

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ, ІНФОРМАЦІЙНІ І ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ

УДК 539.4

В.І. Білобородченко

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра зварювального виробництва, діагностики
і відновлення металоконструкцій

ІНФОРМАЦІЙНА ЗДАТНІСТЬ МАГНІТОСТАТИЧНИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ (НДС) ТРУБОПРОВОДІВ. ЧАСТИНА 1

© Білобородченко В.І., 2010

Дослідження інформаційної здатності магнітостатичних методів діагностування напружено-деформованого стану трубопроводів.

The questions of informative power of the magnetic-static diagnosing of tense-deformed state of pipe constructions are considered on size of a -coefficient of magnetic heterogeneity in relation to grounds of main tensions

Незважаючи на відсутність строгої теорії магнетизму, прикладне оцінювання реакції магнітного поля на НДС матеріалу конструкції широко застосовується при прогнозуванні роботоздатності трубопровідного транспорту.

Вимірювання залишкових та робочих напружень інструментальними засобами магнітних методів діагностики та контролю має певні переваги, зокрема у [1, 2] зазначено, що методи вимірювання індукції та магнітостатичний метод коерцитивної сили мають найкращу кореляцію з механічними властивостями та станом матеріалу виробу.

Постановка проблеми. Проте досвід використання магнітних традиційних засобів діагностики НДС, що ґрунтуються на активній взаємодії сигналу з матеріалом, і при яких наведене зовнішнє поле створює динамічну суперпозицію з власним полем матеріалу та незворотно змінює його, значно впливає на інформативність результатів вимірювання НДС. Зміна власного магнітного поля на рівні кристалічної ґратки та субструктури доменних областей, сформованих попередніми технологічним циклом оброблення та експлуатації конструкції (магнітна пам'ять або магнітна праісторія матеріалу) визначається динамікою взаємодії енергій наведеного зовнішнього зондуючого поля та власного існуючого. Об'єктивна неможливість урахування характеру, величини та часу існування таких змін призводить до отримання непрямой інформації про НДС конструкції. Також слід зазначити, що існує: а) можливість діагностики на непрацюючій конструкції – реально оцінюється залишковий НДС, при якому поля напружень та деформацій критично відмінні від робочих; б) можливість потрапляння у зону вимірювання невиявлених контролем порушень суцільності матеріалу, які мають власний НДС і утворюють локальну зону критичних напружень (ЗКН); в) можливість прийняття аргіогі однорідності НДС та структури матеріалу для контрольованого перерізу; г) надійність отриманої оцінки НДС узалежнена суб'єктивними факторами – кваліфікація, досвід оператора ін.; д) необхідність попереднього градування приладів з одночасною відсутністю метрологічної бази для їх сертифікації, що призводить до похибок у розробленні

методик діагностування; є) у більшості випадків повірка приладів проводиться на дослідних зразках, які неадекватно відбивають фактичний енергетичний стан об'єкта діагностування.

При оцінюванні НДС за коерцитивною силою H_C найбільш чутливою до його зміни та виникнення локальних ЗКН є магнітна анізотропія (МА), яка оцінюється за відношеннями вимірювань нормально H_{\perp} та вздовж осі навантаження H_{\parallel} [3]

$$\Delta H_C = H_{\perp} - H_{\parallel} [\text{A/cm}]; \quad a = \frac{H_{\perp} - H_{\parallel}}{H_{\perp} + H_{\parallel}} \quad (1)$$

Формулювання мети дослідження. Мета роботи – визначення інформативної здатності методики повірки інструментальної бази діагностування НДС та ЗКН за (1) на основі створення узагальнених моделей реакції магнітного поля на напруження та деформації навантаженої конструкції. Такий підхід ґрунтується на уявленні власного магнітного поля виробу як відкритої і незворотно змінної при навантаженні та вимірюванні анізотропної метадоменної стохастичної системи, магнітна праїсторія якої сформована випадковими чинниками технологічного та експлуатаційного впливу.

З вищевикладеного випливає, що надійна оцінка ресурсу конструкції вимагає: а) знання фактичного стану НДС; б) урахування НДС з вихідною структурою та геометрією виробу, що корелює магнітну характеристику об'єкта з механічним станом, зокрема, накопиченими експлуатаційними напруженнями; в) виявлення ЗКН, які, власне, визначають реальний ресурс, а не розрахункові значення напружень.

Розв'язання проблеми. Дослідження проведені на випробовувальному стенді кафедри (рис. 1), який являє 9-метрову пліть магістрального трубопроводу, виготовленого з резервних котушок сталей 13ГСУ та 17Г1С, зварених за нормативними технологіями 70-х років, що відповідає життєвому циклу існуючих конструкцій трубного транспорту; регульоване навантаження $P=0\dots150$ ат; інструментальна база для магнітних вимірювань – коерцитиметр КРМ-Ц-К2М.

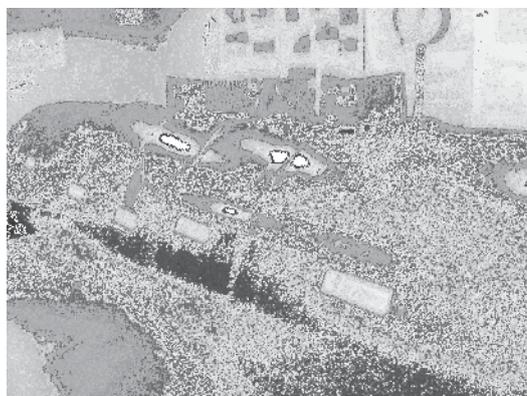


Рис. 1. Стенд повірки інструментальної бази для діагностики НДС магістральних трубопроводів

Величину напруженого стану стінки труби оцінено за теорією оболонок та тензометрією (комплекс «Агат-Топаз»). Для визначення напружень здійснене вимірювання товщини стінки труби ультразвуковою товщинометрією (УЗТ)- товщиномір УТ-31. Оброблення результатів – за процедурою непараметричних методів; апроксимація полігону розподілення проведена у вигляді неперервної аналітичної функції за

$$p(x) = A \exp(-|x / \lambda S|^{\alpha}) \quad [4], \quad (2)$$

а саме: для стінки зі сталі 13ГСУ

$$p(\delta) = 0.554 \exp(-|\delta_c / 0.55|^2), \quad \delta = 13,5 \text{ мм};$$

для стінки зі сталі 17Г1С

$$p(\delta) = 0.326 \exp(-|\delta_c / 0.431|^3), \delta = 9,8 \text{ мм},$$

де δ_c – центровані значення товщини стінки при довірчій імовірності $P=0,9$.

Аналіз (2) демонструє, що для товщини стінки із сталі 17Г1С характерне розподілення типу «серау», яке характеризується показником відносного вмісту у композиції рівномірної складової середньоквадратичного відхилення (СКВ)

$$C_p = S_p / S_{\text{exp}}, \quad (3)$$

де S_p, S_{exp} – відповідно СКВ рівномірного та експоненціального розподілень.

Оскільки за стандартом товщина трубної заготовки нормована нормальним законом розподілення, то відхилення показника ступеня $\alpha > 2$ неявно демонструє зміну фізико-механічних характеристик матеріалу сталі 17Г1С, до яких чутливі відповідні акустичні параметри [5]. Отже, попереднє оцінювання товщини стінки трубопроводів УЗТ перед магнітостатичною діагностикою є вельми бажаною, оскільки не тільки неявно демонструє початковий НДС матеріалу, але й дає змогу коректно оцінити надійність результатів вимірювання.

Хоча позитивним моментом при оцінці результатів коерцитиметрії вважається їх незалежність від магнітної проникності, проте аналіз величини коерцитивної сили

$$H_c = H_s - NB_r, \quad (4)$$

де H_s – напруженість поля технічного насичення матеріалу; B_r – залишкова індукція; N – намагнічуючий фактор, демонструє, що останній складно функціонально пов'язаний з геометрією та магнітною проникністю зони вимірювання [5].

З вищевикладеного та урахуванням робочих характеристик приладу КРМ-Ц-К2М визначені умови оцінювання НДС при навантаженні стелу: а) обрана лінійна зона котушок, рівновіддалена від стикових швів; б) прийнята модель однорідності магнітних властивостей цього матеріалу у перерізі дослідної зони при заданій товщині стінки труби.

Вибір α -коефіцієнта (1) як інформаційно здатного (рис. 2) ґрунтується на незначних кореляційних моментах $\eta_{H \perp(\Pi) / \Sigma}$ функціоналу $H_c = f(\sigma)$ (рис. 3), що становлять для сталі 13ГСУ відповідно 0,441 та 0,40; для сталі 17Г1С – 0,194 та 0,78, а також наявністю S- точки сингулярності, яка демонструє втрату чутливості методу відносно орієнтації площин головних напружень.

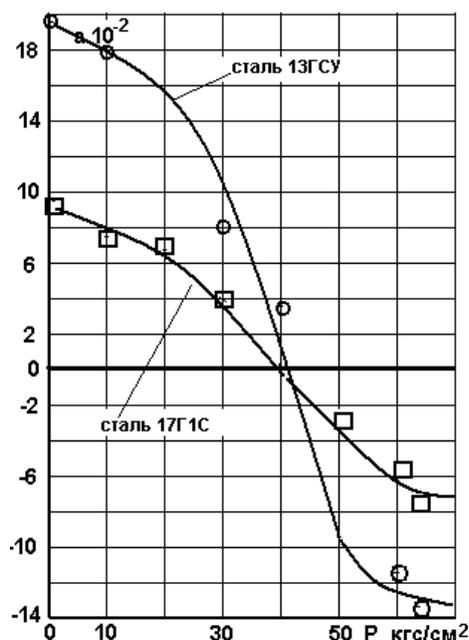


Рис. 2. Залежність α -коефіцієнта МА матеріалу від випробувального тиску

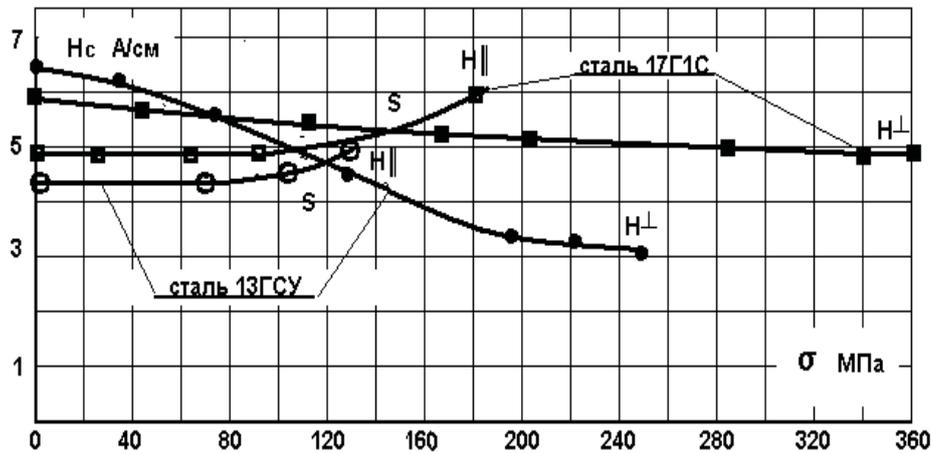


Рис. 3. Залежність коерцитивної сили H_c при вимірюванні відносно головних площин напружень (позначення у тексті)

Використання методик [6] дало змогу однозначно зв'язати отримані дані з зоною напружень, яка відповідає межі пропорційності $\sigma_{пл}$. З урахуванням життєвого циклу матеріалу S-точка описується характеристичним коефіцієнтом

$$K_o = \sigma |H_{\perp} = H_{\parallel}| / \delta, \quad (5)$$

де $\sigma |H_{\perp} = H_{\parallel}|$ – напруження, при яких магніто-метрична інформація про орієнтацію напружень у головних площинах втрачається; δ – товщина стінки труби.

Для сталі 13ГСУ $K_0=8$, а для сталі 17Г1С $K_0=10$, що також свідчить про відмінність характеристик цього матеріалу.

Виходячи з принципу про незворотно змінну відкриту стохастичну доменну анізотропну систему, яка описує НДС матеріалу під дією навантаження, проведено пошук її опису універсальним ймовірнісним розподіленням у вигляді аналітичної моделі за

$$a_{IK} = a_{oK} \exp(-|\sigma_{IK} / C|)^n, \quad (6)$$

де a_{oK} , a_{IK} – відповідно кодовані значення коефіцієнта МА перед початком вимірювань НДС (без навантаження конструкції) та у часі навантаження при певному σ_{IK} напруженні у стінці труби ($\sigma_I = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 - \sigma_{\perp}\sigma_{\parallel} + \sigma_{\parallel}^2}$); n, c – параметри розподілення.

Залучення процедур для визначення виду розподілення та розрахунок його параметрів дало змогу отримати з довірчою ймовірністю $P=0,9$ модельні описи відгуку МА на зміну НДС матеріалу виробу (рис. 4):

$$\text{сталь 13ГСУ: } a_{IK} = a_{oK} \exp[-(\sigma_{IK} / 4.74)]^3 \quad (7)$$

$$\text{сталь 17Г1С } a_{IK} = a_{oK} \exp[-(\sigma_{IK} / 4.5)]^2,$$

де σ_{IK} визначається за шкалою:

сталь 17Г1С

σ_I , МПа	0	45	90	135	180	225	270	286
σ_{IK}	0	1	2	3	4	5	6	6,5

сталь 13ГСУ

σ_I , МПа	0	32	64	96	128	160	192
σ_{IK}	0	1	2	3	4	5	6

Шкалу кодування для a_{iK} наведено на рис. 4.

Модельна симуляція умов виникнення ЗКН (рис. 4) відповідно до описів (7) демонструє рівноімовірнісні варіанти зміни a -коефіцієнта МА для сталі 13ГСУ та однозначну зміну градієнта a -коефіцієнта МА для сталі 17Г1С, яка володіє відмінними від початкових фізико-механічними властивостями.

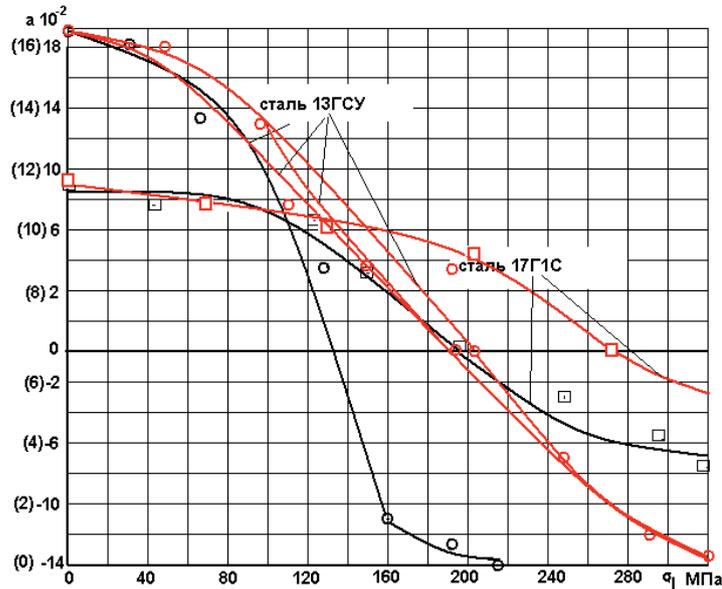


Рис. 4. Графічне уявлення моделей реакції a -коефіцієнта МА на зміну НДС матеріалу конструкції;
 – у матеріалі присутні тільки напруження у головних площинах;
 — — — модельна симуляція формування ЗКН

Інформативна здатність a -коефіцієнта МА щодо зміни НДС матеріалу конструкції оцінювалася на підставі таких положень: а) для кожного σ_i , що характеризує НДС перед початком вимірювання існує парамагнітний стан, обумовлений попереднім НДС (σ_{i-1}); б) такий стан у випадку зміни НДС та його оцінювання магнітними методами існуватиме до наступного підвищення напружень у стінці труби (σ_{i+1}). Звідси: а) ентропія $H(a)[\sigma]$ вимірювань для діапазону зміни НДС, характеризуваного діапазоном зміни зазначених напружень коректно описується рівномірним розподіленням

$$H(a)[\sigma] = \int_{\sigma_i}^{\sigma_{i+1}} \frac{1}{\sigma_{i+1} - \sigma_i} \ln \frac{1}{\sigma_{i+1} - \sigma_i} = \ln \left(\frac{1}{\sigma_{i+1} - \sigma_i} \right) \quad (8)$$

Ентропія $H(a)[\sigma_i / \sigma_{i \text{ вимір}}]$ результату вимірювань коерцитивної сили та визначеного відповідного a -коефіцієнта описується щільністю експоненціального розподілення величини a_{iK}

$$P(a_{ik}) = P(a_{\text{max.k}}) \exp[-(\sigma_{ik} / C)^\alpha] \quad (9)$$

Якщо $P(a_{\text{max.k}}) = d$ – постійна для даного розподілення (оцінювання прамагнітної історії матеріалу перед проведенням оцінювання НДС конструкції); c, α – постійні параметри розподілення, то ентропія вимірювання НДС становить

$$H(a)[\sigma_i / \sigma_{i \text{ виміри}}] = \int_{-\infty}^{+\infty} p(a_k) (\ln d + \sigma_{ik}^\alpha / C^\alpha) d\sigma_k \quad (10)$$

При інтервальному оцінюванні

$$p(a_k) = p(a_{k(i+1)}) - p(a_{k(i)}) = \Delta, \quad (11)$$

де Δ – постійна, власна для кожного інтервалу вимірювання, визначеного границями σ_i - σ_{i+1} .

Звідки

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Delta(\ln d + \sigma_{ik}^\alpha / C^\alpha) d\sigma_k = \Delta \ln d + 1/C^\alpha \sigma_k^{\alpha-1} \quad (12)$$

Тоді кількість інформації I , отриманої у результаті вимірювання на i -інтервалі зміни НДС та оціненої через a -коефіцієнт МА, становить

$$I = H(a)[\sigma_i] - H(a)[\sigma_i / \sigma_{i\text{вими.}}] = \ln(\sigma_{i+1} - \sigma_{i-1}) - \Delta \ln d - 1/C^\alpha \sigma^{\alpha-1}, \quad (13)$$

або при прийнятому кроці зміни інтервалу $\sigma_{\text{код.}}=1$ вираз (13) спрощується до вигляду

$$I = \exp - \Delta \ln d - 1/C^\alpha \sigma_k^{\alpha-1} \quad (14)$$

З урахуванням (9) кількість інформації становить

$$I = -(1/C^\alpha \sigma_{ik}^{\alpha-1}) - P(a_k) - \ln P(a_{k\text{max}}) \quad (15)$$

Графічну інтерпретацію виразу (15) при повірці коерцитиметру на трубному стенді наведено на рис. 5.

Характеристична S-точка сингулярності, яка визначає границю області пропорційності напружень для цього матеріалу, визначає градієнт зміни інформаційної здатності оцінки НДС магніто-статичним методом за a -коефіцієнтом МА; зокрема для сталі 13ГСУ $\text{grad } I/\sigma_{\text{ик}} = 0,23$, а для сталі 17Г1С $-0,34$.

З рис. 5 випливає обмеження на застосування зазначеного методу оцінювання НДС: область інтенсивного розвитку процесу пружно-пластичного деформування, у якій зростає інерція переформування доменних зон у матеріалі.

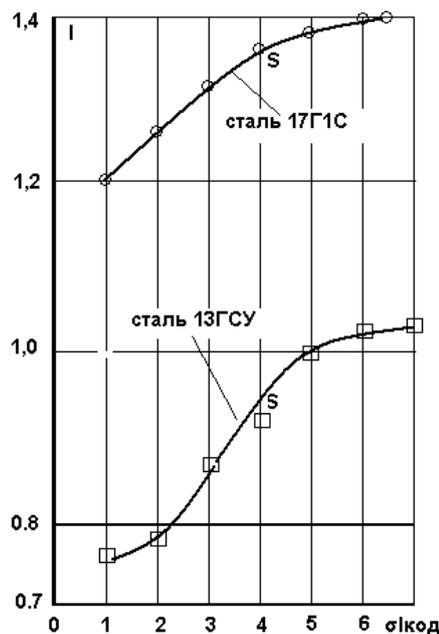


Рис. 5. Залежність інформації про НДС матеріалу від напружень у стінці труби

Висновки. 1. Масив даних оцінювання НДС за величиною a -коефіцієнта МА при повірці інструментальної бази коерцитивного методу діагностики коректно описується універсальною експоненціальною моделлю щільності розподілення величини a -коефіцієнта у полі зміни НДС з параметрами розподілення залежними від матеріалу виробу та його магнітної праїсторії. 2. Втрата інформативності оцінки НДС при значенні a -коефіцієнту МА, що дорівнює нулю, відповідає умові досягнення металом границі області пропорційних напружень, яка за коефіцієнтом $K_0=8...10$. 3. Ефективність методу за ентропійною оцінкою зміни інформації про НДС визначає найбільш

інформаційно-достатній діапазон його застосування у діагностиці трубних конструкцій. 4. Запропоновані модельні уявлення можуть бути використані у розробленні стандартів та методик на повірку та залученні коерцитиметрії для діагностування НДС трубних конструкцій.

1. Горошевский В.П., Камаева С.С., Колесников И.С. Обзор новых магнитных методов неразрушающего контроля // Территория Нефтегаз. – 2005. 2. Крутикова Л. Оценка остаточного ресурса металлоконструкций магнитным методом // Металлические конструкции. – 2008. 3. Новиков В.Ф., Яценко Т.А., Бахарев М.С. Зависимость коэрцитивной силы малоуглеродистых сталей от одноосных напряжений // Дефектоскопия. – 2001. – № 11. 4. Справочник по прикладной статистике. Т. 1.2 / Под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана. – М.: Наука, 1989. 5. Недосека А.Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. – К.: ИНДПРОМ, 1998. 6. Борисов В.Г., Бугай Н.В. Контроль металлов в энергетике. – К.: Техника, 1986.

УДК 621.142;621.376.571

І.Д. Зелінський

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра механіки та автоматизації машинобудування

ШВИДКИЙ АЛГОРИТМ ФОРМУВАННЯ ШІМ-КОДУ ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ВІБРОЗБУДНИКОМ

© Зелінський І.Д., 2010

Запропоновано оригінальний алгоритм формування синусоїдального сигналу на основі широтно-імпульсної модуляції без використання операції множення.

In the article the original algorithm of sinewave signal forming on the basis of latitudinal impulsive modulation without the using of multiplication operation is offered.

Вступ. Створення ефективних вібраційних пристроїв вимагає розроблення систем керування, що забезпечують широкий діапазон регулювання параметрів вихідного сигналу. Тиристорні схеми [1, 2] не забезпечують регулювання частоти вихідного сигналу в широких межах. Використання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) [3] дає змогу створювати високоефективні системи керування з широким регулюванням як амплітуди, так і частоти вихідного сигналу. Алгоритм формування ШІМ-коду передбачає операції додавання, множення та визначення тригонометричних функцій, що ускладнює його реалізацію на простих 8-розрядних процесорах з блоками ШІМ серії PIC16. Вказані процесори не мають апаратних команд множення, ділення та визначення тригонометричних функцій, що, на перший погляд, ускладнює їх використання для систем керування електромагнітними віброзбудниками. Використання процесорів серії PIC 18, що вдвічі дорожчі, але мають апаратне множення, не вирішує задачі повністю, оскільки такі процесори також потребують спеціального алгоритму визначення тригонометричних функцій.

Формулювання мети дослідження. Розроблення алгоритму визначення в реальному часі ШІМ-коду сигналу на основі обробки табличних функцій без використання операцій множення та визначення тригонометричних функцій для використання у простих, дешевих та високоефективних системах керування електромагнітними віброзбудниками.

Викладення основного матеріалу дослідження. Алгоритм формування відліків ШІМ-сигналу в реальному часі полягає у формуванні ШІМ-коду, в якому модульований сигнал