

МЕТОД БЕЗКОНТАКТНОГО ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТУ ЦИЛІНДРА ПІД ПОКРИВАМИ

Р. М. Джала, В. Р. Джала, Б. Я. Вербенець, М. І. Мельник

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

E-mail: dzhala@ipm.lviv.ua

Запропоновано метод безконтактного виявлення дефектів феромагнетного циліндра, який можна використати для контролю корозійних чи механічних пошкоджень металу підземних трубопроводів та технологічних труб під покриттями. Наведено результати розрахунків впливу дефекту сталеві труби на розподіл магнетного поля. Описано процедуру збудження обертового магнетного поля, його приймання та візуалізації аномалій для виявлення дефектів.

Ключові слова: *феромагнетний циліндр, підземний трубопровід, дефект металу під покриттями, метод виявлення, обертове поле, аномалії.*

METHOD OF NON-CONTACT DETECTION OF DEFECT IN COATED CYLINDER

R. M. Dzhala, V. R. Dzhala, B. Ya. Verbenets, M. I. Melnyk

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

A method of non-contact detection of defects in a ferromagnetic cylinder is proposed. This method is designed to test of corrosion or mechanical damages of underground and underwater pipelines metal. This can be used to find defects in long cylindrical objects such as bars, wires, tires under insulation and process pipes under coatings. The results of calculations of the effect of a steel pipe defect on the distribution of the magnetic field are presented. The procedure for excitation of a rotating magnetic field, its reception and visualization of field anomalies to detect cylinder defects is described.

Keywords: *ferromagnetic cylinder, underground pipeline, defect of metal under coatings, detection method, rotating field, anomalies.*

Вступ. Щоб запобігти пошкодженням і продовжити терміни експлуатації трубопроводів, резервуарів та інших металоконструкцій, багато з яких мають циліндричну форму, необхідно виявити дефекти металу під покриттями. Сучасні трубопроводи транспортують газ, нафту, воду, сировину і продукти хімічної промисловості. Переважну більшість магістральних, промислових і технологічних трубопроводів (які працюють під високим тиском) виготовлено зі низьколегованої сталі і з захисними покриттями (це підземні та підводні сталеві труби з ізоляційними покриттями, технологічні труби з тепловою ізоляцією і захистом від атмосферних впливів).

Через вплив середовища і технічну діяльність виникають дефекти, які спричиняють пошкодження трубопроводів, що супроводжується аваріями і катастрофами, затримками постачання і втратами транспортованих продуктів та екологічними забрудненнями. Тому необхідні періодичні діагностичні обстеження, які дадуть можливість підвищити надійність функціонування трубопровідного транспорту, що сприятиме стабільності постачання населення і промисловості та зміцненню обороноздатності країни.

Аналіз методів виявлення дефектів металевих конструкцій. Для діагностування стану стінок сталевих трубопроводів та резервуарів часто застосовують магнетні методи [1–3]. За методом розсіяного магнетного потоку – Magnetic Flux Leakage (MFL) намагнетчують ділянку об'єкта контролю (ОК) і фіксують магнет-

не поле (МП) розсіяння, що виникає над поверхнею за наявності дефектів чи зменшення товщини ОК [4–7]. Метод MFL – один із основних для неруйнівного виявлення механічних пошкоджень і корозійних уражень у трубопроводах. Для внутрішньотрубною дефектоскопії застосовують снаряди-дефектоскопи, які дають можливість фіксувати пошкодження, обумовлені як корозією, так і механічними впливами. Проте вони потребують спеціальних дорогих засобів – дефектоскопів та відповідного обладнання для їх уведення у трубу та виведення із трубопроводу, що ускладнює і обмежує їх вживання.

Під час використання акустичних методів та методу вихрових струмів [1, 3, 8] слід перетворювач (сенсор) наблизити до поверхні контролюваного металу, тому для труб та інших циліндрів під покриттями вони непридатні.

У методі магнетної пам'яті металу [9] застосовують спеціалізовані магнетометричні вимірювачі концентрації напружень та ферозондові давачі МП. Тут для контролю не потрібно заздалегідь готувати поверхню. В окремих випадках стан металевої стінки можна контролювати, не знімаючи ізоляцію.

Недоліками контактних методів є суттєвий вплив відстані між давачем МП і поверхнею ОК на сигнал давача, відсутність інформації про глибину залягання дефектів та значне зростання габаритів і маси обладнання для контролю виробів з товщиною стінки більше 16 мм [2]. Крім того, необхідний доступ до металу ОК. Вони придатні лише для контролю надземних трубопроводів, відносна кількість яких невелика, і трубопроводів, що готують до укладання в траншею.

Для обстежень підземних і підводних трубопроводів (ПТ) ефективні дистанційні методи. Безконтактними вимірюваннями змінного МП установок катодного захисту або генератора струму [1, 8] можна визначати місце і глибину залягання трубопроводу, контролювати стан протикорозійного захисту (ізоляцій і катодної поляризації), оцінювати параметри і виявляти пошкодження ізоляції та місця корозії. Проте вони не дають безпосередньої інформації про пошкодження металу трубопроводу.

Методами магнетної градієнтометрії можна виявляти ділянки ПТ з різними розташуваннями зварних швів, дефектами геометрії та напружено-деформованим станом [10]. Вони ґрунтуються на встановлених зв'язках між цими характеристиками сталевих ПТ та розподілом його МП. Компоненти і градієнт МП вимірюють магнетометрами-градієнтометрами. Ці методи оперативніші, придатні для експрес-контролю і економічніші порівняно з внутрішньотрубними і контактними.

Тому актуальні розроблення методів і засобів вимірювального контролю для виявлення та ідентифікації дефектів металу підземних чи покритих ізоляцією технологічних сталевих трубопроводів і резервуарів.

Постава завдання. Треба створити метод безконтактного пошуку дефектів феромагнетного циліндра під захисним покривом, який позбавлений недоліків відомих методів і придатний для контролю протяжних циліндричних об'єктів (підземних трубопроводів, прутків, дротів, шин під ізоляцією), щоб виявляти в них дефекти типу порушень суцільності, неметалевих включень, тріщин, вм'ятин, зміни геометричної форми.

Методи виявлення дефектів циліндричних структур. Відомий метод електромагнетної дефектоскопії лінійно-протяжних об'єктів – труб, прутків, шин тощо, коли на ОК впливають електромагнетним полем. Результуюче електромагнетне поле містить корисну інформацію про стан ОК. За джерело і перетворювач поля використовують котушки індуктивності (обмотки збудження і вимірювання). Отриманий сигнал залежить від параметрів ОК та наявності в ньому дефектів, що викликають зміни поля, за характером яких виявляють дефекти та оцінюють їх параметри [11]. Метод ґрунтується на фундаментальному законі електромагнетної індукції, вперше сформульованому М. Фарадеєм. Залежно від форми

ОК і поставленої задачі застосовують накладні, прохідні і екранні вихрострумові перетворювачі, котушки збудження яких живлять змінним струмом з частотою від 5 Гц до 250 МГц. Недоліками відомого методу електромагнетної дефектоскопії є залежності сигналу не лише від розміщення дефектів, але й від електропровідності і магнетної проникності матеріалу ОК, гістерезису, форми і взаємного розміщення джерела поля і ОК, частоти і форми збуджувального струму [11]. Через велику кількість чинників, що змінюють результати випробувань, слід вилучити побічні впливи. Для цього потрібно розробити різні способи для контролю заданого класу об'єктів у певних умовах. Відомий метод електромагнетної дефектоскопії надто поверховий та для різних застосувань потребує конкретизації і уточнень з урахуванням специфіки і параметрів ОК.

Найближчим до вирішення поставленого завдання є метод сканування, за яким для контролю протяжних об'єктів з круглим перерізом (труби, прутки) перетворювач дефектоскопа обертають навколо осі ОК [11]. За осьового переміщення ОК перетворювачі описують гвинтову лінію навколо його поверхні. Сигнали з виходу перетворювача [11] обробляють шляхом аналізу форми огинальної високочастотного сигналу, спричиненої модуляцією сигналу полем дефекту. Цей відомий динамічний (або модуляційний) спосіб застосовують для зовнішнього та внутрішнього вихрострумового контролю труб [1, 11].

Проте недоліком цього методу є механічне обертання перетворювачів за допомогою двигуна або штовхального механізму, розташованого у корпусі зонда [1], що потребує налаштування складних механічних систем і знижує надійність контролю. Крім цього, під час аналізу отриманих (внаслідок неперервного обертання котушок перетворювачів навколо ОК) сигналів відкидають плавно-змінні великої протяжності, як не властиві сигнали від тріщин [11]. Це сприяє виявленню тріщин на поверхні ОК, проте не дає змоги фіксувати інші важливі дефекти (корозійні пошкодження, протяжні порушення суцільності, неметалеві включення, вм'ятини та зміни форми).

Технічне завдання запропонованого методу – створити процедуру (послідовність дій) виявлення дефектів металевого (сталевого) циліндра (трубопроводу) шляхом вибору типу збудження і приймання сигналу, щоб спростити вимоги до засобів їх реалізації та підвищити надійність, а також розширити можливості контролю таких циліндрів (труб, прутків).

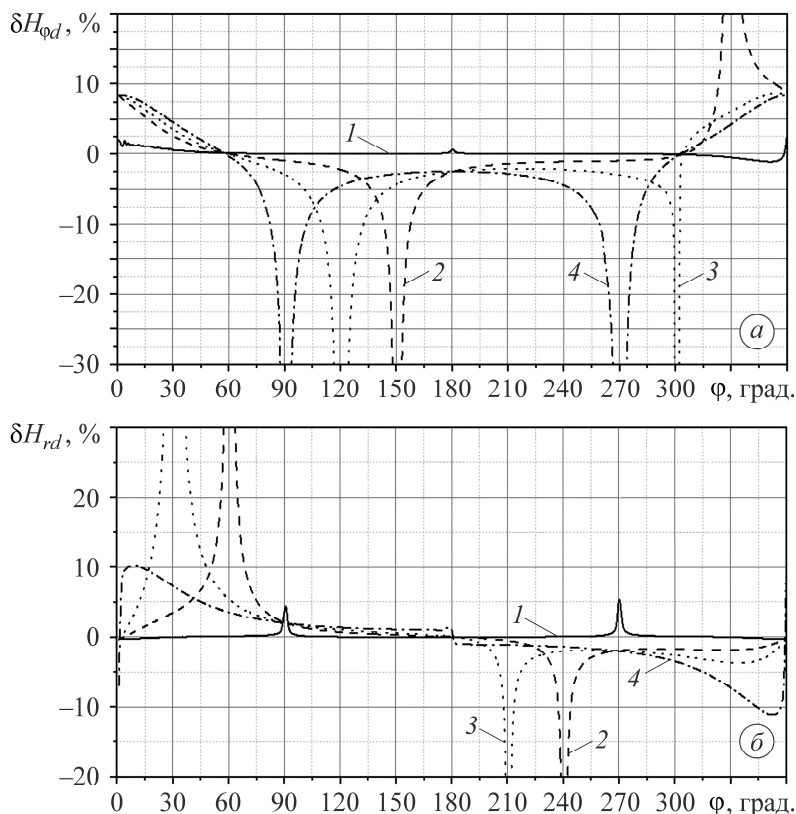
Метод виявлення дефекту феромагнетного циліндра за аномаліями обертового поля. Для цього збуджують циліндр обертовим МП, яке переміщують вздовж нього, та спостерігаючи за результуючим МП, виявляють дефекти за його змінами [12]. Запропонований метод відрізняється тим, що циліндр збуджують поперечним МП, напрям (вектор) якого повертають (обертають) відносно осі циліндра за допомогою зміщених за фазою струмів, а результуюче обертове МП сприймають два ортогональні приймачі, які формують два сигнали його розподілу, за змінами (аномаліями) якого виявляють дефекти циліндра і оцінюють їх параметри.

Суттєвими відмінностями запропонованого [12] методу проти відомих є збудження (намагнетчення) усієї площі поперечного перерізу циліндра поперечним первинним МП (а не локально, як за відомими), повертання напрямку (вектора) МП відносно осі труби з допомогою взаємно ортогональних рамок (котушок), де протікають змінні струми, фази яких зміщені між собою на чверть періоду. Результуюче обертове МП сприймають дві ортогональні рамки (котушки), які формують два сигнали, за якими аналізують азимутальний розподіл результуючого обертового МП та за їх змінами виявляють дефекти ОК і оцінюють їх параметри.

Циліндричну трубу у первинному однорідному МП H_0 та силові лінії її вторинного дипольного поля H_2 зображено у праці [13], де також показано кут пово-

роту вектора H_0 первинного МП збудження та дефект у стінці труби.

Результати розрахунків залежностей змін розподілу МП, спричинених різними дефектами, подано у працях [13, 14]. Рисунок ілюструє азимутальні розподіли (для відстані r від осі труби, рівної її діаметру $D = 325$ mm) азимутального і радіального складників МП труби з дефектом (30×10 mm, розміщеним за азимутом $\varphi_d = 0^\circ$), віднесених до цих же складників МП бездефектної труби, за різних орієнтацій кута φ_p збуджувального первинного МП.



Залежності від азимута складників напруженості вторинного МП:
азимутального $\delta H_{\varphi d}(\varphi) = \Delta H_{\varphi d}(\varphi) / |H_{\varphi 0}(\varphi)| = (H_{\varphi d}(\varphi) - H_{\varphi 0}(\varphi)) \times 100 / |H_{\varphi 0}(\varphi)|$, (%) (а)
та радіального $\delta H_{rd}(\varphi) = (H_{rd}(\varphi) - H_{r0}(\varphi)) \times 100 / |H_{r0}(\varphi)|$, (%) (б), для відстані $r = D$
за різних поворотів φ_p збуджувального первинного МП: 1 – 0° ; 2 – 30° ; 3 – 60° ; 4 – 90° .

Фізичною основою запропонованого методу є дипольний характер розподілу МП труби (кругового циліндра) та різні деформації цього поля дефектами залежно від орієнтації первинного збуджувального МП [13]. Дефект суттєвіше змінює МП, якщо розміщений на шляху магнетного потоку і деформує (розсіює) його. Якщо ж первинний магнетний потік скерований так, що дефект розташований у місці його розгалуження, коли магнетний потік обтікає дефект, тоді вплив дефекту на розподіл МП не проявляється [13]. Це дає можливість виявляти дефект і оцінювати його параметри за деформацією результуючого МП.

Приклад конкретного виконання. Над сталевим трубопроводом розміщують та переміщують уздовж нього дві взаємно ортогональні рамки (котушки), які живлять змінними струмами, зсунутими за фазою на 90° , та дві взаємно ортогональні приймальні рамки (котушки, ферозонди). Збуджувальні рамки орієнтують відносно труби так, щоб створене ними первинне МП було перпендикулярне до осі контрольованої труби та, за можливістю, з найближчим до однорідного розподілом за площею поперечного перерізу труби.

Сигнали з приймачів подають на ортогональні входи дисплею (осцилографа). Для бездефектного трубопроводу, з однаковим налаштуванням амплітуд сигналів щодо вимірюваних компонент МП, на екрані дисплею буде сформована замкнута лінія (фігура), яка відповідає дипольному характеру розподілу МП циліндричної труби без дефекту [12]. За його наявності ця фігура буде деформована [15]. За значенням та орієнтацією цієї деформації можна оцінити параметри дефекту та його розміщення на циліндрі (трубопроводі).

Запропонований метод передбачає переміщення вздовж сталевго циліндра (прутка, труби у цеху підприємства чи підземного трубопроводу в польових умовах) джерела перпендикулярного до циліндра обертового МП та двох взаємно ортогональних сприймачів МП. На бездефектній ділянці циліндра налаштовують джерело і сприймачі МП (які підключені до входів двокоординатного дисплею) для отримання лінії (фігури), яка відповідає дипольному характеру розподілу компонент МП циліндра без дефекту. Приймають цю лінію (фігуру) за шаблон для даного ОК. Під час переміщення джерела і приймачів МП уздовж ОК спостерігають за змінами фігури на екрані дисплею і за її деформаціями виявляють місця дефектів ОК та оцінюють їх параметри.

Перевагами запропонованого методу [12–15] порівняно з відомими є простота процедури внаслідок однотипного переміщення джерела і сприймачів поля вздовж ОК. Обертове МП створюють, зсуваючи фазу без механічних обертань (як обертове поле статора електричного двигуна).

На відміну від відомого методу, коли для сканування поверхні ОК перетворювач дефектоскопа обертають навколо осі ОК (що потребує кругового доступу до ОК), запропонований реалізують і за одностороннього доступу. Тому він придатний для контролю циліндричних виробів (прутків, труб), прикріплених до напрямних поверхонь (конструкцій, стін, жолобів), а також для безконтактного моніторингу (виявлення дефектів металу) підземних (підводних) сталевих трубопроводів.

ВИСНОВКИ

За аналізом результатів розрахунків розподілів компонент магнетного поля сталевго циліндра (труби) з дефектами встановлено їх відмінності залежно від напрямку первинного МП, що дає можливість виявляти пошкодження металу (зокрема, підземного трубопроводу), збуджуючи його обертовим магнетним полем. Запропоновано новий магнетоциклічний метод для пошуку дефекту циліндричної труби під покривом. Для його реалізації треба розробити пристрої збудження обертового магнетного поля та його приймання, а також алгоритми опрацювання, щоб виділити інформативні ознаки сигналів і виявити дефекти металу підземних трубопроводів та інших металоконструкцій.

1. Dzhala, R.M.; Dzhala, V.R.; Ivasiv, I.B.; Rybachuk, V.G.; Uchanin V.M. Electrophysical methods of non-destructive testing of defects in structural elements. Vol. 4; Dzhala, R.M., Ed.: In *Technical diagnostics of materials and structures: Reference manual*; Nazarchuk, Z.T., Ed.; Prostir-M, 2018 (in Ukrainian)
2. Bakunov, A.S.; Gorkunov, E.S., Shcherbinin, V.E. Magnetic control. Klyuev, V.V., Ed.; Spektr, 2015 (in Russian)
3. Troitsky, V.A. Monitoring of technical condition of main pipelines. *Technical diagnostics and non-destructive testing*, 2017, 3, 29–39 (in Russian)
4. Ferster, F. Nondestructive Testing by the Method of Magnetic Leakage Fields. Theoretical and Experimental Foundations of Finite- and Infinite-Depth Surface Defect Detection, *Defektoskopiya*, 1982, 11, 3–25 (in Russian)
5. Suresh, V.; Abudhair, A. Dipole Model to Predict the Rectangular Defect on Ferromagnetic Pipe. *Journal of Magnetism*, 2016, 21, 437–441. <https://doi.org/10.4283/JMAG.2016.21.3.437>

6. Suresh, V.; Abudhahir, A. An Analytical Model for Prediction of Magnetic Flux Leakage from Surface Defects in Ferromagnetic Tubes. *Measurement Science Review*, **2016**, 16, 8–13. <https://doi.org/10.1515/msr-2016-0002>
7. Sam Alaric, J.; Suresh, V.; Abudhahir, A.; Carmel Sobia, M.; Baarkavi, M. Theoretical Analysis of the Rectangular Defect Orientation using Magnetic Flux Leakage. *Measurement Science Review*, **2018**, 18, 28–34. <https://doi.org/10.1515/msr-2018-0005>
8. Fracture mechanics and strength of materials: Reference manual. Panasyuk, V.V., Ed. Volume 5: Non-destructive testing and technical diagnostics. Nazarchuk, Z.T., Ed. FMI named after H. V. Karpenko, NAS of Ukraine. 2001 (in Ukrainian)
9. Dubov, A.A.; Dubov, A.A.; Kolokolnikov, S.M. The method of magnetic memory of metal and control devices; Spektr, 2012 (in Russian)
10. Krapivsky, E.I.; Lubchik, A.N.; Chumarev, R.Yu. Mathematical modelling of the magnetic field of the pipeline with defects. *Mining informational and analytical bulletin*, **2014**, 3, 259–263 (in Russian)
11. Dorofeev, A.L.; Kazamanov, Y.G. Electromagnetic defectoscopy. Mashinostroenie, 1980 (in Russian)
12. Dzhala, R.M.; Dzhala, V.R.; Goron, B.I.; Melnyk, M.I.; Senyuk, O.I. The method of non-contact detection of a metal cylinder defect. Patent for the invention UA #124202, 2021.
13. Dzhala, R.M.; Dzhala, V.R.; Melnyk, M.I.; Horon, B.I.; Senyuk O.I. Influence of the pipe defect on its magnetic field. *Information Extraction and Processing*, **2018**, 46(122), 5–10. <https://doi.org/10.15407/vidbir2018.46.005>
14. Dzhala, R.; Dzhala, V.; Melnyk, M.; Verbenets', B.; Horon, B. Calculation of magnetic field azimuthal distribution of the pipeline with defect. In Proceedings of the IEEE CSIT IWCMITS 2020, Zbarazh-Lviv, Ukraine, September 23–26, 2020, Vol. 2, pp. 111–114. <https://doi.org/10.1109/CSIT49958.2020.9321888>
15. Dzhala, R.M.; Dzhala, V.R.; Verbenets, B.Ya.; Goron, B.I.; Melnyk, M.I. The method of detecting a pipe defect under the coating. In XXIII International Conference “Non-destructive control and monitoring of technical condition” September 14–18, 2020, Odesa-Kyiv: MA Welding, 2020. pp. 14–15.

Одержано 17.05.2022