

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРОМАГНЕТИКІВ НА ОСНОВІ МАГНІТОПРУЖНИХ ДАВАЧІВ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ

В.В. Циганчук*, Л.С. Шлапак

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. 038 050 4090476,
e-mail: c i g a n @ i . u a*

Визначення напруженого стану є актуальною проблемою. На даний час застосовуються різні методи неруйнівного контролю напруженого стану трубопроводів, такі як тензометричний, магнітний, ультразвуковий та ін. Кожний із них має свої переваги і недоліки. Часто необхідно використовувати декілька експериментальних неруйнівних методів одночасно. В цьому плані важливе місце займає магнітний метод контролю. І тут велика роль відводиться первинним перетворювачам, які безпосередньо сприймають вплив механічних напружень і перетворюють його в електричний сигнал для подальшої обробки вхідної інформації. Зміна магнітних характеристик тісно пов'язана із фізичним впливом на об'єкт контролю. До переваг слід віднести високу мобільність обладнання, можливість проведення контролю без контактування перетворювача з досліджуванним об'єктом. Водночас існує ряд недоліків, властивих саме магнітним методам – магнітопружний гістерезис, при якому наявна розбіжність між значеннями індукції при навантаженні і розвантаженні. Найбільша розбіжність виникає при першому циклі. При повторенні циклів ця розбіжність зменшується. Оптимальний шлях – навчитись використовувати повну інформацію, наявну в петлі гістерезису. Ще один метод – це не просто проводити вимірювання в одній точці (навіть якщо таке вимірювання здійснюється в двох взаємно-перпендикулярних напрямках), а зондування поверхні об'єкту в деякій площині. Відтак найбільш ефективним є порівняння магнітного рельєфу навантаженої (в конструкції) і ненавантаженої (в запасі) труби одного виробника і із одної партії. Таким чином, використання методу контролю напруженого стану трубопроводів, заснованого на оцінці магнітних властивостей металу труби, дозволяє комплексно вирішувати задачі підвищення надійності трубопровідної системи.

Ключові слова: магнітопружні давачі механічних напружень, напружено-деформований стан, феромагнітні конструкції.

Определение напряженного состояния является актуальной проблемой. В настоящее время применяются различные методы неразрушающего контроля напряженного состояния трубопроводов, такие как тензометрический, магнитный, ультразвуковой и др. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Часто необходимо использовать несколько экспериментальных неразрушающих методов одновременно. В этом плане важное место занимает магнитный метод контроля. И здесь большая роль отводится первичным преобразователям, которые непосредственно воспринимают влияние механических напряжений и превращают его в электрический сигнал для дальнейшей обработки входящей информации. Изменение магнитных характеристик тесно связано с физическим воздействием на объект контроля. К достоинствам следует отнести высокую мобильность оборудования, возможность проведения контроля без контакта преобразователя с исследуемым объектом. В то же время существует ряд недостатков, свойственных именно магнитным методам – магнитоупругий гистерезис, при котором существует расхождение между значениями индукции при нагрузке и разгрузке. Наибольшее расхождение возникает при первом цикле. При повторении циклов это расхождение уменьшается. Оптимальный путь – научиться использовать полную информацию, имеющуюся в петле гистерезиса. Еще один метод – это не просто проводить измерения в одной точке (даже если такое измерение осуществляется в двух взаимноперпендикулярных направлениях), а использовать зондирование поверхности объекта в некоторой плоскости. Поэтому наиболее эффективным является сравнение магнитного рельефа нагруженной (в конструкции) и ненагруженной (в запасе) трубы одного производителя и из одной партии. Таким образом, использование метода контроля напряженного состояния трубопроводов, основанного на оценке магнитных свойств металла трубы, позволяет комплексно решать задачи повышения надежности трубопроводной системы.

Ключевые слова: магнитоупругие датчики механических напряжений, напряженно-деформированное состояние, ферромагнитные конструкции

The determination of the stress condition is a topical issue. At present, various non-destructive examination methods, such as strain gauge, magnetic, ultrasonic methods, and others are used to analyze pipelines stress condition. Each of them has its advantages and disadvantages. There is often the need to use several experimental non-destructive methods simultaneously. In this regard, the magnetic inspection holds a unique position. In this case a significant role is played by primary transducers, which directly perceive the effect of mechanical stresses and turn it into the electrical signal for further processing of the input information. The change of magnetic characteristics is closely connected with the physical effect on the monitored object. The advantages include the high mobility of equipment, the ability to perform control without the direct contact of transducer with the object under study. At the same time, there are several disadvantages inherent particularly in the magnetic methods – magnetoelastic hysteresis, in which there is the divergence of induction values during loading and unloading. The greatest divergence occurs in the lead-off cycle and decreases during repeated cycles. The best way is to embrace the complete information available in the hysteresis loop. Another method is not only to take measurements at one point

(even if this measurement is carried out in two mutually perpendicular directions), but to perform surface sounding of the object in a certain plane. Therefore, the most efficient method is to compare the magnetic relief of loaded (in the structure) and unloaded (in reserve) pipes of one manufacturer and from one lot. Thus, using the examination method of pipelines stress condition, based on the evaluation of metal magnetic properties of pipes, creates the complex solution to the problems of reliability improvement of pipeline systems.

Key words: magnetoelastic sensors of mechanical stresses, strain-strain state, ferromagnetic structures

Вступ. Однією з найважливіших науково-технічних проблем нафтогазової галузі є забезпечення надійного та безперебійного функціонування систем магістрального трубопровідного транспорту. Для цього необхідний періодичний контроль технічного стану трубопроводів, в тому числі контроль напружено-деформованого стану (НДС) металу трубопроводів.

Контроль НДС металу в промислових умовах проводиться технічними засобами, які засновані на різних фізичних методах (акустичних, електромагнітних, магнітних тощо) [1].

Останнім часом значний інтерес викликають магнітні методи контролю працездатності сталевих виробів і елементів металоконструкцій, які базуються на кореляції структурно-чутливих магнітних параметрів і механічної напруги металу [2].

Для технічного діагностування сталевих виробів і металоконструкцій магнітний контроль НДС металу проводиться із застосуванням технічних засобів, заснованих на реєструванні величини магнітних шумів, магнітної анізотропії металу, коерцитивної сили і використанні магнітної пам'яті металу [3, 4].

Однак існуючим методам і технічним засобам магнітного контролю НДС металу властива низка недоліків: однозначність індикаторів механічної напруги металу за магнітними шумами і магнітною анізотропією металу лише для випадку пружної деформації і їх невизначеність у випадку пластичної деформації металу; значна похибка (в середньому близько 30%) оцінки величини механічного напруження металу при пружних деформаціях в умовах практичного застосування магнітної структуроскопії; необхідність заходів порівняння НДС металу; відсутність технологічних регламентів магнітного контролю працездатності сталевих виробів (крім підйомних пристроїв і посудин, що працюють під тиском) [5]. Все це знижує ефективність магнітного контролю НДС металу і оцінки працездатності сталевих виробів і металоконструкцій.

Дослідження і розроблення методу локального магнітного контролю НДС металу елементів корпусного обладнання та металоконструкцій є актуальним завданням.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Вплив експлуатаційного навантаження на кінетику накопичення пошкоджень сталей магістральних трубопроводів досліджено у працях Є.І. Крижанівського, Л.С. Шлапака, О.М. Карпаша, М.О. Карпаша, Ю.В. Банахеви-ча, Д.Ю. Петрини та ін.

Істотний внесок в розвиток фізичних методів контролю НДС металу зробили російські і

зарубіжні вчені Ключев В.В., Горкунов Е.С., Мужичський В.Ф., Новиков В.Ф., Дубов А. А., Сандомирський С.Г., Венгринович В.Л., Навк V., Santish S., Withers PJ та ін.

Зокрема, вивченню впливу анізотропії матеріалу трубних сталей на оцінювання величини напружень ультразвуковим методом присвячена робота [6], а магнітним методом – робота [7].

Розвитку теорії, створенню методів та засобів визначення ресурсу безпечної експлуатації трубопроводів магнітними методами присвячена робота Кузнецова А.Н. [8]

Питанням дослідження впливу дефектів на НДС магістральних нафтопроводів займалися ряд авторів: А.Я. Недосека, С.К. Фомичев, С.Н. Минаков та інші [9].

В основу неруйнівного магнітоанізотропного методу контролю механічних напружень покладено залежність магнітної проникності феромагнітних матеріалів вимірюваних об'єктів від їх пружного стану. Розробниками на сьогодні пропонується декілька видів виконання системи для вимірювання механічних напружень ділянок магістральних трубопроводів та металоконструкцій.

Дослідження залежності магнітних характеристик феромагнетиків від пружних зусиль і пластичних деформацій розглядалося в роботах Вонсовського С.В., Кондорського Е.И., Максимочкина В.И., Мехонцева Ю.Я., Ландмана Р., Керстена М., Тікадзумі С. [10].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Проблема зменшення впливу магнітопружного гістерезису, при якому існує розбіжність між значеннями індукції під час навантаження і розвантаження, використання магнітного рельєфу поверхні об'єкту контролю.

Постановка задачі

Практичне використання магнітних методів контролю неможливе без створення первинних перетворювачів, методик перетворення вимірюваного параметра в електричний сигнал і обробки корисного сигналу [11]. У цій частині, як і в інших методах неруйнівного контролю, важливе значення мають роботи з пошуку шляхів зменшення впливу магнітопружного гістерезису на результати вимірювань, що є основною перешкодою при використанні всіх без винятку приставних магнітоконтактних перетворювачів, способів отримання інформації, її накопичення, обробки, архівування та документування [12].

Мета даної роботи – дослідження методів контролю залишкових напружень за допомогою накладних перетворювачів при їх взаємодії з поверхнею об'єкту контролю.

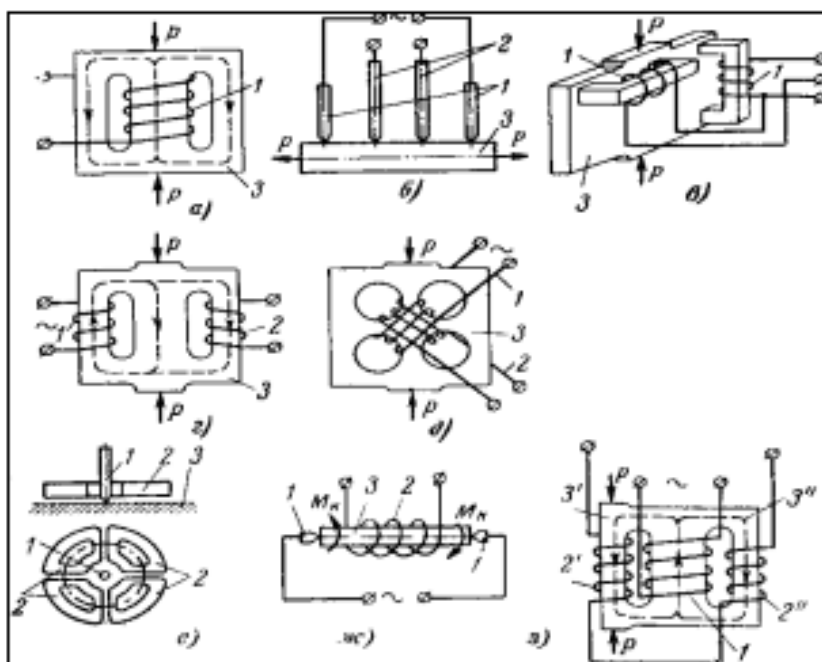


Рисунок 1 – Конструктивні схеми відомих магнітопружних давачів

Основний матеріал

Принцип дії магнітопружних давачів базується на використанні магнітопружного ефекту – фізичного явища, що полягає у зміні магнітних властивостей феромагнітних матеріалів під дією механічних сил.

Переваги магнітопружних давачів якнайповніше проявляються під час вимірювання параметрів об'єктів, що працюють у важких умовах експлуатації (прокатні стани, шахтні підйоми, бурові установки, сталеві канати підвісних мостів тощо)

Конструктивними елементами давача, що здійснюють механічне перетворення, є зовнішній механічний перетворювач і чутливий елемент. За допомогою зовнішнього механічного перетворювача вимірювальний параметр може змінюватися за величиною, знаком або видом.

Аналіз конструктивних схем відомих магнітопружних давачів дозволяє виділити дві основні групи:

1) магнітопружні давачі, в яких використовується зміна магнітних характеристик матеріалу чутливого елемента в одному або двох взаємноперпендикулярних напрямках, таких типів:

- електричного опору;
- дросельного;
- мостового;
- диференційно-трансформаторного;
- шунтового;

2) магнітопружні давачі, в яких використовується зміна ступеня магнітної анізотропії матеріалу чутливого елемента:

- магнітоанізотропні;
- селсини – давачі трансформаторного типу.

Принцип дії МД дросельного типу (рис. 1, а) заснований на зміні повного електричного опору котушки 1, що живиться змінним струмом і

створює магнітний потік в чутливому елементі 3, до якого прикладено вимірюване зусилля.

У магнітопружному давачі електричного опору (рис. 1, б) через електроди 1 до чутливого елемента підводиться змінний струм, а за допомогою електродів 2 вимірюється падіння напруги на ділянці чутливого елемента 3, яке при незмінному струмі пропорційне електричному опору цієї ділянки.

Принцип дії магнітопружного давача мостового типу (рис. 1, в) полягає у вимірюванні різниці повних електричних опорів котушок 1, магнітні осі яких взаємоперпендикулярні.

У магнітопружного давача шунтового типу (рис.1, г) за відсутності вимірюваного зусилля магнітний потік, створений котушкою збудження 1, замикається (в основному через магнітопровід, не охоплений вимірюваною котушкою).

Під дією вимірюваного зусилля магнітний опір магнітопровода 3, виготовленого із матеріалу з позитивною магнітострикцією, в осьовому напрямку зростає, і частина потоку, обумовлена величиною вимірюваного зусилля, відгалужується в шунтувальний магнітопровід, охоплений вимірювальною котушкою 2, з якої знімається вихідна напруга.

У котушковому магнітоанізотропному давачі (рис. 1, д) сумарний вектор магнітного потоку, зчепленого з котушкою збудження 1, спрямований всередину чутливого елемента 3 під кутом 45° до векторів головних механічних напружень. Магнітна вісь вимірювальної котушки 2 розташована перпендикулярно до осі котушки збудження, завдяки чому за відсутності вимірюваного навантаження і повної магнітної ізотропності матеріалу чутливого елемента потокозчеплення з вимірювальною котушкою 2, а отже, і коефіцієнт взаємодукції, дорівнюють нулю.

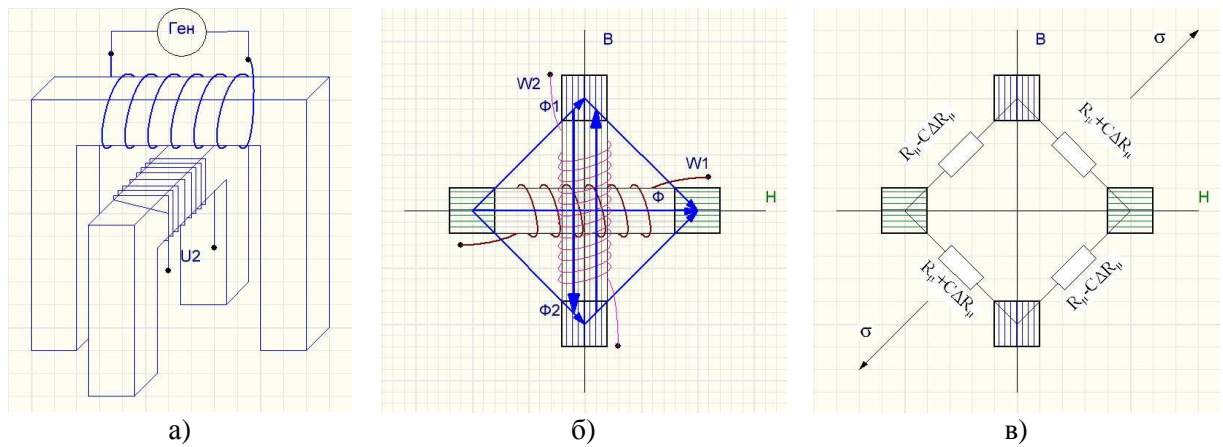


Рисунок 2 – Перетворювач магнітної анізотропії

У електроднокотушковому анізотропному давачі (рис. 1, е) через електрод 1 підводиться змінний електричний струм до чутливого елемента 3. В останньому виникають магнітні потоки розсіювання, зчеплені з вимірювальними котушками 2. Котушки 2 з'єднанні зустрічно, тому при повній магнітній ізотропності матеріалу індуковані в цих котушках е.р.с. рівні між собою, і вихідна напруга давача дорівнює нулю.

Магнітна анізотропія, яка виникла внаслідок механічних напружень, призводить до розбалансування схеми і до появи вихідної напруги.

У електродно-котушковому анізотропному давачі (рис. 1, ж) всередині чутливого елемента 3 при пропусканні крізь нього змінного струму створюються циркулярні магнітні потоки, які при повній магнітній ізотропності матеріалу не зчеплені з вимірювальною котушкою 2. При скручуванні чутливого елемента в цій котушці наводиться е. р. с, що є функцією вимірюваного крутного моменту.

У магнітопружних давачах диференційно-трансформаторного типу (рис. 1, з) магнітний потік, зчеплений з котушкою збудження 1, розгалужується на два потоки, перший з яких пронизує магнітопровід 3' з тим самим, а інший потік – магнітопровід 3'' з відмінним від нього характером зміни магнітних характеристик під дією вимірювального навантаження. Один з цих магнітопроводів умовно названий чутливим, а інший – компенсаційним елементом.

Вибір типу та конструктивної схеми МД визначається вимогами, яким він повинен відповідати.

До цих вимог належать:

- 1) значна потужність вихідного сигналу;
- 2) перетворення механічної напруги, що виникає у рухомих деталях. У цих випадках з метою підвищення надійності зазвичай застосовуються безконтактні МД, а чутливий елемент виготовляється з суцільного матеріалу;
- 3) технологічність виготовлення, а також малий розкид вихідних характеристик при серійному виготовленні МД. Цим вимогам більшою мірою відповідають МД з циліндричними чутливими елементами;
- 4) лінійність перетворення, оскільки магнітопружне перетворення має принципово нелі-

нійний характер, то найбільш доцільним є застосування тієї схеми МД, яка забезпечить можливість лінеаризації вихідної характеристики. Крайні результати в цьому відношенні отримані для безконтактних МД трансформаторного та диференційно-трансформаторного типів.

У МПП використовується магнітопружний ефект, який проявляється тією чи іншою мірою у всіх феромагнітних матеріалів і полягає в зміні магнітних властивостей феромагнітних матеріалів під дією пружних механічних напруг. Спільне використання трансформаторного МПП і магнітоанізотропного перетворювача (МАП) з давачем Хола дало змогу розробити багатофункціональні давачі механічних величин.

Основний вимірювальний блок приладу – магнітопружний давач (перетворювач) – перетворювач трансформаторного типу, первинна обмотка якого є обмоткою намагнічування, а вторинна – індикаторною. Прилад створює магнітний потік у контрольованому металі й реєструє величину його зміни. Величина зміни магнітного потоку пропорційна діючим у виробі значенням пружних механічних напруг.

На рис. 2 наведено схему аналітичного перетворювача для вимірювання анізотропії магнітних властивостей [11]. Перетворювач магнітної анізотропії (рис. 2,а) – це магнітний міст з чотирма полюсами, осердя якого розташовані взаємоперпендикулярно. Схема включення обмоток перетворювача подається на рис. 2,б. Сліди полюсів на випробуваному листі утворюють квадрат, аналогічній схемі звичайного моста Уїтстона (рис. 2,в).

У разі вимірювання магнітоанізотропного ненапруженого матеріалу полюси осердя з індикаторною обмоткою перебувають в еквіпотенційних точках, а напруга на вимірювальній обмотці дорівнює нулю. Силові лінії змінного магнітного поля схематично зображені на рис. 3,б.

Картина зміниться, якщо до зразка прикласти зусилля розтягу (наприклад, вздовж осі Y). Зміняться магнітні проникності, магнітна індукція. Вектор магнітної індукції зміниться за величиною і напрямком. За наявності механічної напруги в металі змінюються умови проходження магнітного потоку між полюсами. Си-

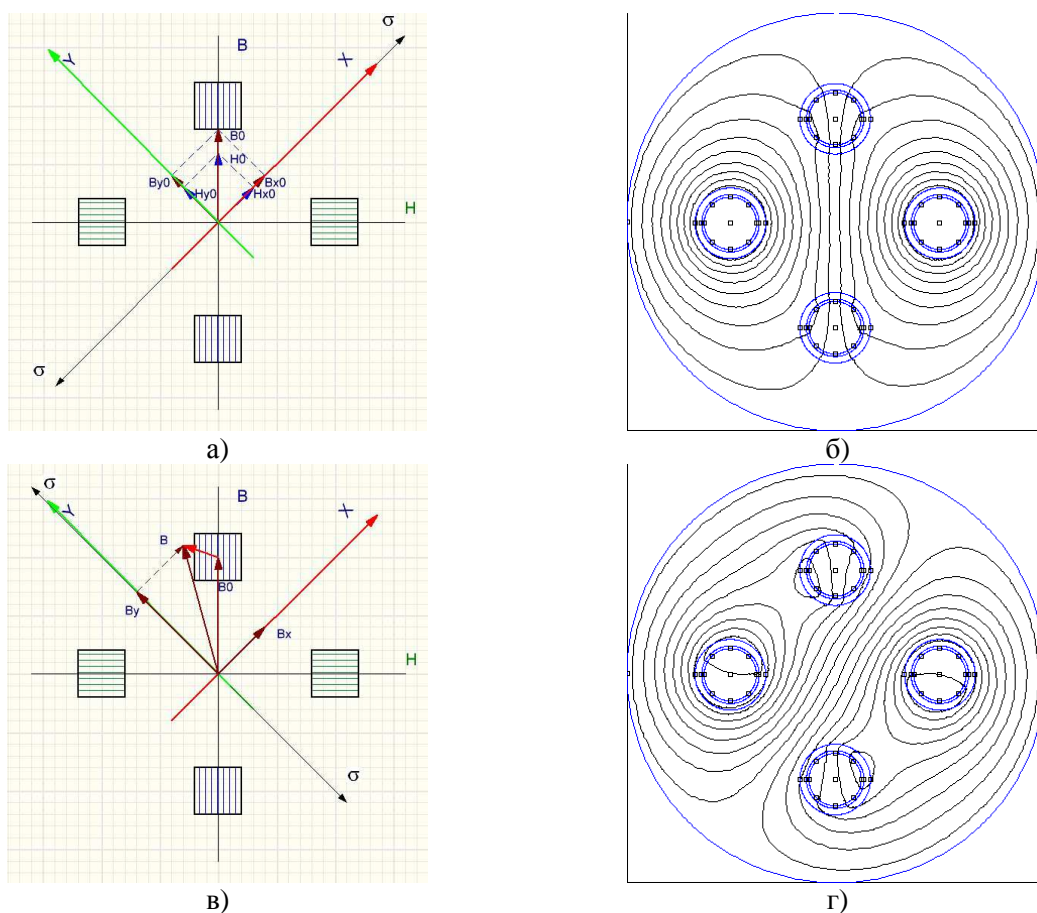


Рисунок 3 – Силві лінії електромагнітного поля магнітоанізотропного перетворювача

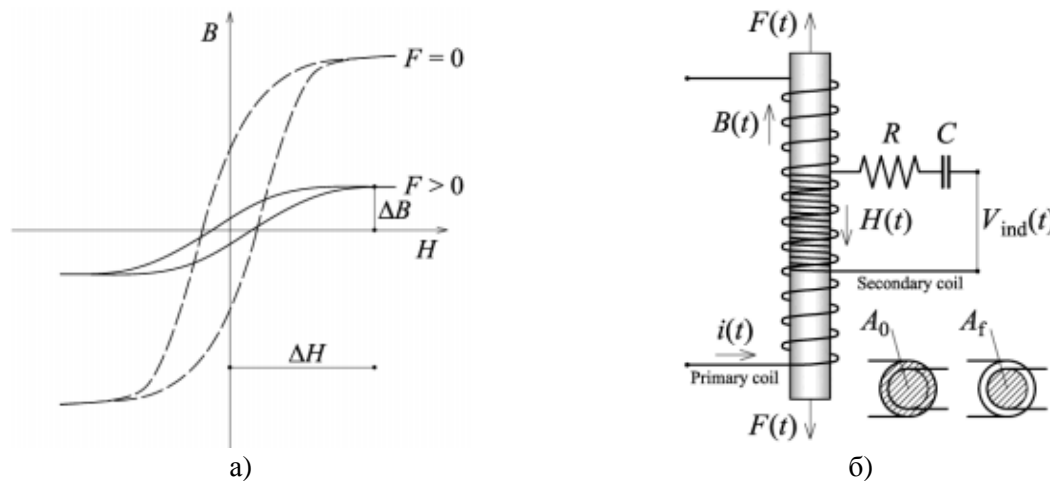


Рисунок 4 – Петля гістерезису для навантажених і ненавантажених феромагнітних матеріалів (а) та принцип вимірювання магнітної проникності зразка (б)

ловий потік спотворюється (рис. 3,г) через зміну магнітної проникності матеріалу деталі. Величина магнітних опорів суміжних плечей моста стає неоднаковою. В індикаторному осерді наводиться змінний магнітний потік, а в його обмотці індукується змінна е.р.с., величина яких залежить від прикладеної механічної напруги.

Загалом залежність змін магнітної проникності від механічної напруги досить складна і підпорядковується закону:

$$\frac{d\mu}{\mu} = \frac{1}{\pi} \cdot \mu_n \lambda_0 \sigma,$$

де μ – магнітна проникність,
 μ_n – початкова магнітна проникність матеріалу,
 λ_0 – початкова магнітострикція,
 σ – механічне напруження.

Дослідження проводились в лабораторії електромагнітних матеріалів на дослідному стенді за відомою схемою визначення магнітної проникності феромагнетика (рис. 4).

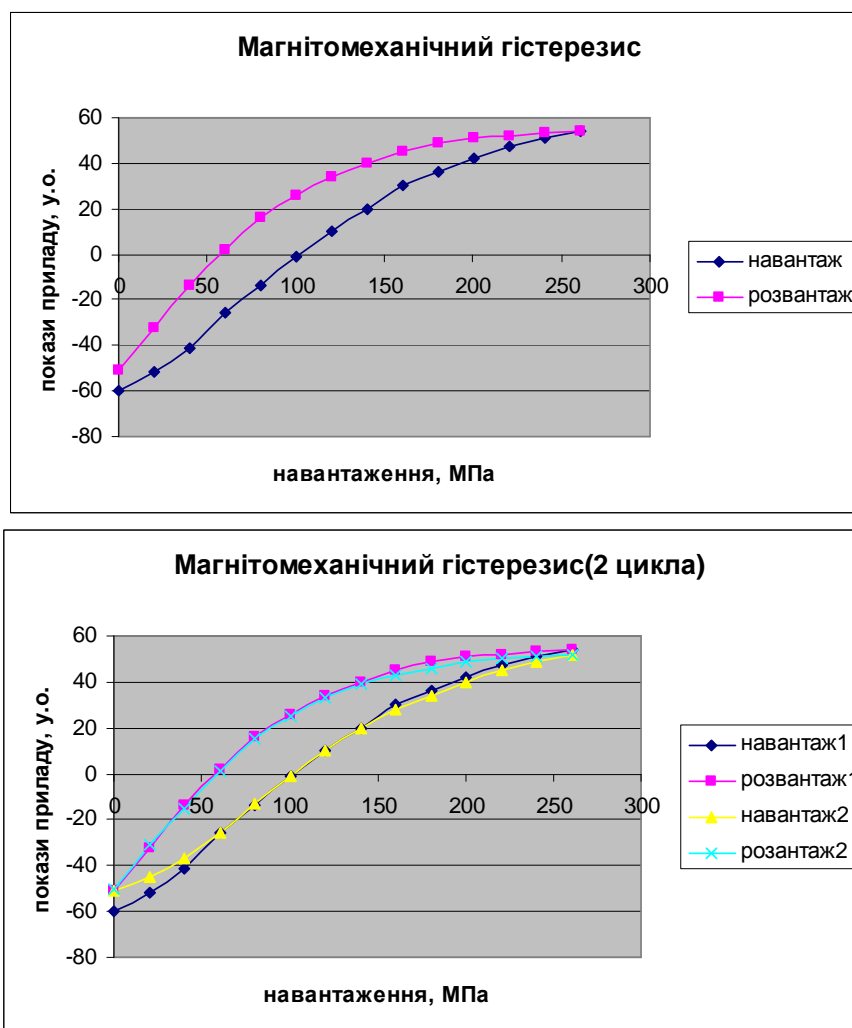


Рисунок 5 – Магнітомеханічний гістерезис

Зразок підлягав декільком циклам навантаження-розвантаження з вимірюванням показів приладу ІНИ-1Ц.

- генератор НЧ-сигналів ГЗ-34;
- вольтметри В7-38;
- осцилограф С1-64;
- навантажувально-розвантажувальний пристрій на основі балки рівного опору.
- магнітоанізотропний давач;
- прилади для вимірювання напружень ІНИ-1Ц, ВН-1;
- котушки для вимірювання магнітної проникності, розташовані на каркасах з внутрішніми розмірами, що дозволяють розмістити в них досліджуваній зразок.

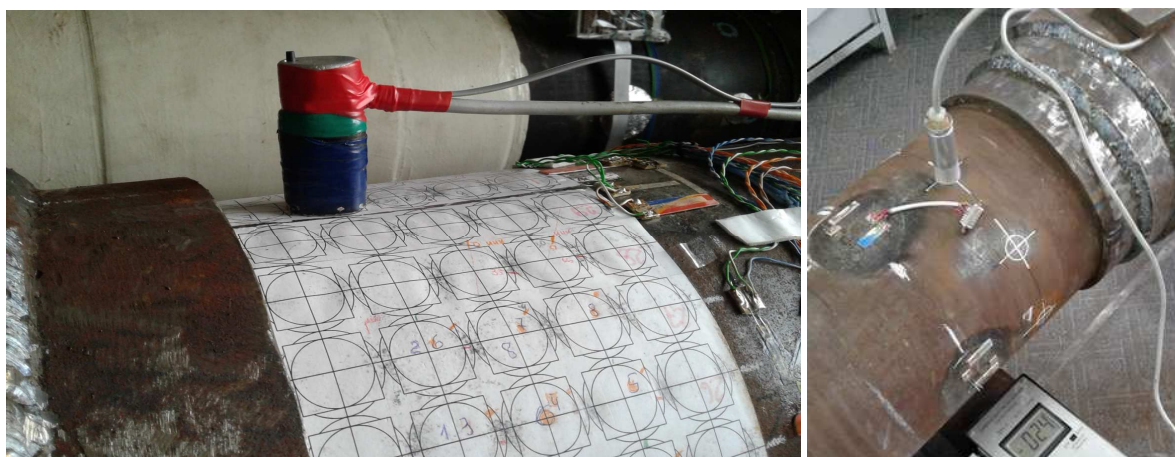
Результати реєстрації петель гістерезису подаються у вигляді двовимірних діаграм і зберігаються у вигляді текстового і графічного файлів на жорсткому диску. Подальша обробка петель гістерезису дозволяє розрахувати параметри магнітного матеріалу.

Аналіз основ магнітопружного методу визначення механічних напружень показав кореляційний зв'язок між зміною магнітної проникності і механічним напруженням. Зміна магнітної проникності феромагнітного матеріалу в напрямку дії механічної напруги все ширше

використовуються для дослідження навантажень і міцності деталей машин в статистичних і навіть динамічних умовах навантаження.

Причинами низької достовірності контролю механічної напруги за допомогою електромагнітних полів є магнітомеханічний гістерезис (рис. 5) і спроби отримання результату за одним з параметрів петлі гістерезису (тільки за залишковою індукцією або тільки за коерцитивною силою).

Широкому впровадженню цього методу вимірювань перешкоджали такі особливості, як вплив на результат вимірювання хімічного складу матеріалу деталі, його структури і термообробки, характеру і ступеня чистоти поверхні деталі, наявність в ній залишкових напружень, а також впливу магнітного гістерезису і ряду інших чинників [14]. Глибина проникнення електромагнітних хвиль в феромагнетик залежить від робочої частоти хвиль. Досі зустрічаються розробки, засновані на оцінці напружень саме в такому тонкому шарі. Мінімальна товщина вимірюваного шару складає 0,5мм, максимальна – 1,5мм. Відомо, що верхній шар (до 0,2 мм) металу перебуває в нехарактерному для конструкції напруженому стані (наклепу, азотування, цементації, через наявність механі-



а) ИНИ-1; б) ВН-1

Рисунок 6 – Магнітоанізотропний давач в точках вимірювання приладами

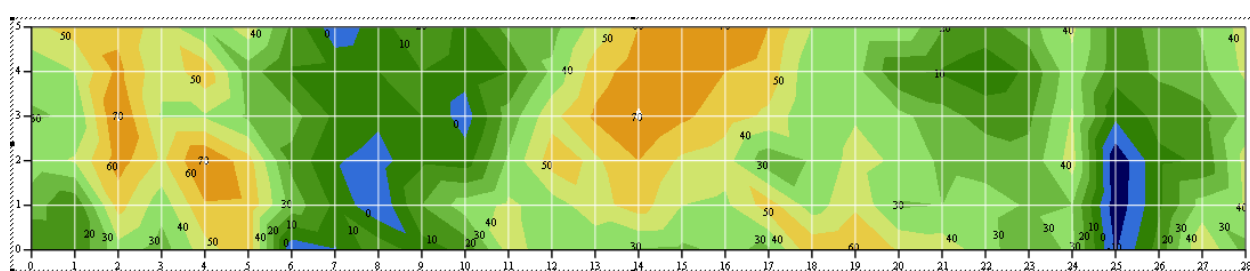


Рисунок 7 – Магнітна картина вимірювання по периметру труби (28x5 точок вимірів)

чних мікроподряпин та ін.). Високі значення похибок, що отримуються при стандартному підході до розв'язання задачі, і ігнорування деяких фізичних явищ довгий час були перешкодою для впровадження електромагнітних методів на практиці.

Наступним дослідженням стало моделювання розподілу механічної напруги на реальному об'єкті. Як реальний об'єкт використовувалась модель ділянки трубопроводу з матеріалу труби зі Сталі 20 діаметром 273 мм та товщиною стінки 8 мм.

В процесі роботи перетворювач приладу встановлюють на поверхню в зоні контролю (рис. 6). Зона контролю є місцями найбільш вірогідної появи дефектів (наприклад, зварні шви). У зоні контролю наносять сітку. Виміри проводять в вузлах сітки.

За результатами вимірювання шляхом математичної обробки отримують карти механічної напруги, аналізуючи які, визначають місця концентрації напруги. Так, в околі потенційних та розвинених дефектів порушується рівномірність розподілу напруги. На рис.7 зображено карту розподілу механічної напруги по периметру заповненої водою труби.

Візуалізація фактичного розподілу механічної напруги в конструкціях дозволяє коригувати методи їх розрахунку для конкретних умов роботи, підвищити ефективність імітаційного моделювання металевих конструкцій.

Висновки

Механічні методи найбільш достовірні, але ними вимірюють значення напруги в конкретній області. Визначення полів напруги з різними величинами залежно від координати вимагає проведення великої кількості вимірів.

Літературне та експериментальне дослідження властивостей кореляційного зв'язку між механічними і магнітними властивостями ферромагнетиків підтвердило правильність вибору застосування магнітоанізотропних перетворювачів для контролю механічних напружень в сталевих металоконструкціях. Для дослідження полів механічної напруги можуть використовуватися прилади, що відносяться до класу електромагнітних вимірювачів напруги, принцип дії яких базується на властивості ферромагнітних матеріалів змінювати магнітний стан під впливом механічної напруги.

В реальних умовах невідомо, що передувало виникненню напруженого стану - навантаження чи розвантаження. Загальна магнітна неоднорідність, викликана прокатуванням та згинанням листових матеріалів, калібруванням труб, термічною обробкою листів та нерівномірністю хімічного складу партій матеріалів повинна враховуватись шляхом градування приладів визначення механічних напружень на зразках-еталонах, зроблених з того ж матеріалу, але вільних від залишкової напруги. Без них результати вимірів можуть бути інтерпретовані абсолютно некоректно. Поява локальної магнітної неоднорідності, що до останнього часу не враховувалась, підвищує похибку вимірів.

У зв'язку з цим актуальною є задача створення методів контролю залишкових напружень, що дозволяють отримувати інформацію на реальних конструкціях в умовах експлуатації, оперативно, з досить високою чутливістю, точністю, при мінімальному руйнівному впливі на об'єкт.

Зондування металу магнітопружним давачем дає змогу отримати високу відтворюваність результатів діагностування і здійснювати пошаровий збір інформації про напружений стан середовища.

Застосування таких методів дозволяє "візуалізувати" поле механічних напружень, виявляє їх положення і розміри, не вимагаючи руйнування конструкції. Тому ці методи можуть з успіхом застосовуватись для оцінки напружень в сталевих металоконструкціях. Результати вимірювань надають інформацію, достатню для кількісної оцінки механічних напруг, оцінки рівнів різниці головних механічних напруг, визначення наявності умов розвитку руйнування в досліджуваній зоні об'єкта контролю.

Література

1 Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля. / В.В. Клюев, В.Ф. Мужикский, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Кн. 2: Оптический контроль. / В.Н. Филинов, А.А. Кеткович, М.В. Филинов. - Кн. 3: Радиоволновой контроль / В.И. Матвеев. - М.: Машиностроение, 2004. - 832 с.: ил.

2 Орехов Г.Т. Связь магнитоупругого эффекта с напряжением и деформациями при плоском напряженном состоянии ферромагнитных материалов // Дефектоскопия. - 1975. - №3. - С. 100-105.

3 Применение магнитных методов для оценки нагруженности и поврежденности стали Х70. / Э.С. Горкунов, С.Ю. Митропольская, Д.И. Вичужанин, Е.А. Туева // Физическая механика. - 2010. - № 13.

4 Василенко О.Н. Методы и средства многопараметровой магнитной структуроскопии изделий с использованием составных разомкнутых магнитных цепей: автореферат. - Екатеринбург, 2014.

5 Гуманюк М.Н. Магнитоупругие давачи в автоматике. - Киев: Техніка, 1965. - 154 с.

6 Вплив анізотропії трубних сталей на оцінювання напруженого стану ультразвуковим методом / Шлапак Л.С., Коваль В.М., Олійник А.П., Дніпренко В.М., Марчук Я.С. // Нафтова і газова промисловість. - 2003. - №1.

7 Горкунов Э.С. Влияние упругой деформации растяжением (сжатием), кручением и гидростатическим давлением на магнитные характеристики трубной стали 09Г2С / Горкунов Э.С., Мушников А.Н., Задворкин С.М., Якушенко Е.И. // Научные известия на НТСМ, 2012. - ISSN 1310-3946.

8 Кузнецов А.Н. Развитие теории, создание способов, средств и технологии определения ресурса безопасной эксплуатации трубо-

проводов магнитными методами неразрушающего контроля: диссертация доктора технических наук. - Москва, 2013. - 211 с.: ил.

9 Визначення напруженого стану зварних магістральних трубопроводів магнітоанізотропним методом [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06 / Мінаков Сергій Миколайович; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". - К., 2012. - 257 с.

10 Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения: пер. с японского. - М.: Мир, 1987. - 419 с., ил.

11 Мехонцев Ю. Измеритель упругих напряжений // Радио. - 1958. - № 5.

12 Шевченко Г.И. Магнитоанізотропные давачи. - М.: Энергия, 1967. - 72 с.

13 Радутна К.Г. Дослідження принципів побудови манітопружних давачів механічних напружень з використанням ефекту Хола / К.Г. Радутна, А.М. Науменко // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. - 2012. - Вип. 4(33).

14 Жуков С.В. Исследование параметров полей механических напряжений в металлических конструкциях приборами "Комплекс-2" / С.В. Жуков, Н.Н. Копица. - ООО "Институт "ДИМЕНСтест".

Стаття надійшла до редакційної колегії
05.12.18

Рекомендована до друку професором Грудзом В.Я. (ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) канд. техн. наук Костівим В.В. (УМГ «Прикарпаттрансгаз», м. Івано-Франківськ)