

РОЗВИТОК ПІДХОДІВ ДО ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ БЕЗПЕКИ ТЕХНОГЕННИХ ОБ'ЄКТІВ У СЕГМЕНТІ ВОДНЕВОЇ ДЕГРАДАЦІЇ

Проаналізовано стан проблеми "метал – водень" у контексті розвитку та застосування методів і засобів для визначення концентрації водню і, на цій основі, оцінювання ступеню водневої деградації, як фактору небезпеки надзвичайних техногенних ситуацій. Розроблено системний підхід до визначення об'ємної концентрації водню у феромагнетиках на основі взаємодії систем "метал – водень" та "об'єкт – інформаційна технологія (ІТ)" методом магнітної післядії (МП) за умов намагнічування, наводнення (навантаження) зразка та на рівні перетворення: магнітна проникність – частота автоколивань – параметр МП – концентрація водню (закон Сівертса).

Ключові слова: техногенний об'єкт, безпека, воднева деградація, надзвичайна ситуація, системний підхід, системи "метал – водень" та "об'єкт – ІТ", метод магнітної післядії, концентрація водню.

Вступ

Постановка проблеми. Технічний прогрес суспільства пов'язаний з рівнями техногенної, природної та екологічної безпеки і потребує системної координації та інтегрованого управління. В рамках Національної парадигми сталого розвитку України розроблено концептуальні засади забезпечення умов гарантування безпечного функціонування структури "економіка – екологія – соціум", зокрема у частині завдань щодо технічного переоснащення систем атомних і теплових електростанцій та газотранспортної галузі на основі впровадження новітніх наукових досліджень [1]. Концепція розвитку НАН України на 2014 – 2023 рр. спрямована на підвищення рівня фундаментальних і прикладних досліджень на основі системного аналізу у найбільш пріоритетних напрямках, зокрема тих, що мають комплексний міждисциплінарний вектор [2]. У контексті застосування системних підходів щодо подолання техногенних загроз у промисловій інфраструктурі України важливим є розроблення методів оцінки технічного стану та визначення залишкового ресурсу об'єктів тривалої експлуатації, які б синтезували наприклад, інформатику, механіку, фізико-технічні проблеми матеріалознавства та фізико-технічні проблеми енергетики. З метою запобігання надзвичайних ситуацій та управління ними у глобальному природно-техногенному середовищі актуальним є міжнародне науково-технічне співробітництво України в межах Рамкової програми "Горизонт – 2020", зокрема у сегменті міждисциплінарних досліджень питань безпеки, ефективної та екологічно чисто енергетики [3].

Рівень безпеки об'єктів енергетики, які працюють робочих агресивних середовищах, зокрема у водні, обумовлюється міцністю матеріалів і конструкцій. У контексті актуальних проблем техногенної і природної безпеки та способів їх вирішення важливим є розроб-

лення системного підходу, спрямованого на визначення концентрації водню у металах і, на цій основі – оцінювання ступеню водневої деградації обладнання енергетичної інфраструктури, нафтогазопроводів, прогнозування терміну безпечної експлуатації, зменшення ризику надзвичайних ситуацій техногенного характеру [4]. Системний підхід до оцінювання об'ємної концентрації водню у феромагнетиках дозволить: досліджувати зміну магнітних властивостей металів методом магнітної післядії у структурі "метал – водень – МП – ІТ" за дії експлуатаційних факторів, реєструвати негативний вплив кількості розчиненого водню, що знижує пластичні властивості металів та призводить до їх деградації; зменшити ризик виникнення відмов та аварій в енергетичних та нафтогазопровідних системах; приймати оперативне управлінське рішення щодо технічного переоснащення об'єктів, впровадження технологій поверхневого зміцнення металовиробів та виготовлення металів і сплавів з покращеним комплексом властивостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження задач у контексті вирішення проблеми деградації металів в агресивних середовищах, зокрема у водні, сьогодні проводяться: міжнародними науковими товариствами з водневої енергетики та водневого матеріалознавства [5]; Європейським товариством з цілісності конструкцій (ESIS); Українським товариством з механіки руйнування матеріалів; провідними науковими школами та лабораторіями України, спрямованими на дослідження впливу водню на фізико-механічні властивості металів та визначення вмісту водню; оцінку міцності і процесу руйнування труб під тиском суміші водню та природного газу [6, 7, 8, 9].

Стан проблеми "метал – водень": воднева деградація об'єктів. Взаємодія водню з металами висвітлюється в багатьох аналітичних оглядах та фундаментальних монографіях [10, 11, 12]. Процес розчинності водню в металі впливає на інформаційно-енерге-

тичний стан матриці самого матеріалу, відповідно на фізико-механічні властивості сталей, сплавів, що, у свою чергу, призводить до водневої деградації конструкційних матеріалів та накладає відбиток на характеристики міцності і довговічності матеріалів, знижує ресурс безпечної експлуатації промислових об'єктів.

Дослідження процесів руйнування конструкційних матеріалів, зокрема елементів енергетичного обладнання має свої особливості. Довготривала експлуатація колекторів пароперегрівачів в умовах високих температур і тиску викликає структурно-фазові зміни металу, що викликає деградацію матеріалу. Після тривалої високотемпературної деградації матеріалів у наводнених середовищах досліджені зміни механічних властивостей, структури та механізмів руйнування металу зварних з'єднань низьколегованих теплостійких сталей 15X1M1Ф і 15X2MФА відповідно паропроводів теплової електростанції та корпусу реактора гідрокрекінгу нафти [13]. Основною причиною деградації металів є водневе окрихчування локальних ділянок труб парових котлів. Встановлено, що бездеформаційне руйнування паротвірних труб котлів високого тиску із феритно-перлітних сталей зумовлене дією водню, абсорбованого металом труб з боку теплоносія [14].

Проведені експериментальні дослідження впливу водню високого тиску на напружено-деформований стан конструкційних матеріалів – статичну і циклічну тріщиностійкість в діапазоні температур від 293 К до 673 К за дії механічного навантаження [15].

Актуальними є дослідження аспектів міцності матеріалів для транспортування водню у контексті розвитку та реалізації процесів водневої енергетики [16].

Проблема взаємодії водню (водневмісних середовищ) з металами охоплює наукові аспекти:

- обґрунтування оптимальних критеріїв оцінювання робоздатності конструкційних матеріалів у середовищі водню та розроблення ефективних методів і засобів визначення концентрації водню у металах;

- створення матеріалів з поліпшеними функціональними властивостями, які б забезпечували стійкість до впливу водню в умовах експлуатації об'єктів промислової інфраструктури.

У контексті прогнозування ресурсу та забезпечення безпечної експлуатації обладнання енергетики і нафтогазових труб актуальною є задача дослідження комплексного впливу системи факторів на структуру і фізико-механічні властивості металів і сплавів, серед яких – тиск водню, температура, механічне навантаження та інші, особливо за умови їх підвищених значень, що обумовлює певний ризик аварій на техногенних об'єктах.

Водень і термін експлуатації обладнання. Присутній в металі водень впливає на експлуатаційні характеристики конструкційних матеріалів і призводить до розвитку в них дефектів – утворення флокенів (вид тріщин) та водневого окрихчування. В монографіях [8, 17] висвітлені експериментальні дослідження впливу концентрації водню на механічні властивості металів,

зокрема проаналізовані питання розчинності водню в конструкційних сталях.

Водневе окрихчування – зниження пластичних властивостей металу, яке спостерігається за визначених умов і присутності водню у сталі. При певній концентрації водню спостерігається зникнення межі плинності, а для високоміцних сталей зниження межі міцності. Негативний вплив водню на властивості металів проявляється при його вмісті більше 1-2 см³/100 г. З подальшим підвищенням вмісту концентрації водню пластичність та опір металу руйнуванню пропорційно знижується, а при 5-10 см³/г пластичність металу стає мінімальною. Із зростанням концентрації водню в металі змінюється характер його руйнування від в'язкого до крихкого. Водневе окрихчування спостерігається у температурному діапазоні від – 374 К до + 379 К та зменшується з підвищенням швидкості деформації металу. З метою оцінювання властивостей сталей до водневого окрихчування використовують механічні випробування зразків за: одновісного розтягу, ударної в'язкості, в'язкості руйнування на втомну міцність т. і.

Внутрішні дефекти (флокени) сталі виникають за рахунок внутрішніх напружень, пов'язаних з деформацією та охолодженням металу внаслідок присутності водню. Якщо вміст водню у металі є меншим за встановлену межу для відповідної марки сталі, то відповідно зменшується ймовірність утворення флокенів. У цьому відношенні необхідними є дослідження розчинності водню в конструкційних сталях змінюється із зміною тиску водню у газовій фазі в широкому діапазоні [17].

Сьогодні актуальним питанням є термін безпечної експлуатації магістральних нафтогазопроводів. У цьому напрямі в роботі [18] проведено дослідження впливу водню на сталі, як індикатора інтенсивності розсіяної пошкодженості трубопроводів, що обумовлює водневу деградацію механічних і корозійно-механічних властивостей.

Методи і засоби визначення концентрації водню в металах. Проблема задачі визначення концентрації водню в металах залишається сьогодні актуальною і має як свої особливості, так і певні труднощі. Водень має властивості високої дифузійної рухомості у твердому металі за підвищених температур, що вимагає проведення процедури загартування відібраних проб металів для реєстрації у них розчинного водню до проведення аналізу. Джерелом похибок при визначенні вмісту водню в металі є втрати при кристалізації проби, коли відбувається стрибкоподібна зміна його розчинності. Методи відбору проб для визначення вмісту водню в сталі розрізняють, як відкриті і закриті. При відкритому методі метал заливають у мідний кокіль і відбирають пробу у кварцову трубку, охолоджують її з максимально можливою швидкістю, уникаючи тим самим виділення водню. Зразок зберігають за низьких температур. Цей метод обумовлює похибки систематичного характеру, пов'язані з поглинанням та видаленням водню при загартуванні проби у воді. При закритому методі здійсню-

ється відбір, виділеного у процесі кристалізації, водню у спеціальну металеву або кварцову ампулу. Цей метод не дає втрат водню при кристалізації проби та його поглиннанні у процесі загартування і є ефективним за низької концентрації водню в металі.

Методи. Процеси взаємодії водню з металами експериментально досліджуються методами: ядерно-фізичного і атомного аналізу, месбауерівської спектроскопії, ядерного магнітного резонансу, нейтронографії, акустичної емісії та іншими [19, 20]. Для визначення вмісту водню у металах використовуються методи: вакуум-нагріву, вакуум-плавлення зразків, швидкого плавлення в потоці газу-носія, зважування, газової хроматографії/ мас-спектрометрії (ГОСТ 22720.1-77, ГОСТ 23338-91, ГОСТ 21132.1-98, ГОСТ 24956-81).

Перевагами методу вакуум-нагріву є відсутність взаємодії з матеріалом тигля та виділення при нагріванні тільки водню, а недоліком вважається неповне виділення водню. Перевагами методу з використанням газу-носія є відсутність вакууму та низькі втрати водню.

Метод газової хроматографії/ мас-спектрометрії дає змогу екстрагувати водень із зразка досліджуваного матеріалу за умови високотемпературного нагріву у вакуумі за допомогою газових хроматографів та мас-спектрометрів [10, 21]. Кінетичну концентрацію водню визначають методом зважування за допомогою точних аналітичних ваг, наприклад ВЛ-210 (компанія "Labtech").

Спосіб визначення концентрації водню у маловуглецевих сталях за параметрами МП полягає у вимірюванні часу релаксаційних процесів у матеріалі: не-наводнений та наводнений зразки намагнічують зовнішнім магнітним полем, вимірюють час залишкової намагніченості кожного зразка і визначають концентрацію водню [22]. Метод вимірювання локальної концентрації залишкового водню у металі зруйнованих паротвірних труб теплоенергетичного обладнання розроблений ученими Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона [10]. З метою встановлення закономірностей розподілу залишкового водню у пошкоджених трубах використовувалась установка ЭХО-4М з лазерним зондом: в зонах руйнування кількох десятків труб концентрація водню зареєстрована в діапазоні $200 \sim 100 \cdot 10^{-6}$; залишковий водень локалізується у вузьких ділянках руйнування; у деяких випадках підвищена концентрація водню визначена біля зовнішньої поверхні об'єкта. Експериментально досліджений вплив температурно-механічних напружень на процес вбирання водню титаном за температури до 800 К і тиску водню $0,5 - 0,6 \cdot 10^6$ Па [23].

Засоби. Сьогодні у галузі промислової безпеки техногенних об'єктів ефективно функціонують ІТ відбору даних про вміст водню у металах, серед яких системи моніторингу концентрації водню та аналізатори водню, виробниками яких є: "Научно-производственный комплекс Электронные и пучковые технологии" ("НПК ЭПТ"), научно-производственное объединение "ЭКРАН" (Росія), міжнародна корпорація "Leco" (США), компанія "ABB" (Швейцарія), компанія

"Heraeus" (Німеччина). Експрес-аналізатори АВ-1 ("НПК ЭПТ") призначені для вимірювання кількості водню, виділеного із твердого зразка металу вагою 0,003 – 3 г при його нагріванні до температури наближеної до точки плавлення (метод вакуум-нагріву) або при плавленні зразка у вакуумі (метод вакуум-плавлення). Експрес-аналізатор МЕТАВАК-В ("ЭКРАН") використовується для визначення вмісту водню в металах і сплавах на основі методу відновлювального плавлення в потоці газу-носія і комірки електропровідності, як детектора.

Аналізатори водню компанії "Leco" (США): RH (RHEN)-602 призначений для експрес-аналізу вмісту водню в чорних, кольорових металах, сталях і сплавах; DH 603 – для точного аналізу залишкового, дифузійно-рухомого та загального вмісту водню у металах і феросплавах. Принцип дії приладу для вимірювання вмісту водню і його важких ізотопів у поверхневому шарі твердого зразка (без його руйнування) 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 $\sim 5 - 20 \cdot 10^{-6}$ м та залежить від хімічного складу досліджуваного зразка. Для визначення концентрації водню використовують давачі з характеристиками – діапазон робочих температур 77 – 330 К, діапазон робочих тисків $1 - 5 \cdot 10^5$ Па, вимірювана концентрація водню відповідно у діапазонах: 0,2 – 3,1% з точністю $\pm 0,1\%$; 3,1 – 20% з точністю $\pm 0,1\%$; 20 – 95% з точністю $\pm 0,1\%$ [24]. Розроблено і запатентовано пристрій для визначення концентрації дифузійно-рухливого водню в металі [25].

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. 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 [26].

Сучасним ефективним засобом визначення вмісту водню у рідких сталях безпосередньо на металургійних агрегатах є система Hydris (компанія "Heraeus Electro-Nite"). Дистанційне визначення водню цією системою передбачає використання різних типів зондів і ґрунтується на вимірюванні парціального тиску водню в газовій фазі рівноважній з рідким металом. Система Гідріс здійснює автоматичне визначення концентрації водню в рідкій сталі на основі закону Сівертса.

Проблема визначення концентрації водню в металах з метою оцінювання їх міцності та довговічності надалі залишається актуальною у контексті створення нових ІТ відбору даних про вміст водню в конструкційних матеріалах за впливу комплексу факторів. Розглянуті методи визначення концентрації водню у ме-

талах мають свої переваги і недоліки, зокрема, що стосується застосування вакуумних систем, а також метрологічних характеристик давачів, пристроїв, приладів, автоматизованих систем моніторингу. Взагалі проблемна задача визначення концентрації водню в металах є доволі складною, оскільки схема фізико-хіміко-механічних процесів у системі “метал – водень” охоплює: перенесення водню до металу; поверхневу взаємодію і проникнення водню у метал; поведінку водню всередині металу; вплив водню на зародження і розвиток руйнування матеріалу.

З метою ефективного визначення концентрації водню в металах необхідно враховувати такі аспекти:

- фазу водню; вміст домішок у матеріалі зразка, вплив температури на процес вбирання водню;

- методи створення ІТ відбору і обробки даних про магнітні властивості металів і, на цій основі, визначення концентрації водню та оцінювання ступеню деградації матеріалів з врахуванням високоінформативних фізичних явищ і ефектів та комплексу факторів впливу;

- метрологічне забезпечення в ІТ, які використовуються для визначення концентрації водню у металах.

Мета роботи. Для оцінювання ступеню водневої деградації металів за впливу комплексу факторів “водень – температура – механічне навантаження” і прийняття управлінського рішення щодо безпечної експлуатації техногенних об’єктів необхідно створити системний підхід до визначення концентрації газоподібного водню на основі взаємодії систем “метал – водень” і “об’єкт – ІТ” методом магнітної післядії.

Системний підхід до оцінювання об’ємної концентрації водню у феромагнетиках на основі фізичного явища магнітної післядії

Магнітна післядія у феромагнетиках. Особливу роль у теорії і практиці сучасного матеріалознавства відіграють магнітні матеріали, які за своїми властивостями діляться на діамантики, парамагантики і феромагантики. Магнітні властивості матеріалів залежать від часових явищ таких, як дисперсія магнітної проникності, феромагнітний резонанс, магнітна післядія. Для феромагнетиків магнітна проникність приймає значення $m \gg 1$ і залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля, а її зміна обумовлюється впливом температури, деформації, концентрації водню т.ін. У процесі дослідження властивостей феромагнітних матеріалів, зокрема зміни магнітної проникності, за дії імпульсних магнітних полів був виявлений ефект магнітної післядії. Магнітна післядія (в’язкість) – це відставання в часі змін магнітних характеристик (намагніченості, магнітної проникності та інших) феромагнетиків від змін напруженості зовнішнього магнітного поля. Явище магнітної післядії обумовлене вмістом домішок, наприклад вуглецю, кремнію, які перешкоджають зміщенню границь доменів, їх повертання за дії зовнішнього магнітного поля. Магнітна післядія

характеризується сталою часу спаду магнітної проникності. Це проявляється у вигляді акомодатії (зростання у часі) і дезакомодатії (спаду у часі) магнітної проникності відповідно після включення та виключення зовнішнього магнітного поля.

Загальну теорію МП, яка враховує часову зміну намагніченості та часовий спад магнітної проникності, запропонували учені-фізики Я. Снук і Л. Неель та розвивали учені: С. В. Вонсовський, С. Тікадзумі, М. Юінг, Дж. У. Релей, В.К. Аркадьєв, Б.А. Введенський, Р.В. Телеснін [27, 28, 29].

Сьогодні відомі такі стандартизовані методи вимірювання магнітних параметрів: методи визначення залишкової індукції, коерцитивної сили, магнітної індукції, напруженості магнітного поля в точках кривої намагнічування зразків матеріалів (ГОСТ 12119.0-98, ДСТУ 2816-94), метод вимірювання питомих магнітних втрат та діючого значення напруженості поля (ГОСТ 12119.4-98), метод вимірювання амплітуд магнітної індукції (ГОСТ 12119.5-98), метод визначення відносної магнітної проникності та магнітних втрат мостом змінного струму (ГОСТ 12119.6-98). Серед методів оцінювання параметрів магнітної післядії: індукційний метод, метод Давільковського, метод визначення часу релаксації за допомогою оберненого перетворення Фур’є, метод вібраційного магнетометра [30]. Дослідження МП розвивалися у напрямках: встановлення залежності магнітної проникності від частоти (К. Хаген, Г. Рубенс, В.К. Аркадьєв); встановлення залежності магнітної проникності від доменної структури феромагнетика (В.К. Аркадьєв, Л.Д. Ландау, Б.Г. Ліфшиц, Ю. Нікітіна); температурної залежності магнітної проникності в часі (Е. Ріхтер, А.В. Чжан); встановлення залежності магнітної проникності від наводнення зразка та механічного навантаження (О.Є. Андрейків, В.Ф. Чекурін, О.В. Гембара, О.П. Бухало, Я.Л. Іваницький, Г.В. Микитин).

Серед ІТ відбору і обробки даних, пов’язаних з магнітними характеристиками феромагнетиків: прилади Інституту прикладної фізики НАН Білорусі; методи, засоби і методики магнітного неруйнівного контролю (НК) матеріалів, що розроблені науковими школами Києва, Харкова, Львова; прилади підприємств-розробників, які входять до Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики.

Структура підходу до оцінювання концентрації водню в металах. Як розвиток методологій вирішення проблеми роботоздатності об’єктів у контексті оцінювання ступеню деградації металів, які працюють з водневмісним середовищем, необхідний новий підхід до визначення концентрації водню, який ґрунтується на принципах системного аналізу – цілісності, ієрархічності та структуризації. Підхід до оцінювання концентрації водню у феромагнетиках ґрунтується на взаємодії систем “метал – водень” та “об’єкт – ІТ” на рівні явища МП і дає підстави для дослідження зміни магнітних властивостей металів за умов намагнічування, наводнення (навантаження) магніторелаксационним методом (рис. 1) [31].

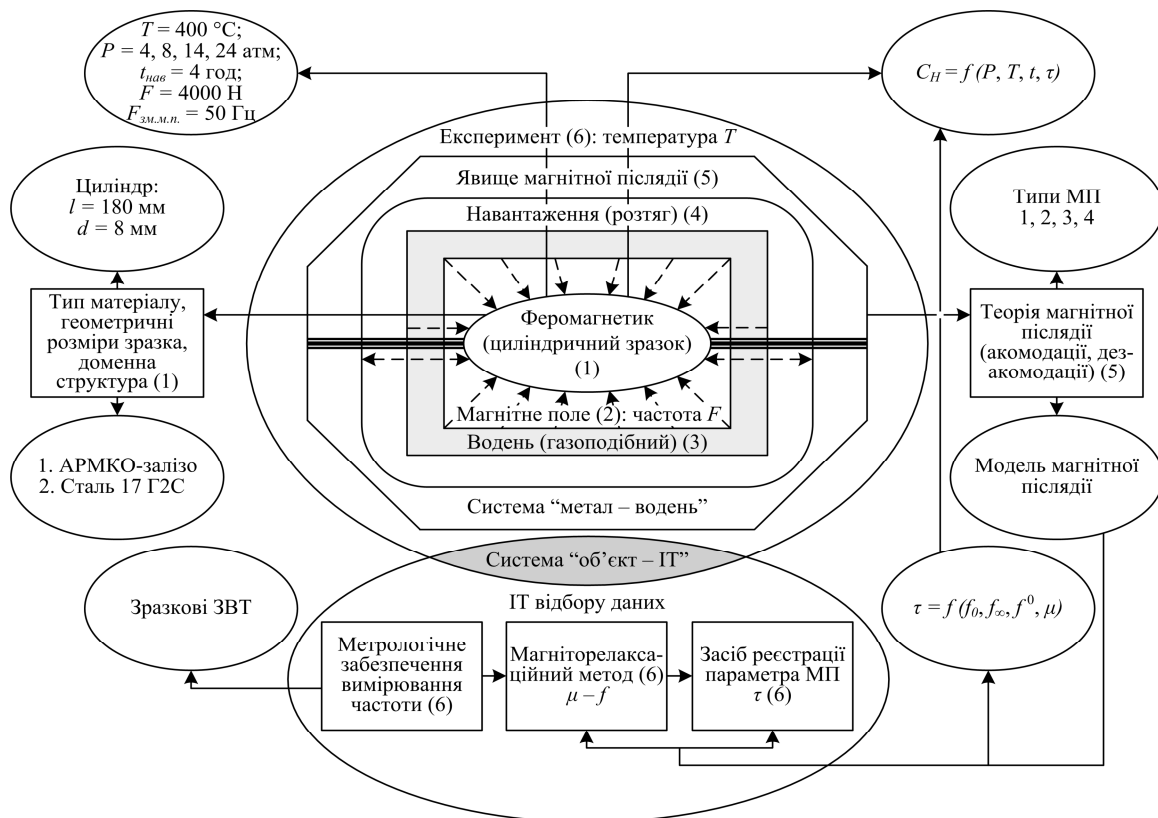


Рис. 1. Структура підходу до визначення концентрації газоподібного водню у металі: $-\rightarrow$ – вплив водню (3), змінного магнітного поля (2) на зразок; $\leftarrow\rightarrow$ – вплив розтягу (4); \longrightarrow – зв’язок елементів підходу; \equiv – фізичне явище МП (5) у феромагнетика (1) за умов експерименту (6)

Принцип цілісності відображає взаємодію систем "метал – водень" та "об'єкт – ІТ" на рівні їх основних елементів, які функціонально спрямовані на встановлення оптимальних критеріїв визначення концентрації водню у феромагнітних матеріалах і, на цій основі, оцінювання ступеню деградації металів:

■ об'єкт дослідження (1) – феромагнітний зразок визначеного типу матеріалу і визначеної геометричної форми (в даному випадку – циліндричний);

■ вплив зовнішніх чинників на досліджуваний зразок: змінного магнітного поля визначеної частоти (2); газоподібного водню (3), механічного навантаження (за розтягу) (4);

■ методи та засоби відбору і обробки інформації (вимірювання) про зміну магнітних властивостей і параметрів матеріалу на основі явища МП (5);

■ умови експерименту (6) – стабільність температури навколишнього середовища, відсутність електромагнітних випромінювань електронних технологій, які працюють у визначеному радіочастотному діапазоні; ІТ відбору даних від феромагнетика (метод, засіб реєстрації параметра МП та метрологічне забезпечення).

Ієрархічність у підході до визначення об'ємної концентрації водню відображає рівні взаємодії: дезакомодатії – характеристики магнітної післядії, методу і засобу реєстрації параметра МП, методики виконання вимірювання частоти, пов'язаної з параметром МП τ , що забезпечує достовірну інформацію про технічний стан об'єктів, які контактують з водневмісним середовищем.

Принцип структуризації дає підстави для розгляду проблеми дослідження з різних точок зору з урахуванням взаємозв'язків виявлених особливостей і ґрунтується на розділенні системи "метал – водень" на підсистеми: магнітна проникність μ – частота f ; параметр магнітної післядії τ (стала часу спаду $\mu(t)$) – об'ємна концентрація водню в металі C_H ; параметр магнітної післядії τ – деформація матеріалу ϵ за дії зовнішнього змінного магнітного поля, водню, механічного навантаження на циліндричний зразок, що комплексно обумовлює критерії оцінювання роботоздатності об'єкта у середовищі водню та прогнозування ресурсу його безпечної експлуатації. Системний підхід до оцінювання концентрації водню передбачає:

■ вибір критеріїв ефективного відбору даних про зміну магнітних властивостей металів: типу МП, фази водню, умов механічних випробувань зразків феромагнітних матеріалів за дії комплексу зовнішніх факторів (температури і часу наводнення, тиску водню, параметрів магнітного змінного поля, механічного навантаження);

■ обґрунтування магніторелаксаційного методу відбору даних від феромагнетика у структурі "метал – водень – ІТ – метрологічне забезпечення" для визначення концентрації водню у металі на основі: фізичного принципу дослідження МП, явища та ефекту магнітної післядії;

■ створення методики вимірювання частоти автоколивань LC-контурі засобу реєстрації, яка пов'язана з параметром МП, що дає підстави для ви-

значення об'ємної концентрації розчиненого у металі водню на основі закону Сівертса.

Метод оцінювання концентрації водню на основі магнітної післядії у феромагнетиках. Феромагнітні матеріали особливі тим, що за впливу зовнішнього магнітного поля змінюють свої магнітні характеристики і це обумовлює зміну експлуатаційних параметрів об'єктів, зокрема тих, які контактують з агресивним середовищем водню. Магнітні методи НК технічного стану матеріалів та елементів конструкцій є актуальними у цьому контексті і серед них відомі такі: магнітно-порошковий, магнітно-графічний, магнітно-ферозондовий, індукційний, магнітно-напівпровідниковий [32]. Для магнітних методів НК характерна процедура намагнічування зразка, вибір інформативних параметрів (коерцитивної сили, намагніченості, індукції, магнітної проникності та інших), які підлягають відбору (вимірюванню) та оцінюванню, оскільки функціонально пов'язані з механічними властивостями феромагнітних матеріалів за відповідних умов експерименту.

Магнітні властивості матеріалів залежать від часових явищ, зокрема явища магнітної післядії. Метод оцінювання зміни магнітної проникності феромагнітного матеріалу в часі i , на цій основі, визначення концентрації водню у металі за законом Сівертса ґрунтується на: фізичному принципі, явищі та ефекті магнітної післядії. Фізичний принцип дослідження магнітної післядії: після попереднього розмагнічування досліджуваного зразка, виготовленого з феромагнітного матеріалу, на нього подається зондувальний імпульс змінного (синусоїдного) магнітного поля, направлено вздовж осі зразка, з амплітудою такою, що забезпечує магнітну індукцію насичення зразка. Тривалість імпульсу магнітного поля знаходиться в діапазоні значень від 20 до 120 с. Під час дії зондувального імпульсу відбувається стабілізація петлі гістерезису, а при амплітудному значенні поля зразок перетворюється в односпрямовану доменну структуру, тобто вектор його власного магнітного моменту співпадає з напрямком вектора зондувального магнітного поля (індукція насичення зразка). Намагнічування зразка до насичення забезпечує незалежність початкових умов МП від нестабільності амплітуди і тривалості зондувального імпульсу та підвищує ефективність реєстрації ефекту магнітної післядії. Зондувальне магнітне поле виключається в момент досягнення ним амплітудного значення.

Після закінчення дії зондувального імпульсу магнітного поля односпрямована доменна структура частково руйнується за рахунок стохастичних теплових коливань і зразок згідно явища гістерезису переходить із стану насичення у стан із залишковою індукцією з деякою постійною часу. Цей час залежить від кількості перешкод для повороту доменів у рівноважний стан. Домішки в матеріалі досліджуваного феромагнітного зразка та дислокації в ділянці пластичної деформації є внутрішніми факторами, які формують ці перешкоди. Проникнення водню у кристалічну структуру ферома-

гнетика є зовнішнім фактором, який сповільнює процес повороту доменів і зміщення їх границь. Внутрішні та зовнішні фактори впливають на збільшення сталої часу магнітної післядії. Визначення сталої часу МП є підставою для оцінювання ступеню наводнення і навантаження феромагнітного зразка і, на цій основі, оцінювання ступеню деградації матеріалів.

Явище магнітної післядії: під час включення / виключення зовнішнього магнітного поля – встановлення рівноважного значення $\mu(t)$ матеріалу відбувається із запізненням з деякою сталою часу τ (дезакомодація). Експериментально досліджується повільна компонента магнітної післядії ($\tau > 100$ с), оскільки процедура вимірювання характеристик швидкої компоненти сигналу ($\tau \sim 10-100$ мс) є ускладненою фактором впливу температури середовища. Явище МП експериментально виявляється за зміною резонансної частоти коливного LC-контурі автоматизованого засобу реєстрації внаслідок дезакомодації магнітної проникності феромагнітного зразка протягом певного часового інтервалу. Фізичний ефект МП: якщо досліджуваний циліндричний зразок є осердям коливального контуру засобу реєстрації, то резонансна частота f коливань у контурі буде пов'язана з його параметрами:

$$L(f) \rightarrow \left[f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \right] \rightarrow f_0 + \Delta f,$$

де L – індуктивність котушки, осердям якої є досліджуваний зразок; C – ємність конденсатора контуру; f_0 – значення частоти автоколивань на початку експериментальних досліджень; $\Delta f(\mu)$ – зміна частоти автоколивань від магнітної проникності зразка матеріалу при його зондуванні зовнішнім змінним магнітним полем. Оскільки значення індуктивності L є пропорційним магнітній проникності μ осердя, то частота приймає значення $f \sim \mu^{-0,5}$. Таким чином, зміна величини $\mu(t)$ з часом буде викликати зміну в часі частоти автоколивань, яка реєструється частотоміром. Особливістю магніторелаксаційного методу є реєстрація значення магнітної проникності феромагнітного зразка

$$\mu(t) = \frac{dB(t)}{dH},$$

де $B(t)$ – магнітна індукція, H – напруженість зовнішнього магнітного поля у точці перетину граничної петлі гістерезису з віссю ординат B при $H = 0$.

Вимірювання частоти автоколивань LC-контурі засобу реєстрації даних феромагнетика дає змогу встановити зміну магнітної проникності матеріалу за дії комплексу факторів впливу: намагнічування, наводнення, навантаження, умов експерименту. 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 металі, можна визначити середню концентрацію водню за законом Сівертса:

$$C_H = K(T)\sqrt{P},$$

де $K(T)$ – коефіцієнт розчинності водню ($\text{см}^3/100 \text{ г}$), зокрема для сталі 17Г2С $K(T)=1,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$; P – тиск газоподібного водню (МПа).

Засіб реєстрації параметра МП на основі зондування феромагнітного зразка змінним магнітним полем та перетворення “магнітна проникність – частота ($\mu - f$)” дає змогу визначати сталу часу τ спаду магнітної проникності та оцінювати концентрацію розчиненого газоподібного водню C_H у матеріалі, а також за необхідності оцінювати величину деформації ϵ при відповідному навантаженні зразка. Вимірювання повільної компоненти магнітної післядії τ у феромагнітному зразку обумовлюється параметрами: значенням частоти автоколивань LC-контур на початку f_0 і в кінці експерименту f_∞ , значенням частоти автоколивань за відсутності осердя f^0 , магнітної проникності циліндричного зразка феромагнітного матеріалу μ [33]. Метрологічне забезпечення для ІТ відбору і обробки даних про зміну магнітних властивостей матеріалу на основі реєстрації параметра МП у феромагнітному зразку охоплює взаємозв’язані елементи:

- об’єкт дослідження – інформативні параметри – ІТ відбору і обробки даних: феромагнетик – магнітна проникність, частота – магніторелаксаційний метод та засіб реєстрації параметра магнітної післядії;

- методику виконання вимірювань частоти автоколивань, пов’язаної з параметром магнітної післядії.

Точність вимірювання параметра МП обумовлена: основною похибкою прямих вимірювань частоти автоколивань δ_{f_x} ; методичною похибкою алгоритму оцінювання параметра магнітної післядії δ_τ [34]. Магніторелаксаційний метод є ефективним на етапах інформаційної технології: виявлення наводнення феромагнетика, визначення об’ємної концентрації водню у металі, оцінювання ступеню деградації, прийняття рішення на управління безпечною експлуатацією об’єкта у контексті запобігання надзвичайних ситуацій.

Висновок

Функціональність запропонованого підходу є актуальною для науки і виробництва у сфері промислової безпеки України, оскільки він може використовуватись у контексті НК матеріалів на основі ІТ відбору даних з метою оцінювання ступеню водневої деградації металів та прогнозування ресурсу безпечної експлуатації об’єктів теплової і атомної енергетики, нафтогазопроводів і, на цій основі, прийняття управлінського рішення щодо запобігання надзвичайних техногенних ситуацій.

Список літератури

1. Національна парадигма сталого розвитку України / за заг. ред. академіка НАН України, д.т.н., проф., засл.

діяча науки і техніки України Б.Є. Патона . – К.: Державна установа “Інститут економіки природокористування та сталого розвитку НАН України”, 2012. – 72 с.

2. Концепція розвитку НАН України на 2014–2023 роки // Вісник Національної академії наук України. – 2014. – № 1. – С. 11–51. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: http://nbuv.gov.ua/jpdf/vnapi_2014_1_4.pdf.

3. Назустріч новій Рамковій програмі європейського науково-технічного співробітництва “Горизонт – 2020” / Л.І. Чернишев, І.І. Білан, М.Я. Гороховатська, О.В. Кот // Вісник Національної академії наук України. – 2012. – № 11. – С. 47–52. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vnapi_2012_11_6.pdf.

4. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2013 році. – К.: Український науково-дослідний інститут цивільного захисту Державної служби України з надзвичайних ситуацій. – 2013. – 542 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.mns.gov.ua>.

5. Гольцова Л.Ф. Мировое водородное движение: научные сообщества по водородной энергетике и водородному материаловедению – исторические и современные аспекты / Л.Ф. Гольцова // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – № 01 (141). – С. 198–211.

6. Цільова комплексна програма НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин”: зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2010 – 2012 роках. – К.: ІЕЗ ім. О.Є. Патона НАН України, 2012. – 612 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://patonpublishinghouse.com>.

7. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідник. посіб. / В.І. Похмурський, Є.І. Крижанівський, В.М. Івасів та ін.; за ред. В.І. Похмурського, Є.І. Крижанівського. – Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України; Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2006. – Т. 10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання. – 1193 с.

8. Андрейків О.Є. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах / О.Є. Андрейків, О.В. Гембара. – К.: Наук. думка, 2008. – 345 с.

9. Крижанівський Є.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: науково-технічний посібник: у 3 т. / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин. – Івано-Франківськ, 2011. – Т. 1: Основи оцінювання деградації трубопроводів. – 455 с.

10. Вайнман А.Б. Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления / А.Б. Вайнман, Р.К. Мелехов, О.Д. Смилян. – К.: Наук. думка, 1992. – 272 с.

11. Мелехов Р.К. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання / Р.К. Мелехов, В.І. Похмурський. – К.: Наукова думка, 2003. – 384 с.

12. Крижанівський Є.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: наук. техн. посіб. у 3 т. / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин; за ред. В.В. Панасюка. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ; Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2011. – Т. 2: Деградація нафтопроводів і резервуарів та її запобігання. – 447 с.

13. Іваницький Я.Л. Особливості руйнувань пружно-пластичних тіл з тріщинами за тривалістю навантаження та дії водню / Я.Л. Іваницький, О.В. Гембара, Рональд Ван Дайк // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2009. – № 2. – С. 102–110.

14. Особливості деформації сталей у водні / В.І. Ткачов, В.І. Вітвицький, М.П. Бережницька, Л.М. Іваськевич // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2008. – № 4. – С. 84–88.

15. Вплив водню на тріщиностійкість сталі 10X15H27T3B2MP / О.І. Галицький, Л.М. Іваськевич,

В.М. Мочульський, О.М. Голіян // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2009. – № 2. – С. 102-110.

16. Скороход В.В. Фундаментальні проблеми водневої енергетики / В.В. Скороход. – К.: Національна академія наук України, 2010. – 495 с.

17. Арчаков Ю.И. Водородная коррозия стали / Ю.И. Арчаков. – М.: Металлургия, 1985. – 217 с.

18. Крижанівський Є.І. Розсіяна пошкодженість і деградація властивостей сталей нафтових та газових трубопроводів / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин // Вісник ТНТУ. – 2011. – Спецвипуск; частина 1. – С. 30-36.

19. Швачко В. И. Анализ и исследование водорода в сталях массспектральным методом / В.И. Швачко // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1998. – № 4. – С. 85-99.

20. Черданцев Ю.П. Методы исследования системы металл-водород: учебное пособие / Ю.П. Черданцев, И.П. Чернов, Ю.И. Тюрин. – Томск: ТПУ, 2008. – 286 с.

21. Швед М.М. Изменение эксплуатационных свойств железа и стали под влиянием водорода / М.М. Швед. – К.: Наукова думка, 1985. – 120 с.

22. 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.

23. Школа А.А. Вплив температурно-механічних напружень на сорбцію водню в титані (початковий етап насичування воднем) / А.А. Школа // Металлофізика і новітні технології. – 2006. – Т. 28, № 6. – С. 837-846.

24. Международный научно-информационный портал “Водород” Характеристики датчиков водорода. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.hydrogen.ru/ifsseht2000/projects/1580sensor.html>.

25. Деклараційний патент на винахід №49665A UA, G01N27/416. Пристрій для визначення кількості дифузійно-рухливого водню в металі / М.Д. Сахненко, С.Г. Желавський, М.В. Ведь; заявник і патентотримач Національний технічний університет “ХПІ”. – №2002020993; заявл. 07.02.2002; опубл. 16.09.2002. – Бюл. № 9.

26. 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; заявитель и патентообладатель Российский научный центр “Курчатовский институт”. – № 2005106475/28; заявл. 11.03.2005; опубл. 20.08.2006.

27. Вонсовский С.В. Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферримагнетиков / С.В. Вонсовский. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.

28. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма, Магнитные характеристики и практические применения / С. Тикадзуми. – М.: Мир, 1987. – 419 с.

29. Аркадьев В.К. Электромагнитные процессы в металлах [в 3 Ч.] / В.К. Аркадьев – М.-Л.: Главная редакция энергетической литературы, 1936. – Ч. 1. – 231 с.

30. Дослідження системи метал-водень магніторелаксаційним методом / Я.Л. Іваницький, О.П. Бухало, Г.В. Микитин, М.М. Гвоздюк, З.В. Дмитрів // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: в 2 т. / Т. 1: Спецвипуск журналу «Фізико-хімічна механіка матеріалів». – Львів: ФХММ, 2008. – С. 87-91.

31. Система реєстрації параметрів магнітної післядії ферромагнітних матеріалів / Я.Л. Іваницький, О.П. Бухало, Г.В. Микитин, М.М. Гвоздюк, З.В. Дмитрів // Відбір і обробка інформації. – 2008. – № 29 (105). – С. 50-55.

32. Неразрушающий контроль: справочник в 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004–2006. – 5977 с.

33. Експериментальний зразок приладу для оцінювання концентрації водню в металі на основі магніторелаксаційного методу / Я.Л. Іваницький, О.П. Бухало, Г.В. Микитин, З.В. Дмитрів, М.М. Гвоздюк // Цільова комплексна програма НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин”: зб. наук. статей за рез., отриманими в 2007–2009 роках. – К.: ІЕЗ ім. О.Є. Патона НАН України, 2009. – С. 98-102.

34. Методика визначення метрологічних характеристик засобу вимірювальної техніки для оцінювання параметру магнітної післядії ферромагнітних матеріалів / Г.В. Микитин, О.П. Бухало, З.В. Дмитрів, Б.П. Клим, Є.П. Почапський // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – 2006. – С. 164-170.

Надійшла до редколегії 19.09.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.І. Адаменко, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків.

РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В СЕГМЕНТЕ ВОДОРОДНОЙ ДЕГРАДАЦИИ

Г.В. Микитин

Проанализировано состояние проблемы “металл – водород” в контексте развития и применения методов и средств определения концентрации водорода и, на этом основании, оценки степени водородной деградации, как фактора опасности чрезвычайных техногенных ситуаций. Разработан системный подход к определению концентрации водорода в ферромагнетиках на базе взаимодействия систем “металл – водород” и “объект – информационная технология (ИТ)” методом магнитного последствия (МП) при условии намагничивания, наводнения (нагрузки) образца и на уровне преобразования: магнитная проницаемость – параметр МП – концентрация водорода (закон Сиверта).

Ключевые слова: техногенный объект, безопасность, водородная деградация, чрезвычайная ситуация, системный подход, система “металл – водород”, система “объект – ИТ”, метод магнитного последствия, концентрация водорода.

A PROGRESS OF APPROACHES FOR A SOLUTION OF MAN-MADE OBJECTS SECURITY PROBLEM IN THE HYDROGEN DEGRADATION SEGMENT

G.V. Mykytyn

A state of the problem “metal – hydrogen” was analyzed in a context of progress and application of methods and means for hydrogen concentration determination and, on this base, for hydrogen degradation appraisalment as the factor of emergency man-made situations danger. The system approach for a volumetric hydrogen concentration determination in ferromagnetics was developed on a base of the system “metal – hydrogen” and the system “object – information technology (IT)” interaction with the magnetic aftereffect (MA) method in conditions of sample magnetizing, hydrogen giving (loading) and on transformation level: magnetic permeability – auto-vibrations frequency – MA parameter – hydrogen concentration (Sieverts' law).

Keywords: man-made object, security, hydrogen degradation, emergency situation, system approach, system “metal – hydrogen”, system “object – IT, magnetic aftereffect method, hydrogen concentration.