

31. Chang Shu, O. Kochan. Method of thermocouples self verification on operation place // *Sensors & Transducers journal*. – Vol. 160. – Issue 12. – P. 55–61. 32. Пат. № 104952 Україна, МПК G01K 15/00. Спосіб самодіагностики термодар на місці експлуатації та пристрій для його реалізації / О. В. Кочан. – заявл. 21.11.2012. 33. Su Jun, Kochan O., Kochan R. Thermocouples with Built-

In Self-testing. *International journal of thermophysicis*. – 2016. – Vol. 37. – Issue 4. – P. 1–14. 34. Кочан О. В. Оцінка тривалості самоперевірки термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля // *Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”*. Серія приладобудування. – 2013. – Вип. 46. – С. 70–80.

УДК 620.179.14.05

НАКЛАДНИЙ ІНДУКТИВНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ МАГНІТНОЇ ДЕФЕКТОМЕТРІЇ

© Дейнека Ростислав, 2016

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра приладів точної механіки,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Сутність електромагнітних методів неруйнівного контролю феромагнетиків полягає у виявленні магнітного поля, що виступає над внутрішніми і підповерхневими дефектами. Для виявлення такого локального поля запропоновано новий варіант накладного датчика у вигляді індуктивного елемента на тороїдальному осерді з додатковими магнітопроводами. Цей датчик має просту конструкцію, його висока чутливість підтверджена експериментально. Такий датчик може використовуватись для контролю зварних з'єднань запропонованим методом, що ґрунтується на вимірюванні магнітного опору ділянки зварювання.

Ключові слова: неруйнівний контроль, внутрішні дефекти, накладний датчик, магнітний опір.

Суцність електромагнітних методів неінеруївнїного контролю ферромагнетиків состоїть в виявленнї магнїтного поля, виступаючого над внутрїшнїми і подповерхностнїми дефектами. Для виявленнї локального магнїтного поля предложєн новїй варїант накладного датчика в вїде індуктивного елемента на тороїдальному осердї з додатковїми магнїтопроводами. Этот датчик має просту конструкцію і високу чутлївість, подтвержденную експериментально. Такой датчик может использоваться для контроля сварных соединений предложенным методом, основанным на измерении магнїтного сопротивления участка сварки.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, внутренние дефекты, накладной датчик, магнитное сопротивление.

The essence of electromagnetic methods of nondestructive ferromagnets testing consists in identifying the lines of ledge of the external magnetization constant magnetic field that is scattered on interior and subsurface defects. Existing electromagnetic methods differ only by ways of local magnetic inhomogeneity detections.

For detecting the local magnetic field the new variant of the plated sensor for nondestructive testing of ferromagnetic materials in the form of an inductive element on a toroidal core with magnetoconductive elements was proposed. The sinusoidal audio frequency voltage from the generator with amplitude at which the core material begins to enter into the saturation stage is supplied in winding. The magnetic field of an internal defect straying through internal lining magnetoconductive linings sub magnetizes the ferrite core, and is summed up with the field from the generator, that is leading to saturation of the core coil, losses the inductance and increase current in the coil. To measure the saturation current series with the winding turns on the low resistor, which voltage is measured, and it determines the size of the defect. Inductive sensor has a simple design and high sensitivity (output voltage increase more than 5 times), confirming by the experimental investigation of its model.

The proposed sensor is insensitive to the presence of extraneous ferromagnetic objects, and only responds to a magnetic field and can be used for monitoring welds of steel elements by measuring the magnetic resistance of some consecutive areas of the consistent weld in the transverse direction. The magnetic resistance value of the weld at most depends on the presence of cracks, cavities, pores and other non-magnetic inclusions having negatively affect on the strength of the connection.

The magneto motive force determination in the control area is carried by means of the inductive magnetic field sensor. The internal high magnetic resistance of the sensor is much larger than its poles contact resistance and resistance of the defect area, and therefore does not affect on its stray field. It does not matter how the intensity of the ledge field in the section of the seam changes because the welding defect has increased magnetic resistance and the quality of welding is defined by the range of this resistance

The magnetic flux of the applied field to determine the magnetic resistance control areas is measured by means of an optional magnetic flux sensor installed in one of the pole pieces of the magnetized device. Since the pole piece has a constant value of the magnetic resistance, the output voltage of the additional sensor further will depend on the magnitude of the magnetic flux of the magnetized device. This means that irregularities of detail surfaces will be taken into account in determining the magnetic resistance of the defect area.

Key words: *nondestructive testing, internal defects, overhead sensor, magnetic resistance.*

Вступ. Для забезпечення якості промислових конструкцій зі сталевого прокату і виявлення дефектів у них широко використовують електромагнітні методи неруйнівного контролю, які мають високу чутливість, не потребують спеціальних умов проведення і складного обладнання, доволі доступні й дешеві [1–3]. До електромагнітних методів належать: магнітопорошковий метод (ГОСТ 21105-87), магнітографічний метод (ГОСТ 3242-79), ферозондовий метод (ГОСТ 21104-75), спільна сутність яких ґрунтується на використанні феромагнітних властивостей матеріалів конструкцій. У разі намагнічення конструкційних елементів зовнішнім полем по них проходить магнітний потік, силові лінії якого спрямовані вздовж напрямку намагнічення. Внутрішні або підповерхневі дефекти у феромагнітному матеріалі у місці, де вони наявні, призводять до викривлення магнітних силових ліній, які виступають над поверхнею. Їх величина та інтенсивність залежать від розмірів і глибини залягання внутрішніх немагнітних включень у вигляді раковин, пор, тріщин тощо, а вищевказані методи електромагнітного контролю відрізняються тільки способом виявлення ліній поля, що виступають.

Недоліками цих методів є потреба у витратних матеріалах, пристроях читання магнітограм, в оператора контролю має бути досвід у трактуванні зображень дефектів. Крім цього, на якість виконання контролю істотно впливає якість поверхні деталі (нерівності, забруднення, покриття тощо), що вимагає попередньої підготовки ділянки, яка підлягає контролю.

Мета роботи. Вдосконалення методів неруйнівного електромагнітного контролю деталей і конструкцій з феромагнітними властивостями за рахунок підвищення чутливості та спрощення засобів детектування неоднорідностей постійного магнітного поля над внутрішніми дефектами ділянок контролю, а також вироблення нових підходів до виявлення недоліків зварювальних з'єднань.

Вирішення проблеми. Для детектування локального магнітного поля у цьому випадку запропоновано новий варіант давача [4] для його використання у засобах неруйнівного контролю феромагнетиків (рис. 1, а). Він являє собою індуктивний елемент 1 з обмоткою на кільцевому феритовому осерді, до якого прикріплені додаткові магнітопровідні елементи 2, 3 на торцевій поверхні обмотки з проміжком між ними. На обмотку подається синусоїдальна напруга звукової частоти з генератора з амплітудою, за якої матеріал осердя починає входити у насичення за індукції B_r (див. рис. 1, б). У разі внесення давача у магнітне поле (розсіювання внутрішнього дефекту) через магнітопровідні накладки зовнішній магнітний потік підмагнічує феритове осердя. За позитивної полярності напруги з генератора на одному з проміжків між магнітними накладками магнітний потік осердя, викликаний генератором Φ_r спрямований протилежно до потоку підмагнічування, спричиненого дефектом Φ_d , і результуючий магнітний потік осердя зменшується. На другому проміжку магнітні потоки з генератора і від дефекту підсумовуються, що приводить до ще більшого насичення ділянки осердя котушки B_d , втрати індуктивності й збільшення струму в обмотці

$$i_d = H_d \frac{l}{w}, \quad (1)$$

де l – довжина магнітної лінії осердя; w – кількість витків котушки.

За негативної полярності напруги генератора обидва магнітні потоки підсумовуються на іншому проміжку і насичення осердя відбувається двічі за один період коливаний генератора.

Для вимірювання струму насичення послідовно з обмоткою вмикається низькоомний резистор, з якого знімається відповідна напруга.

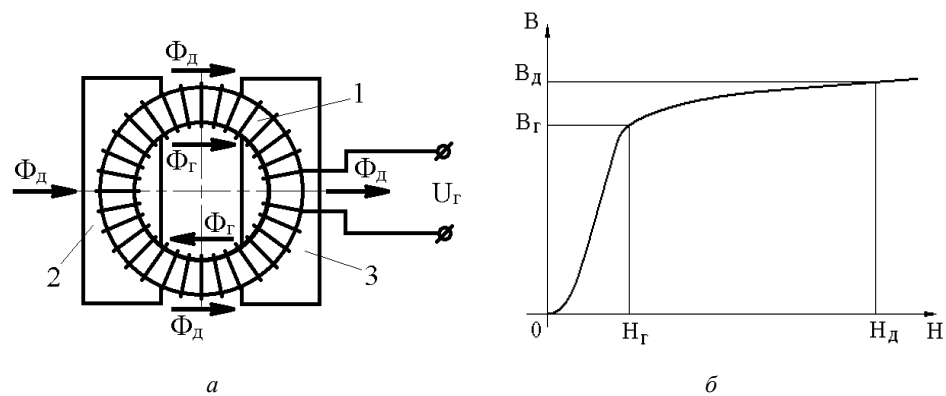


Рис. 1. Будова індуктивного давача (а) і межі його намагнічення (б)

Fig. 1. The inductive sensor structure (a) and bounds of its magnetization (b)

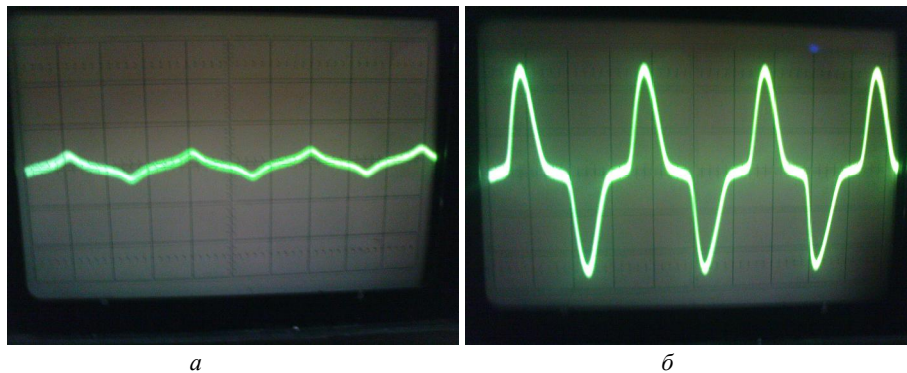


Рис. 2. Осцилограми вихідного сигналу індуктивного давача від дії генератора (а) і в разі підмагнічення осердя зовнішнім полем (б)

Fig. 2. The oscillograms of output signal from generator work (a) and at core magnetization by the external field (b)

На створеному макеті давача проведено його експериментальні натурні дослідження у лабораторії кафедри приладів точної механіки Національного університету “Львівська політехніка”. Як осердя використано ферит марки 2000НМ з індукцією насичення близько 0,3 Тл. Під час досліджень виявилось, що запропонований метод виявлення магнітного поля має високу чутливість. У разі зовнішнього підмагнічення осердя на макеті зі штучно створеними дефектами отримана зміна сигналу на опорі досягала 5–8 разів від початкового значення. Більшу чутливість можна отримати за меншого перерізу осердя, оскільки тоді досягається вищий ступінь його насичення.

Амплітуду напруги живлення, параметри обмотки і частоту підбирають так, щоб досягти початку зони насичення матеріалу осердя за його заданих розмірів. Вхідження матеріалу осердя у зону магнітного насичення можна простежити за допомогою осцилографа за зміною амплітуди і форми сигналу, який знімається з послідовно увімкненого опору, що видно на експериментальних осцилограмах (рис. 2). Ступінь зростання струму в разі насичення і, відповідно, збільшення

напруги на послідовному опорі відповідно до напруженості поля дає можливість встановити не тільки наявність дефекту матеріалу, але й оцінити його величину.

Однак збільшення струму генератора в режимі насичення котушки означає виникнення похибки вимірювання вихідного сигналу за рахунок падіння частини напруги генератора на провідниках живлення контура, які мають певний електричний опір. Для мінімізації цієї похибки рекомендовано розмежувати кола живлення і вимірювання, використовуючи п’яти-провідну схему під’єднання давача, показану на рис. 3; для живлення схеми використовуються виводи 1 і 5, а високоомні кола вимірювання безпосереднього живлення, а також вихідного сигналу давача приєднуються відповідно до виводів 2, і 4 та 3 і 4.

Аналітичне дослідження фізичних процесів, які відбуваються в матеріалі магнітного осердя котушки давача, що використовується як чутливий елемент, ускладнюється такими чинниками.

1. Нелінійна постановка задачі. Оскільки індуктивний давач працює в області кривої намагнічування, яка

визначає входження матеріалу осердя в режим насичення, то виникає потреба опису функціональної залежності, що відображає цей процес. Дуже складно підібрати єдину емпіричну формулу, яка відображає криву намагнічення для різних феромагнітних матеріалів. А для аналізу конкретно підібраної залежності для заданого матеріалу можна застосовувати тільки наближені числові методи.

2. Магнітні властивості матеріалів для магнітопроводів, які випускає промисловість, не нормуються в області нелінійного намагнічення, а вказується лише приблизне значення індукції насичення, оскільки ці матеріали призначені для використання тільки в лінійній області. Це означає, що нелінійні давачі потребують індивідуального градування у заданих межах параметрів. Їх аналітичний опис у кількісному плані недоцільний і дає змогу простежити лише якісну картину фізичного процесу. За умови використання ПК у дефектометричній системі корекція функцій перетворення і розкиду параметрів нелінійних чутливих елементів може виконуватись програмним методом.

Отже, за рахунок використання нелінійності кривої намагнічування матеріалу осердя індуктивного елемента отримано варіант магнітного давача, близький за чутливістю до ферозондів і набагато простіший за конструкцією, з використанням недефіцитних матеріалів. Використання феритового осердя з низькою індукцією насичення потребує невеликої напруги живлення схеми, але запасу потужності генератора. Запропонований давач нечутливий до присутності сторонніх феромагнітних об'єктів, а реагує лише на магнітне поле.

Можливе схемне рішення, в якому за відсутності підмагнічення вихідна напруга дорівнює нулю. Це дає змогу уникнути постійної складової вихідного сигналу й обнулити прилад перед використанням.

У разі використання індуктивно-активного контура і режиму насичення матеріалу осердя обмотки досягається висока чутливість, спрощується процес контролю, зменшуються габарити й енергоспоживання обладнання, є можливість багатократного тестування окремої ділянки поверхні й числової оцінки розмірів і глибини залягання дефектів. Такі переваги дають змогу під час експлуатації феромагнітних конструкцій здійснювати їх поточне неруйнівне контролювання без особливих вимог до зовнішніх умов з малими затратами і можливістю комп'ютерної обробки даних.

Цей спосіб забезпечує оперативність контролю, дає змогу зменшити напруженість поля зовнішнього намагнічування і мінімізувати обладнання. Він не потребує спеціальної підготовки поверхні контролю. Локальні індуктивні давачі виготовляються з доступних і дешевих матеріалів, а тому можуть виконуватись спеціально для кожної форми

контрольованої поверхні. Сукупність числових даних вихідної напруги для кожної точки контролю дає змогу створити комп'ютерну базу даних для заданого об'єкта. Застосування запропонованого способу дає змогу виявляти несуттєвості (пори, тріщини, раковини тощо) у феромагнітних конструкціях за наявності прикладеного зовнішнього магнітного поля. Цей спосіб не потребує постійної присутності оператора і може бути автоматизований.

Особливої уваги з погляду неруйнівного контролю потребують з'єднання сталевих конструкцій, виконані способом зварювання. З огляду на фізичні процеси, які відбуваються під час зварювання, – плавлення, термічний вплив на основний метал, кристалізація розплаву, виникнення залишкових напружень – таке з'єднання є дуже відповідальним місцем конструкції, а якість його виконання (наявність раковин, підрізів, непроварів...) можна перевірити тими самими електромагнітними методами. Особливість контролю зварних швів полягає у тому, що матеріал шва виступає над поверхнею основного металу, що означає додаткову нерівність поверхні й потребу адаптації безпосередньо до цієї поверхні засобу виявлення магнітного поля. Крім цього, розподіл силових ліній намагнічення перерізу зварного шва виглядає інакше, ніж для суцільного металу (рис. 4).

Треба мати на увазі, що над поверхнею поздовжньо намагніченого феромагнітного елемента завжди виступає розподілене магнітне поле, висота виступання ліній якого залежить від магнітного опору самого елемента. Тому магнітна дефектоскопія зварних швів ускладнюється спадом силових ліній у зоні потовщення місця зварювання. Цей спад настільки значний, що може приховувати дрібні дефекти в місці підсилення зварного з'єднання і помітними будуть лише великі тріщини та раковини, величина поля розсіювання яких перевищує ефект підсилення шва. Такий факт обмежує використання традиційних електромагнітних методів дефектоскопії.

Можливим варіантом вирішення цієї проблеми електромагнітного контролю зварних швів і з'єднань є запропонований метод вимірювання магнітного опору окремих послідовних ділянок зварного шва у поперечному напрямку. Величина магнітного опору значною мірою залежить від наявності у зварному з'єднанні тріщин, раковин, пор та інших немагнітних включень, які негативно впливають на міцність з'єднання. Нижче наведено приклади розміщення дефектів зразка матеріалу для порівняльної характеристики магнітних опорів між торцями зразків відносно бездефектного зразка (його магнітний опір прийнято за 1). Перші п'ять варіантів імітують ділянку суцільного металу, а решта три – ділянку зі зварним з'єднанням.

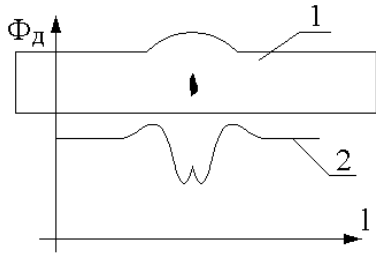


Рис. 3. Принципова схема увімкнення індуктивного давача:
 L_{δ} – індуктивність котушки, R_{δ} – додатковий опір

Fig. 3. The basic scheme of inductive sensor connection:
 L_{δ} – coil inductivity, R_{δ} – additional resistor

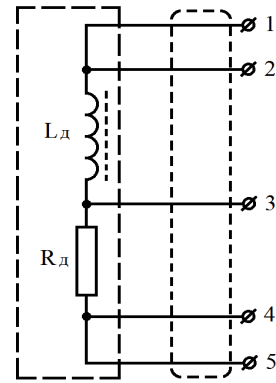


Рис. 4. Переріз зварного шва: 1 – розміщення дефекту шва, 2 – розподіл потоку розсіювання

Fig. 4. The welded joint section: 1 – displacement of joint defect, 2 – distribution of dissipated flow

Відносні магнітні опори імітованих дефектів

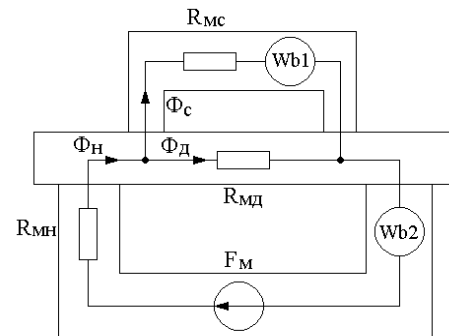
Вид зразка	Розміри дефекту	Відносний магнітний опір
		1
	$h = 10, \delta = 0,01$	2,25
	$h = 10, \delta = 0,1$	13,5
	$h = 5, \delta = 0,1$	1,87
	$h = 2, \delta = 0,1$	1,23
		1*
	$h = 15, \delta = 0,01$	1,88*
	$h = 5, \delta = 0,01$	1,15*

Позначення рисунків: h – глибина тріщини, δ – ширина тріщини, розміри наведено в мм.

* Для зразків, що імітують зварне з'єднання.

Рис. 5. Схема ділянки електромагнітного контролю

Fig. 5. The scheme of electromagnetic testing area



Магнітний опір ділянки контролю визначається так:

$$R_{\text{мд}} = \frac{F_{\text{мд}}}{\Phi_{\text{д}}}, \quad (2)$$

де $F_{\text{мд}}$ – магніторушійна сила на ділянці; $\Phi_{\text{д}}$ – магнітний потік контрольованої ділянки.

Магніторушійна сила на ділянці контролю визначається за допомогою накладного індуктивного давача магнітного поля, який підмагнічується полем різниці магнітних потенціалів. Еквівалентна магнітна схема контролю ділянки матеріалу наведена на рис. 5.

Індуктивний давач поля має магнітопровід з двома полюсами, які встановлюють на місце проведення контролю. Внутрішній високий магнітний опір цього давача набагато більший від опору контакту його полюсів і опору дефектної ділянки. Тому шунтуванням давачем ділянки контролю практично можна знехтувати. Величина магніторушійної сили між точками контролю

$$F_{\text{мд}} = R_{\text{мс}} \cdot \Phi_{\text{с}}, \quad (3)$$

де $R_{\text{мс}}$ – магнітний опір давача і контакту його полюсів; $\Phi_{\text{с}}$ – магнітний потік через давач.

Значення $R_{\text{мс}}$ є постійним, а $\Phi_{\text{с}}$ вимірюється.

Для визначення магнітного опору ділянки контролю також необхідно виміряти магнітний потік прикладеного поля пристрою намагнічення, що здійснюється за допомогою додаткового давача магнітного потоку (також індуктивного), встановленого в одному з полюсних наконечників намагнічувального пристрою. Оскільки полюсний наконечник має постійне значення магнітного опору, то вихідна напруга додаткового давача залежатиме тільки від величини магнітного потоку намагнічувача, зумовленого його магнітним навантаженням. Якщо розімкнуті полюси пристрою намагнічення, у вільному його стані також спостерігатиметься певна мінімальна величина магнітного потоку, спричиненого полем розсіювання. Магнітний потік прикладеного намагнічення залежить від кількості витків і струму обмотки, але також магнітного опору всього кола, включаючи магнітні опори ділянки намагнічення, магнітопроводу і зон контакту його полюсів. Це означає, що нерівності поверхні деталі, наявність покриття, забруднення тощо, впливатимуть на значення магнітного потоку і враховуватимуться під час визначення магнітного опору дефектної ділянки.

Висновки. З огляду на вищесказане можна відзначити такі переваги запропонованого способу магнітної дефектометрії.

1. Високий магнітний опір індуктивного давача дає змогу використовувати його на нерівних і забруднених поверхнях.

2. Висока чутливість дає змогу виявляти малі відхилення магнітних полів розсіювання зварного з'єднання з порівнянням їх по всій довжині шва.

3. Урахування величини магнітного потоку зовнішнього намагнічення дає змогу виміряти магнітний опір ділянки контролю.

4. Вимірювання магнітного опору між точками основного металу з'єднаних деталей не потребує визначення характеру зміни поля розсіювання у перерізі шва.

5. Зона зварного з'єднання виступає як місце локалізації дефектів, а положення їх у перерізі не важливе, оскільки ремонту підлягає вся ділянка.

6. У певних межах зміни магнітного опору зварний шов можна вважати придатним для використання без додаткового доопрацювання.

1. ДСТУ EN 1291-2001 *Контроль неразрушающий сварных соединений. Магнитопорошковый контроль сварных соединений. Приемочные критерии*. 2. ГОСТ 3242-79 *“Соединения сварные. Методы контроля качества”*. 3. ГОСТ 21104-75 *“Контроль неразрушающий. Феррозондовый метод”*. 4. Дейнека Р. *Способ локальной дефектометрии ферромагнитных материалов // патент України на корисну модель № 98242. Бюлетень № 8 від 27.04.2015 р.* 5. Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля / за ред. З. Ю. Готри. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2001. – 412 с. 6. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник / под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение. – 1976. – 315 с. 7. Коновалов Н. Н. *Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений*. – М.: ФГУП НТЦ “Промышленная безопасность”, 2006. – 112 с. 8. Дефекты стали: справочник / под ред. С. М. Новокиценовой, М. И. Виноград. – М.: Металлургия, 1984. 9. Горкунов Э. С. *Магнитопорошковая дефектоскопия и магнитная структуроскопия*. – Екатеринбург, 1999. 10. Щербин В. Е., Горкунов Э. С. *Магнитный контроль качества металлов*. – Екатеринбург, 1996. 11. ЦВ-0052 *“Інструкція з неруйнівного контролю деталей та вузлів вагонів магнітопорошковим, вихрострумовим та ферозондовим методами і з випробування на розтягнення”*. 12. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідник. посібн.* – Т. 5. *Неруйнівний контроль і технічна діагностика / під ред. З. Т. Назарчука*. – Львів: ФМІ, 2001. – 1133 с.