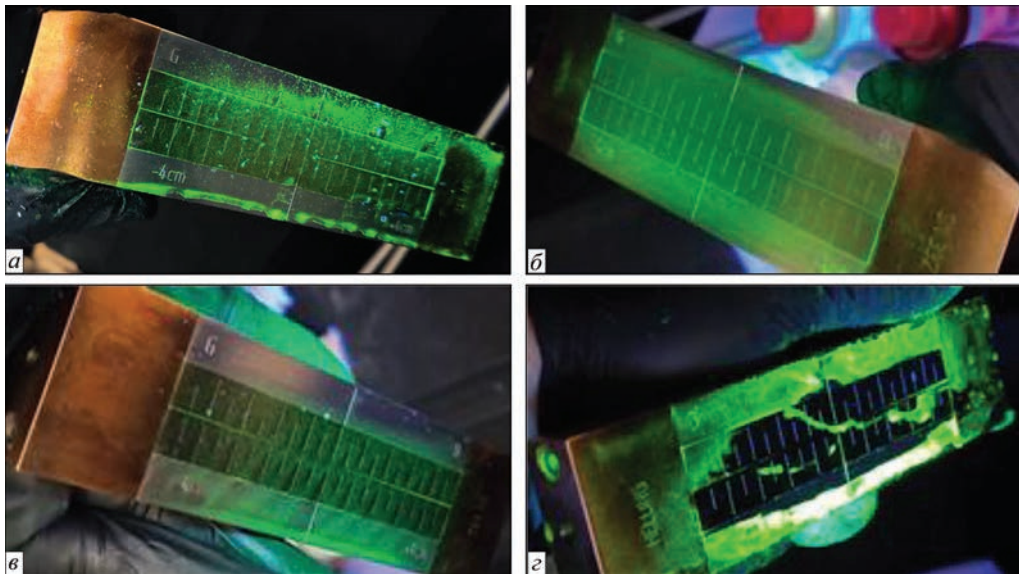


Рис. 4. Зразок МТ Тип 2 з нанесеними суспензіями №1 (а), №2 (б), №3 (в), №4 (г)

Висновки

Проведені експерименти показали, що ефективність магнітних суспензій суттєво залежить від їхнього типу, стану придатності та умов зберігання. На зразку МТУ-3 суспензії №1 і №2 виявилися найефективнішими, показавши усі дефекти, які мають бути видимі на цьому зразку відповідно до паспорта. Натомість суспензія №3 продемонструвала незадовільні результати: тріщини на стороні А не були виявлені, а тріщини на стороні Б – ледь помітні. Це підтверджує, що тривалий термін зберігання готової суспензії після приготування з концентрату може призвести до погіршення її властивостей, унеможливаючи якісне виявлення дефектів. У той час як свіжоприготована суспензія (№4) мала кращі результати, але також мала проблеми з рівномірністю покриття зразка МТУ-3 та не відповідала паспорту повною мірою.

На зразку МТ Тип 2 суспензії №1 та №2 продемонстрували сумарну довжину індикацій 88 та 87 мм відповідно. Суспензія №4 досягла 77 мм, тоді як №3 не надала впевнених результатів.

Таким чином, можна зробити висновок, що суспензії №1 і №2 є найефективнішими для використання, забезпечуючи високу якість виявлення дефектів впродовж усього терміну їхньої придатності. Результати дослідження наочно демонструють, що використання магнітних суспензій після закінчення рекомендованого терміну придатності може призвести до суттєвого зниження ефективності МПК. Це ще раз підтверджує важливість перевірки якості матеріалів безпосередньо перед використанням згідно з вимогами нормативних документів з метою досягнення необхідної чутливості, рівномірності покриття, контрасту (для ультрафіолету) та якості контролю.

Дослідження має практичне значення для оперативного контролю в польових (військових) умовах з обмеженими ресурсами, адже використання прострочених матеріалів знижує надійність МПК. Рекомендовано проводити перевірку концентрату перед розведенням, уникати тривалого зберігання розведених форм і пріоритет свіжих матеріалів для забезпечення чутливості.

Список літератури/References

1. Куц Ю.В., Протасов А.Г., Цапенко В.К., Єременко В.С., Лисенко Ю.Ю. (2012) *Магнітний неруйнівний контроль: Навчальний посібник*. Київ, НТУУ «КПІ». Kuts, Yu. V., Protasov, A. G., Tsapenko, V. K., Eremenko, V. S., Lysenko, Y. Yu. (2012) *Magnetic non-destructive testing: Textbook*. Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
2. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. (2016) *Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник*. Ужгород, Видавництво УжНУ. Suslikov, L. M., Studenyak, I. P. (2016) *Non-destructive testing methods: Textbook*. Uzhhorod, UzhNU Publishing House [in Ukrainian].
3. Wright, M. (2017) *Nondestructive Testing Methods*. In: *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*. John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118476406.emoe157>
4. Учанін В.М., Мінаков С.М., Соломаха Р.М. (2024) Дослідження залишкової намагніченості сталевих конструкцій після локального намагнічування приставним магнітним перетворювачем. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 3–7. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.01.01>
Uchanin, V. M., Minakov, S. M., Solomakha, R. M. (2024) Research of the residual magnetization of steel structures after local magnetization with an attachable magnetic transducer. *Tekhnichna Diahnostyka ta Neruinivnyi Kontrol*, 1, 3–7 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.01.01>
5. (2020) *Handbook of Nondestructive Evaluation*. Ed. by Hellier, Charles J., 3rd Ed. New York, McGraw-Hill Education. ISBN: 9781260441437
6. Tadamalle, P., Thopate, S., Tatiya, P. et al. (2021) Automation of magnetic particle inspection machine for performance optimization. *Intern. Advanced Research J. in Science, Engineering and Technology*, 8(6), 8–15. DOI: <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2021.8602>
7. Chen, Y., Kang, Y., Feng, B. et al. (2022) Automatic defect identification in magnetic particle testing using a digital

- model aided De-noising method. *Measurement*, **198**, 111427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111427>
8. Galagan, R., Andreiev, S., Stelmakh, N., Rafalska, Y., Momot, A. (2024) Automation of polycystic ovary syndrome diagnostics through machine learning algorithms in ultrasound imaging. *Applied Computer Science*, **20(2)**, 194–204. DOI: <https://doi.org/10.35784/acs-2024-24>
 9. Storozhyk, D., Protasov, A., Kuts, Y. et al. (2024) Enhancing neural network efficiency in automated image analysis for thermal nondestructive testing. *J. of Theoretical and Applied Mechanics*, **54(2)**, 242–252. DOI: <https://doi.org/10.55787/jtams.24.54.2.242>
 10. Li, Y., Kang, Y., Chen, Y., Guo, Y., Duan, Z., Feng, B. (2024) Feature enhancement method for magnetic particle testing based on isolation strip. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **73**, 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3373080>
 11. Martínez-Pedrero, F. (2020) Static and dynamic behavior of magnetic particles at fluid interfaces. *Advances in Colloid and Interface Sci.*, **284**, 102233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102233>
 12. ASTM E709-21. *Standard Guide for Magnetic Particle Testing*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
 13. EN ISO 9934-1:2016. *Non-destructive testing – Magnetic particle testing – Pt 1: General principles*. Geneva, International Organization for Standardization.
 14. EN ISO 9934-2:2015. *Non-destructive testing – Magnetic particle testing – Pt 2: Detection media*. Geneva, International Organization for Standardization.
 15. Poddubchenko, A., Lysenko, I., Hlabets, S., Posypaiko, Y., Pavlyi, O. (2022) Experience in the use of surface NDT for the diagnostics of military equipment during full-scale military operations. *Intern. J. «NDT Days»*, **5(5)**, 277–282 [in Russian].

PRACTICAL EXPERIENCE OF APPLICATION AND ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF VARIOUS MAGNETIC SUSPENSIONS

V.S. Yakotyuk, S.M. Glabets, Yu.Yu. Lysenko, A.S. Momot

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.
37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv. E-mail: j.lysenko@kpi.ua

Magnetic particle inspection is an efficient non-destructive testing technique, which is used to detect defects in ferromagnetic materials. Despite the continuous development and introduction of modern technologies, practical aspects of application and analysis of the effectiveness of consumable materials, in particular, magnetic suspensions, remain extremely important. It becomes especially relevant under the conditions of a limited access to new resources. In this paper the practical experience of application of various magnetic suspensions is analyzed, and experimental assessment of their effectiveness is performed on standard specimens MTU-3 and MT Type 2, which belong to type 1 and type 2 according to EN ISO 9934-2:2015, respectively. The study included analysis of ready-to-use suspensions in aerosol cans, concentrates and suspensions with different shelf life and preparation. Experimental results demonstrate the influence of the suspension quality and its shelf life on the effectiveness of defect detection, emphasizing the need for a thorough selection and monitoring of the condition of consumable materials to ensure the reliability. The revealed differences in the effectiveness of various suspensions and the influence of their shelf life on inspection sensitivity are of great practical importance for specialists on non-destructive testing. 15 Ref., 4 Fig.

Keywords: magnetic particle inspection, modern non-destructive testing technologies, fluorescent suspensions, magnetic concentrates, effectiveness, feasibility analysis, defect detection, image processing

Отримано 12.11.25

Отримано у переглянутому вигляді 10.12.25

Прийнято 19.12.25

