

ОБРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

УДК 621.317.44

Я. Л. Іваницький, О. П. Бухало, Г. В. Микитин,
З. В. Дмитрів, М. М. Гвоздюк

ОЦІНЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВОДНЮ У ФЕРОМАГНЕТИКАХ НА ОСНОВІ МАГНІТОРЕЛАКСАЦІЙНОГО МЕТОДУ

The known methods and means for definition of hydrogen concentration in metals are analysed. Proposed magnetorelaxation method is based on estimation an magnetorelaxation parameter by developed algorithmes and registration system. System approach for hydrogen concentration in ferromagnetics is proposed.

Проаналізовано відомі методи і засоби визначення концентрації водню у металах. Запропоновано магніторелаксаційний метод оцінювання параметра магнітної релаксації феромагнетика за допомогою системи реєстрації магнітної післядії. Розроблено системний підхід до визначення концентрації водню у феромагнетиках на основі магніторелаксаційного методу.

Актуальність проблеми визначення концентрації водню в металах. На сьогодні в галузі неруйнівного контролю і технічного діагностування залишається актуальною проблема визначення концентрації водню в металах і, на цій основі, оцінювання міцності та довговічності матеріалів і конструкцій [1, 2, 3]. Вихідним аспектом визначення стану якості конструкційних матеріалів є структура металів і сплавів, їхні електричні, магнітні властивості і параметри, які виявляються через відповідні фізичні явища та ефекти. В околі проблеми метал-водень досліджують феромагнетиками, їхні властивості на основі фізичних явищ та ефектів. Актуальним аспектом у дослідженнях є динамічні процеси намагнічування феромагнетиків.

Особливим є явище магнітної післядії, яке проявляється у вигляді акомодациї (зростання в часі) і дезакомодациї (спаду в часі) магнітної проникності відповідно після включення та виключення зовнішнього магнітного поля [4, 5]. Дослідження часової зміни параметрів феромагнітних матеріалів на основі методу, засобу, алгоритму реєстрації магнітної післядії уможливило визначення налагодження зв'язку з концентрацією водню в матеріалі і, на цій основі, визначення стану якості конструкційного матеріалу.

Відомо декілька методів визначення концентрації водню у металах за відповідних експериментальних умов. Аналіз процесів взаємодії водню з металами проводять такими методами: ядерно-фізичними, месбауерівської спектроскопії, ядерного магнітного резонансу, нейтронографії [6]. На сьогодні визначають концентрацію водню такими методами: оцінювання теплоємності; зважування; хроματοграфії, вакуумної екстракції.

Особливо цікавими є результати дослідження системи метал-водень на предмет визначення теплоємності водню, розчиненого в металах, при постійному тиску C_p і при постійному об'ємі C_v . За таких умов рівноважну концентрацію водню аналітично визначають залежно від температури і тиску [7]. У роботі [8] подано результати дослідження впливу температурно-механічних напружень на процес вбирання водню титаном. Умови експерименту – температура до 800 К, тиск водню $0,5...0,6 \cdot 10^6$ Па. Кількість увібраного водню (кінетична концентрація) визначена методом зважування на вагах ВЛР-20 з точністю до $1,5 \cdot 10^{-8}$ kg і розра-

© Я. Л. Іваницький, О. П. Бухало, Г. В. Микитин, З. В. Дмитрів, М. М. Гвоздюк, 2009

хована за зміною тиску і об'єму реакторної системи. Вміст водню також визначається еволюграфом ВГ-9 з чутливістю до газів, меншою за 1mm^3 . Метод газової хроматографії (мас-спектрометрії) дає змогу екстрагувати водень із зразка досліджуваного матеріалу за умови високотемпературного нагрівання у вакуумі [9, 10]. Метод вакуумної екстракції дає можливість визначити кількість незв'язаного газоподібного водню за допомогою мас-спектрометра у вакуумній системі при її нагріванні до температури $200\text{...}400^\circ\text{C}$ [9].

У сфері неруйнівного контролю і технічного діагностування розроблені і функціонують прилади та давачі для визначення вмісту водню в металах. Наприклад, вимірювач вмісту водню і його важких ізотопів у поверхневому шарі твердого зразка без його руйнування [11]. Принцип дії приладу ґрунтується на спектроскопії ядер водню, які розсіюються вперед при їх пружній взаємодії з альфа-частинками. Ефективна товщина поверхневого шару, в якому визначається концентрація водню, становить $\sim 5 - 20 \times 10^{-6}\text{ m}$ і залежить від хімічного складу досліджуваного зразка.

Експрес-аналізатор АВ-7801 призначений для визначення вмісту водню в металах [12]. Принцип його дії ґрунтується на відновлювальному плавленні проби у потоці інертного газу та кількісному аналізі продуктів плавлення термокондуктометричним методом.

З метою аналізу концентрації водню в металах сьогодні застосовують давачі водню з характеристиками: діапазон робочих температур $77\text{...}330\text{ K}$, діапазон робочих тисків $1\text{...}5 \cdot 10^5\text{ Pa}$, вимірювана концентрація водню в діапазонах $0,2\text{...}3,1\%$ з точністю $+0,1\%$; $3,1\text{...}20\%$ з точністю $+0,1\%$; $20\text{...}95\%$ з точністю $+0,1\%$ [13].

Вагомий внесок для проблеми визначення концентрації водню, зокрема у металах і сплавах, мають прилади американської фірми "Лесо" – аналізатори RH (RHEN)-600/602, RH-402 [14]. Наприклад, аналізатор RH-402 широко застосовують для експрес-аналізу вмісту водню у чорних металах, сталях, сплавах. Принцип дії аналізатора ґрунтується на високотемпературній екстракції водню у потоці інертного газу у відновлювальному або нейтральному середовищі в індуктивній печі з програмуванням температури до 2800°C . Виділений водень, який переноситься газом-носієм (азотом) через систему очищення для видалення домішок і переміщається у високочутливий детектор теплопровідності. Діапазон вимірюваних концентрацій водню на масу досліджуваного зразка 5 g : $0,001\text{...}400\text{ ppm}$ ($1\text{ ppm} = 1 \times 10^{-4}\%$) [15].

Розроблений і запатентований спосіб та пристрій для визначення водню в металах, який ґрунтується на виділенні водню у газоподібну фазу шляхом впливу випромінювання імпульсного лазера на досліджуваний зразок металу або порівняльний зразок з відомим вмістом водню [16]. Реєстрація водню здійснюється хімічним давачем на основі МДП-структури (метал-діелектрик-напівпровідник), газочутливий елемент якого встановлений у вимірювальній камері пристрою з імпульсним лазером, системою фокусування і наведення променя на досліджуваний зразок металу.

Відомий аналітичний спосіб визначення концентрації водню у феромагнетиках за параметром магнітної післядії за умов наводнення навантаження зразка [17]. Спосіб ґрунтується на вимірюванні часу релаксаційних процесів у феромагнітному матеріалі. Ненаводнений та наводнений зразки намагнічують зовнішнім магнітним полем, вимірюють час залишкової намагніченості кожного зразка та аналітично визначають концентрацію водню, враховуючи характеристики матеріалу, умови наводнення та зовнішні чинники, що впливають на процес наводнення.

Перелічені методи визначення концентрації водню пов'язані із застосуванням вакуумних систем і відповідно вимагають високоточних метрологічних характеристик устаткування. Взагалі метод визначення концентрації водню у феро-

магнітному матеріалі (зразку) за відповідних чинників впливу на експеримент є доволі складним. Наприклад, у літературі [2] наведено схему фізико-хіміко-механічних процесів у системі метал–водень, в основі якої такі етапи: перенесення водню до металу; поверхнева взаємодія і проникнення водню у метал; стан і поведінка водню всередині металу; вплив водню на зародження і розвиток руйнування матеріалу.

Підхід до визначення концентрації водню повинен враховувати такі аспекти:

- фазу водню (протонний газ; атоми водню, впроваджені у ґратку; водень у порах кристалічної структури; утворення метану у порах кристалічної структури; утворення гідридів в металах MeH_x (кобальт (Co), нікель (Ni), залізо (Fe));

- вміст домішок у матеріалі досліджуваного зразка, вплив температури, що впливають на процес вбирання водню (наприклад, чисте залізо має вміст 0,05% домішок);

- методи, засоби, алгоритми оцінювання концентрації водню;

- метрологічне забезпечення процедури оцінювання кількості водню: зразковий наводнений зразок з відомим вмістом водню; засіб оцінювання концентрації водню відповідно до методу з прецизійними метрологічними характеристиками; методику оцінювання концентрації водню.

Оцінювання концентрації водню вимагає відповіді на запитання – концентрацію якого водню ми визначаємо, який механізм взаємодії відповідної фази водню з металом та механізм впливу на процес руйнування феромагнітних матеріалів? Наприклад, метод зважування дає змогу оцінювати параметр руйнування матеріалу – розмір тріщини в утвореній гідридній фазі водню у титані TiH_x за допомогою металографічного агрегатного мікроскопа METAM-P₁ при збільшенні зображення у 250 разів. Але такий приклад окреслює далеко не кожний метод.

Тому постає завдання залучити до дослідження відомі магнітні методи неруйнівного контролю, або розробити нові на основі відповідних фізичних явищ та ефектів, через які можна реалізувати процедуру вимірювання параметрів феромагнітних матеріалів за умов наводнення і навантаження, далі за вимірними параметрами оцінити концентрацію водню і, на цій основі, визначити параметри дефектності структури металу.

Дослідження системи метал–водень з метою оцінювання концентрації водню (ступеню деформації) за параметром магнітної післядії (МП) у феромагнетиках магніторелаксаційним методом передбачає такі аспекти:

- створення методологічних засад дослідження системи метал-водень;

- розроблення і застосування магніторелаксаційного методу для оцінювання концентрації водню за параметром магнітної післядії феромагнітних матеріалів;

- розроблення засобу вимірювання параметру магнітної післядії;

- розроблення методики експериментальних досліджень впливу деформації на параметр магнітної післядії.

Магніторелаксаційний метод оцінювання параметрів магнітної післядії у феромагнітних матеріалах. Особливу роль у теорії і практиці сучасного матеріалознавства відіграють феромагнітні матеріали. Як експлуатаційні об'єкти вони особливі тим, що під впливом зовнішнього магнітного поля змінюють свої магнітні характеристики. [18]. Відповідно актуальними є магнітні методи неруйнівного контролю стану якості матеріалів і конструкцій, серед яких відомі такі: магніто-порошковий, магнітографічний, магнітоферозондовий, індукційний, магнітонапівпровідниковий [19]. З метою відбору інформації одним з магнітних методів використовують процедуру намагнічування феромагнітного зразка, вибирають певний інформаційний параметр (коерцитивну силу, намагніченість, індукцію, магнітну проникність і т. і.), який підлягає реєстрації (вимірюванню) і функ-

ціонально може бути пов'язаний з параметрами дефектності структури металу за відповідних умов експерименту.

Учені виявили, що магнітні властивості матеріалів залежать від часових явищ, таких як дисперсія магнітної проникності, феромагнітний резонанс, магнітна післядія [4]. Магнітна післядія (в'язкість) у феромагнетизмі експериментально виявлена як відставання в часі змін магнітних характеристик (намагніченості, магнітної проникності т. і.) феромагнетиків від змін напруженості зовнішнього магнітного поля.

Особливо явище магнітної післядії виявляється у вигляді дезакомодації магнітної проникності. Експериментально дезакомодацію можна виявити за зміною резонансної частоти коливного LC – контуру внаслідок зменшення (спаду), протягом певного часового інтервалу, магнітної проникності досліджуваного феромагнітного зразка.

Розглянемо далі алгоритм оцінювання параметра магнітної післядії циліндричного феромагнітного зразка за допомогою магніторелаксаційного методу та системи вимірювання значення постійної часу спаду τ і величини магнітної проникності $\mu(t)$ [20, 21]. Для цього скористуємось відомим співвідношенням між резонансною частотою $f(t)$ резонансного контура і його параметрами $L(t), C$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(t)C}}, \quad (1)$$

де $L(t)$ – змінна в часі індуктивність обмотки резонансного контура, а C – ємність конденсатора контура. Значення $L(t)$ визначають, як [22]

$$L(t) = k\mu^* \mu_e(t) N^2 \frac{S}{l}, \quad (2)$$

де $k \sim 1$ є постійною величиною; μ^* – магнітна стала $\left(\mu^* = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Аі}}{\text{і}}\right)$; $\mu_e(t)$ – ефективна магнітна проникність досліджуваного зразка, як функція часу; N – кількість витків в обмотці; S – площа поперечного перерізу соленоїда з обмоткою; l – довжина соленоїда (довжина обмотки в магнітному екрані).

Так

$$f(t) = \frac{\beta}{\sqrt{\mu_e(t)}}, \quad (3)$$

де $\beta = \left[2\pi\sqrt{k\mu^* N^2 \frac{S}{l} C}\right]^{-1}$ – стала величина.

Ефективна магнітна проникність $\mu_e(t)$ досліджуваного циліндричного зразка залежить від власної магнітної проникності $\mu(t)$ матеріалу зразка і постійної магнітної проникності μ_ϕ форми зразка, причому [23, 24]

$$\frac{1}{\mu_e(t)} = \frac{1}{\mu(t)} + \frac{1}{\mu_\phi}. \quad (4)$$

Для циліндричного стрижня на ділянці довжини l обмотки за умови симетричного розміщення обмотки відносно центрального перерізу стрижня (зразка) значення μ_ϕ обчислюють за формулою [25]

$$\mu_\phi = \frac{\pi(l_{\max}^2 - 0,27l^2)}{4S \left(\ln \frac{1,2l_{\max}}{D} - 1\right)}, \quad (5)$$

де l_{\max} – загальна довжина зразка 1; D – діаметр соленоїда; S – площа його поперечного перерізу.

Комбінуючи далі вирази (3) і (4) знайдемо функцію зміни значення магнітної проникності $\mu(t)$ в часі

$$\mu(t) = \frac{\beta^2 \mu_\delta}{\mu_\delta f^2(t) - \beta^2}. \quad (6)$$

Для практичного використання формули (6) візьмемо до уваги, що у відсутності осердя (феромагнітного зразка) $\mu_e = 1$, тому із (3) слідує $f^0 = \beta$, де f^0 – частота коливань контуру у повітрі (без осердя). Тому вираз (6) перетворюється до вигляду

$$\mu(t) = \frac{(f^0)^2 \mu_\delta}{\mu_\delta f^2(t) - (f^0)^2}, \quad (7)$$

де $f(t)$ – значення частоти автоколивань в момент часу t ; f^0 – частота автоколивань у відсутності осердя; μ_δ – магнітна проникність форми досліджуваного об'єкта.

Отже, за допомогою виразу (7) визначають зміну магнітної проникності $\mu(t)$ в часі за експериментальними даними. Однак для практики експериментальних досліджень і виробничих потреб необхідно визначити деяку числову характеристику, яка містить інформацію про характер зміни $\mu(t)$ в часі без кропіткого аналізу кривої перехідного процесу. Для цього було проведено експериментальні дослідження ефекту магнітної післядії і виявлено, що після закінчення зондуючого магнітного імпульсу значення $\mu(t)$ спадає від початкового значення μ_0 до деякого сталого значення μ_∞ , причому функція спаду значень $\mu(t)$ від μ_0 до μ_∞ близька до експоненційної. На цій основі прийнята гіпотеза, що функцію спаду $\mu(t)$ в часі можна записати експоненційною моделлю

$$\mu(t) = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (8)$$

де τ – постійна часу спаду магнітної проникності в часі.

Саме це значення τ було вибрано за числову характеристику спаду в часі магнітної проникності $\mu(t)$. Тоді, підставляючи формулу (8) у (7), отримуємо алгоритм оцінювання значення τ

$$\tau = \frac{t}{\ln \left[\frac{\mu_\delta f_0^2 - (f^0)^2}{\mu_\delta f^2(t) - (f^0)^2} \cdot \frac{f_\infty^2 - f^2(t)}{f_\infty^2} \right]}, \quad (9)$$

де f_0 і f_∞ – значення частоти автоколивань безпосередньо після закінчення зондуючого імпульсу і на нескінченості, відповідно.

Алгоритм (3) дає змогу оцінювати значення τ у довільний момент часу t , але для його практичної реалізації необхідно взяти до уваги такі обставини. По-перше, відліки частоти $f(t)$ реально знімаються після деякого часу її накопичення Δt , а по-друге формула (3) справедлива для довільного відліку частоти. Тому якщо провести усереднення параметра τ за усіма відліками частоти, то отримуємо більш точне значення τ , ніж за одним відліком. Це необхідно, в основному, внаслідок ефекту Баркгаузена, згідно з яким відбувається стохастичний процес оберненого повертання доменів і визначення їх меж стрибкоподібним чином, що може призвести до суттєвих похибок визначення τ за одним відліком частоти $f(i\Delta t)$, де $i=1,2,3,\dots$. Із врахуванням вищезазначеного, практичну реалізацію алгоритму (9) можна записати у вигляді

$$\bar{\tau} = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{i\Delta t}{\ln \left[\frac{\mu_{\delta} f_0^2 - (f^0)^2}{\mu_{\delta} f^2(i\Delta t) - (f^0)^2} \cdot \frac{f_{\infty}^2 - f^2(i\Delta t)}{f_{\infty}^2 - f_0^2} \right]}, \quad (10)$$

де n – кількість відліків частоти; $\bar{\tau}$ – середнє значення постійної часу спаду величини $\mu(t)$, а f_0 і f_{∞} – значення частоти автоколивань на початку і в кінці експерименту, відповідно.

У процесі практичної реалізації алгоритму (10) потрібно також мати на увазі, що внаслідок повільної зміни в часі значень частоти $f(i\Delta t)$, а також її стохастичних стрибкоподібних змін, деякі члени суми з виразу (10) будуть невизначені (логарифм від'ємного числа), тому останні треба вилучити із розгляду, а кількість n відліків частоти в формулі (10) необхідно зменшити на число вилучених членів суми.

Експериментальні дослідження системи метал–водень. Для проведення експериментальних досліджень системи метал–водень на предмет реєстрації магнітної характеристики – параметру магнітної релаксації під впливом зовнішнього змінного магнітного поля. В експерименті використовується змінне магнітне поле тому, що без нього відбувається стабілізація магнітних характеристик матеріалів. Насамперед були виготовлені гладкі циліндричні зразки з трубної сталі 17Г2С, з різьбовими закінченнями діаметром $d = 8$ mm і загальною довжиною $l = 180$ mm. Далі здійснювали наводнення цих зразків у стандартній камері газоподібним воднем при $T = 400^{\circ}\text{C}$ та значеннях надлишкового тиску 4, 8, 14 і 24 atm з наступним швидким охолодженням. Час наводнення одного зразка становив 4 год.

Після попереднього розмагнічування циліндричного зразка, виготовленого із сталі 17Г2С, на нього подається зонduючий імпульс змінного (синусного) магнітного поля, направленогo вздовж осі зразка, з амплітудою такою, що забезпечує магнітну індукцію насичення зразка. Тривалість імпульсу магнітного поля може регулюватись в певних межах (від 20 до 120 s). За час дії зонduючого імпульсу відбувається стабілізація петлі гістерезису, а при амплітудному значенні поля формується однодоменна структура зразка. Тобто вектор його власного магнітного поля збігається з напрямком вектора зонduючого магнітного поля (індукція насичення зразка). Намагнічення зразка до насичення забезпечує незалежність початкових умов магнітної післядії від нестабільності амплітуди і тривалості зонduючого імпульсу, що підвищує ефективність реєстрації ефекту магнітної післядії. Зонduюче магнітне поле вимикається в момент досягнення ним амплітудного значення.

Після закінчення дії зонduючого імпульсу магнітного поля однонаправлена доменна структура частково руйнується внаслідок стохастичних теплових коливань і матеріал зразка згідно з явищем гістерезису переходить із стану насичення у стан із залишковою індукцією з деякою затримкою в часі. Ця затримка характеризується відповідними складовими спаду магнітної проникності (швидкою $\sim 10 \dots 100$ ms і повільною > 100 s), причому їхні абсолютні значення суттєво залежать від температури [18]. Тому порівняння параметрів магнітної післядії для наводнених і ненаводнених зразків потрібно проводити в однакових температурних умовах. Експериментально досліджувалась повільна компонента параметру магнітної післядії. Результати експериментальних досліджень показані на рис. 1, на якому відображена залежність параметра магнітної релаксації від концентрації водню $C_H \tau$ за різних тисків газоподібного водню, а також середнє значення параметру τ , що дорівнює 420 s для зразків без водню, витриманих при температурі $T=400^{\circ}\text{C}$ [26, 27]. Концентрація водню у феромагнітному циліндричному зразку

із сталі 17Г2С визначена за законом Сівертса за умови, що газоподібний водень у металі рівномірно розподілений по всьому об'єму [2].

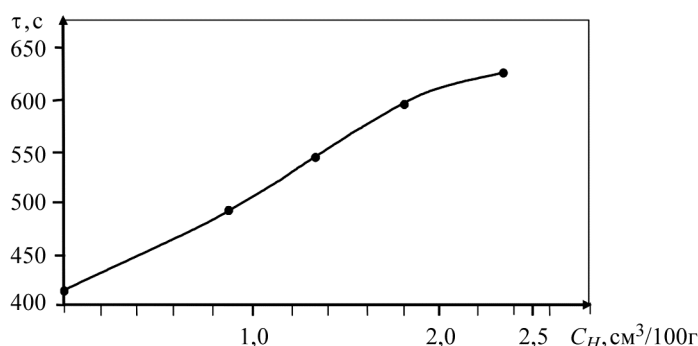


Рис. 1. Залежність параметра магнітної релаксації від концентрації водню у зразку із сталі 17Г2С

Метод реєстрації магнітної післядії (вимірювання значення параметра магнітної релаксації τ) може слугувати індикатором ступеня наводнення зразка, що є основою для аналізу рівнів взаємодії водню з металами, відповідно впливу водню на зародження та протікання руйнівних процесів у них.

Підхід до оцінювання концентрації водню у феромагнітних циліндричних зразках на основі магніторелаксаційного методу. Сьогодні для науково-технічної проблематики матеріалознавства характерний аспект розроблення нових підходів до оцінювання стану якості матеріалів. Серед них системний підхід, який ґрунтується на принципах системного аналізу – цілісності, ієрархічності та багатоаспектності представлення досліджуваної проблеми предметної сфери. З метою забезпечення достовірності процедури оцінювання концентрації водню у феромагнетиках необхідний підхід, який бере до уваги аспекти від фізичної структури об'єкта дослідження, фізичного явища, яке дає змогу здійснювати відбір інформації до умов експерименту, методу і засобу реєстрації (вимірювання) параметрів матеріалу.

Пропонуємо підхід до оцінювання концентрації водню у феромагнетиках на основі фізичного явища магнітної післядії, магніторелаксаційного методу та засобу реєстрації магнітних параметрів за умов наводнення і навантаження зразка (рис. 2). В основі пропонованого підходу є системне представлення проблеми метал–водень на основі принципів системного аналізу. Принцип цілісності (єдності) передбачає інтеграцію (об'єднання) частин цілого і проявляється в появі нових властивостей (ознак, параметрів, характеристик, фізичних величин) цілого, які відсутні у його частинах. Принцип цілісності відображає зовнішнє бачення проблеми метал-водень і дозволяє взяти до уваги такі основні елементи підходу щодо оцінювання концентрації водню у феромагнітних матеріалах на основі фізичного явища магнітної післядії:

- об'єкт дослідження (1) – феромагнітний зразок визначеного типу матеріалу і визначеної геометричної форми (в даному випадку – циліндр);
- вплив зовнішніх чинників на досліджуваний зразок (2, 3, 4) газоподібного водню, навантаження (розтягу), магнітного поля визначеної частоти;
- методи і засоби відбору інформації (вимірювання) про зміну параметрів матеріалу через явище магнітної післядії (5);
- умови експерименту (6) – стабільність температури довкілля, відсутність електромагнітних випромінювань електронних технологій, які працюють у визначеному радіочастотному діапазоні; метод, засіб і метрологічне забезпечення вимірювання параметра магнітної післядії.

Принцип ієрархічності – надає можливість точно виділити істотні характеристики і взаємозв'язки складного об'єкта, що забезпечує докладний опис його властивостей внаслідок використання апріорних знань про внутрішню будову об'єкта. Принцип ієрархічності у пропонованому підході ґрунтується на фізичному явищі магнітної післядії, методи і засоби вимірювання параметра магнітної релаксації, внаслідок взаємодії феромагнетика з зовнішніми чинниками впливу – зовнішнім змінним магнітним полем, газоподібним воднем, навантаженням, метрологічному забезпеченні вимірювання параметра τ .

Принцип багатоаспектності дає змогу розглядати об'єкт дослідження з різних точок зору з урахуванням взаємозв'язків виявлених особливостей, ґрунтується на розділенні об'єкта на підсистеми, що дозволяє його спрощений опис. Багатоаспектність представляє проблему метал-водень на рівні взаємозв'язку об'єкта дослідження – феромагнетика і підсистем – зовнішнього змінного магнітного поля, наводнення (водню), навантаження. Наприклад, підсистема водню ґрунтується на моделі атома і молекули водню, умовах наводнення зразка, фази водню. У структурі пропонованого підходу (рис.2) використані позначення:

---► вплив водню (2), змінного магнітного поля (4) на циліндричний феромагнітний зразок;

◄◄► – вплив розтягу (3);

► – зв'язок елементів підходу;

=== – фізичне явище магнітної післядії (5) у феромагнетику (1) за умов експерименту і впливу зовнішніх факторів на нього.

У роботі [28] представлена математична модель магнітної післядії у наводненому феромагнетику, яка є основою для експериментального визначення параметра магнітної релаксації. З метою точного відбору інформації від об'єкта дослідження використовується математична модель магнітної післядії, в якій відображені параметри, пов'язані з вимірюваним (оцінюваним) параметром (фізичною величиною).

Для оцінювання концентрації водню у феромагнетиках на основі фізичного явища магнітної післядії експериментально реєструється сигнал, де закладений параметр магнітної релаксації τ , зміна якого характеризує концентрацію водню C_H у досліджуваному матеріалі. Для експериментальних досліджень розроблено систему реєстрації магнітної післядії та методику оцінювання параметра магнітної релаксації, за умов наводнення або навантаження циліндричних зразків феромагнітного матеріалу [29, 30]. Час спаду магнітної проникності у матеріалі залежить від ступеня його наводнення. Отже, знаючи величину часу спаду магнітної проникності, яка є певною характеристикою кількості розчиненого водню у матеріалі, можна визначити середню концентрацію водню для відповідної системи метал-водень.

Запропонований підхід до оцінювання концентрації водню ґрунтується на: системних принципах, явищі магнітної післядії, магніторелаксаційному методі та системі реєстрації параметра магнітної релаксації. Він може бути використаний для неруйнівного контролю феромагнітних матеріалів (циліндричних зразків) за умов їх наводнення або механічного навантаження, з метою прогнозування залишкового ресурсу елементів конструкцій, які працюють у контакті з водневмісним середовищем.

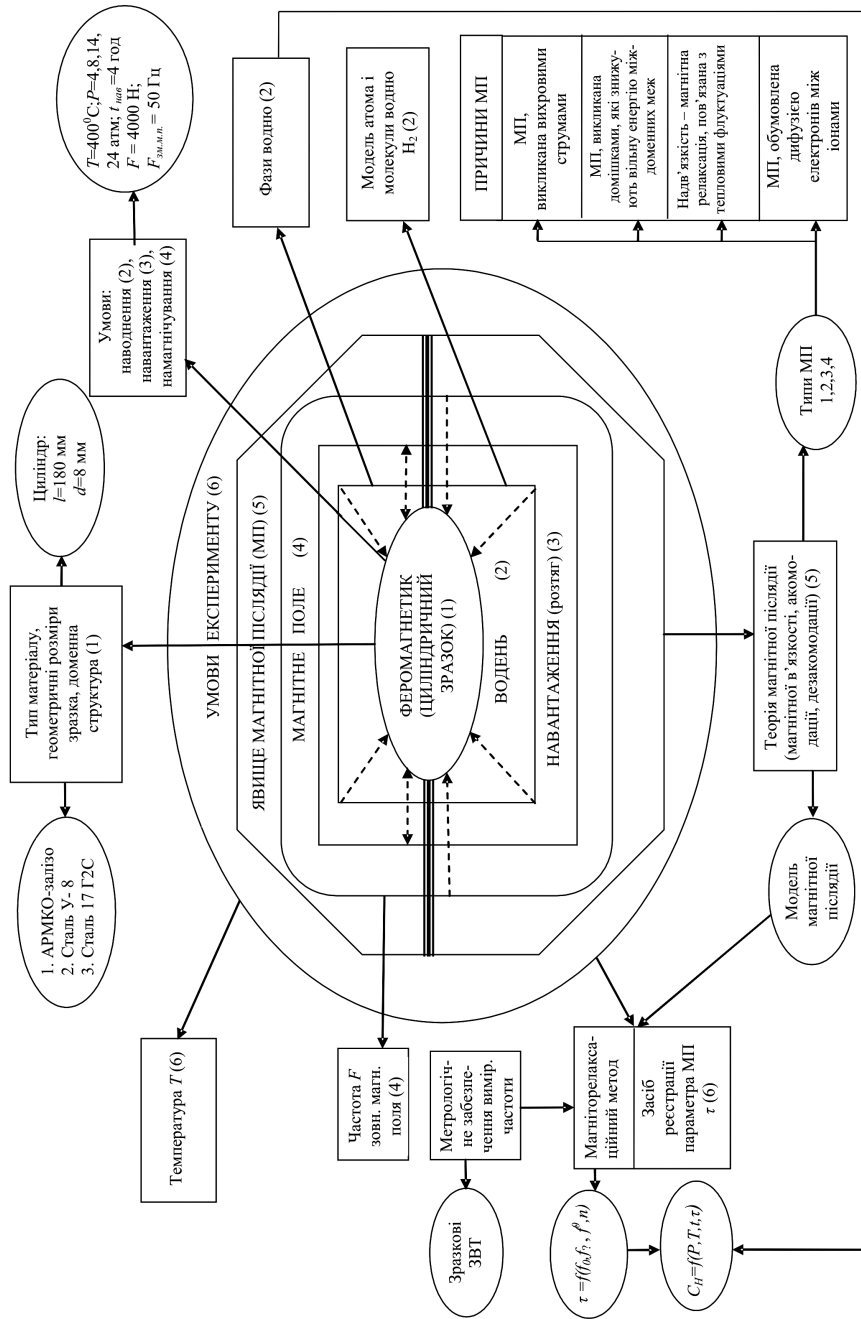


Рис. 2. Підхід до оцінювання концентрації водню у циліндричному феромагнітному зразку на основі магніторелаксаційного методу

1. *Карпенко Г. В.* Вплив водню на механічні властивості сталі. – К: Вид-во Академії наук української РСР, 1960. – 70 с.
2. *Панасюк В. В.* Механіка квазіхрупкого розрушення матеріалів. – К: Наук. думка, 1991. – 416 с.
3. *Похмурський В. І., Федоров В. В.* Вплив водню на дифузійні процеси в металах. – Львів: Еней, 1998. – 208 с.
4. *Вонсовский С. В.* Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферро-магнетиков. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.
5. *Тикадзуми С.* Физика ферромагнетизма, Магнитные характеристики и практические применения. – М.: Мир, 1987. – 419 с.
6. *Швачко В. И.* Анализ и исследование водорода в сталях массспектральным методом // Физико-химическая механика материалов. – 1988. – № 4. – С. 85–99
7. *Смирнов Л. И.* Теплоемкость водородной подсистемы в системах металл-водород // Металлофизика и новейшие технологии. – 2006. – Т. 28, № 3. – С. 295–302.
8. *Школа А. А.* Вплив температурно-механічних напружень на сорбцію водню в титані (початковий етап насичування воднем) // Металлофизика и новейшие технологии. – 2006. – Т. 28, № 6. – С. 837–846.
9. *Швед М. М.* Изменение эксплуатационных свойств железа и стали под влиянием водорода. – К.: Наукова думка, 1985. – 120 с.
10. *Вайнман А. Б., Мелехов Р. К., Смиян О. Д.* Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления. – К: Наук. думка, 1990. – 272 с.
11. <http://iki.cosmos.ru/innov/rus/isiv3.htm>
12. <http://www.inms.ru/av7801.php>
13. <http://www.hydrogen.ru/ifsseht2000/projects/1580censor.html>
14. <http://www.leco.ru/index.php?pname=branch&id=1>
15. http://lab17.imet-db.ru/index.asp?m0=inv&m1=inv_h
16. *Патент* на изобретение RU (11) 2282182 (13) C1, G01N 27/ 12. Способ определения водорода в металлах и устройство для его реализации / Н. П. Глухов, А. К. Калитеевский, С. Д. Лазарев, В. И. Филиппов, А. Н. Шубин, С. С. Якимов. – Опубл. 20.08.2006.
17. *Деклараційний патент* на винахід № 71821A UA, G 01N17/00.Спосіб визначення концентрації водню в маловуглецевих сталях за параметрами магнітної післядії / О. Є. Андрейків, Я. Л. Іваницький, В. Ф. Чекурін, О. В. Гембара. – Опубл. 15.12.2004. – Бюл. № 12.
18. *Мишин Д.Д.* Магнитные материалы. – М.: Высш. шк., 1981. – 335 с.
19. *Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник* / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др.; Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 448 с.
20. *Прилад* для оцінювання магнітної післядії феромагнітних матеріалів / Я. Л. Іваницький, О. П. Бухало, Г. В. Микитин та ін. // Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів. – Львів: ФМІ НАНУ, 2007. – С. 53–58.
21. *Метод* магнітної релаксації для неруйнівного контролю феромагнітних матеріалів / Я. Л. Іваницький, О. П. Бухало, Г. В. Микитин та ін. // Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів. – Львів: ФМІ НАНУ, 2008. – С. 35–39.
22. *Кузьмичев В. Е.* Законы и формулы физики. – К.: Наук. думка, 1989. – 864 с.
23. *Преображенский А. А.* Магнитные материалы и элементы. – М.: Высш. шк., 1976. – 336 с.
24. *Унгерман М. Н.* Технические средства океанологического обеспечения промысла. – М.: Пищевая промышленность, 1981. – 272 с.
25. *Афанасьев Ю. В.* Феррозонды. – Л.: Энергия, 1969. – 165 с.
26. *Іваницький Я., Бухало О., Гвоздюк М.* Оцінка концентрації водню в деформівному матеріалі магніторелаксаційним методом // Машинознавство. – 2007. – 122, № 8. – С. 29–31.
27. *Іваницький Я. Л., Бухало О. П., Микитин Г. В., Гвоздюк М. М., Дмитрів З. В.* Дослідження системи метал-водень магніторелаксаційним методом // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: В 2 т. / Спецвип. журналу “Фізико-хімічна механіка матеріалів”. – № 7. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2008. – Т. 1. – С. 87–91.
28. *Андрейків О. Є., Чекурін В. Ф., Гембара О. В.* Математична модель магнетної післядії в наводнених феромагнетиках // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – № 4. – С. 61–67.
29. *Експериментальна установка та методика досліджень впливу деформацій на параметр магнітної післядії* / Я. Л. Іваницький, О. П. Бухало, Г. В. Микитин та ін. // Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів. – Львів: ФМІ НАНУ, 2008. – С. 40–44.
30. *Система* реєстрації магнітної післядії феромагнітних матеріалів / Я. Л. Іваницький, О. П. Бухало, Г. В. Микитин, З. В. Дмитрів, М. М. Гвоздюк // Відбір і обробка інформації. – 2008. – № 29 (105). – С. 50–55.