

Корисна модель належить до неруйнівних методів визначення концентрації водню в металах конструкцій і може бути використана зокрема для контролю вмісту водню у феромагнітних сталях, у металургії та машинобудуванні, а також для моніторингу наводнювання сталевих конструкцій під час їх експлуатації в енергетичній, хімічній та нафтогазовій промисловості. Оскільки водень істотно впливає на надійність металевих конструкцій, удосконалення методів його визначення є критично важливим.

Відомий спосіб визначення концентрації водню в сталях, який полягає у виділенні водню з нагрітого металу у вакуумі, коли водень переходить у газову фазу [1]. У цьому способі кількість екстрагованого водню, що накопичується у вакуумній камері, вимірюють, а концентрацію водню в металі визначають розрахунковим шляхом з урахуванням об'єму досліджуваного зразка.

Недоліком відомого способу є неможливість його застосування для контролю концентрації водню в металах конструкцій без руйнування зразка. Крім цього, для його реалізації потрібні високоякісні вакуумні камери, що значно ускладнює та здорожчує практичне використання способу.

Відомі також електрохімічні способи визначення концентрації водню, які полягають у розчиненні зразка у спеціальному електроліті, коли розчинений водень виділяється і вимірюється за допомогою мас-спектрометра [1].

Недоліком відомого способу є неможливість його застосування для контролю концентрації водню в металах конструкцій без їх руйнування, оскільки він передбачає повне розчинення досліджуваного зразка. Крім цього, для реалізації цього способу необхідний індивідуальний підбір режимів електролізу для кожної марки сталі, що ускладнює його практичне використання.

Відомий також спосіб визначення концентрації водню в сталі залізничних коліс шляхом вирізання циліндричних проб за допомогою спеціального порожнистого свердла [2]. Концентрацію водню в циліндричних пробах відомого об'єму визначали за допомогою газоаналізатора типу LECO RH-420, при цьому аналіз здійснювався автоматично під керуванням мікропроцесора приладу. Для збереження початкової концентрації водню вирізання проб проводили на низькій швидкості, щоб мінімізувати їх нагрів. Додатково відібрані проби зберігали у рідкому азоті.

Недоліком відомого способу є неможливість його реалізації без часткового руйнування виробів, які використовують як зразки-свідки, після чого їх подальша експлуатація є неможливою. Оскільки здійснення 100 % контролю всієї партії виробів таким способом є недоцільним і практично неможливим, спосіб можна застосовувати лише для накопичення статистичних даних щодо якості партії з метою вдосконалення технології виробництва.

Відомий спосіб визначення концентрації водню в маловуглецевих сталях за параметрами магнітної післядії, який полягає у вимірюванні часу релаксаційних процесів у матеріалі. Спосіб передбачає намагнічування вихідного та наводненого зразків зовнішнім магнітним полем, після чого вимірюють час залишкової намагніченості кожного зразка та визначають концентрацію водню за формулою, наведеною у [3].

Недоліком відомого способу є складність його практичної реалізації, оскільки для виконання розрахунків за наведеною формулою необхідно мати низку матеріалознавчих характеристик, які зазвичай є невідомими. Зокрема це характеристики, що описують вплив деформації на магнітну післядію, зміни деформації ґратки зі зміною концентрації водню, а також модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона та інші параметри. Крім цього, спосіб може бути застосований лише до маловуглецевих сталей. Точність визначення концентрації водню істотно залежить від адекватності теоретичної моделі, покладеної в основу формули розрахунку, а відповідне метрологічне забезпечення, включаючи стандартні зразки та міри для калібрування приладів, наразі не розвинене.

Відомий спосіб визначення концентрації водню в металах, заснований на визначенні роботи виходу електрона методом контактної різниці потенціалів (метод Кельвіна) з використанням залежності роботи виходу від концентрації водню [4, 5]. Для реалізації способу на поверхню досліджуваного зразка встановлюють сканувальний зонд Кельвіна, за допомогою якого визначають контактну різницю потенціалів між досліджуваним металом і електродом зонда. Ця величина відповідає різниці роботи виходу електрона досліджуваного металу та металу зонда. Оскільки робота виходу електрона матеріалу зонда є відомою, за виміряною контактною різницею потенціалів визначають роботу виходу електрона досліджуваного металу.

Недоліком відомого способу є залежність вимірювань роботи виходу електрона від параметрів робочого середовища, що зумовлює необхідність проведення вимірювань у вакуумі. Крім цього, значення роботи виходу суттєво залежить від якості очищення поверхні досліджуваного металу. Однак головним недоліком є неможливість виконання вимірювань роботи виходу електрона через наявність шару покриття на поверхні виробу, що робить спосіб непридатним для контролю більшості реальних конструкцій.

Найближчим аналогом до заявленої корисної моделі є спосіб визначення концентрації водню в металах, який ґрунтується на вимірюванні термоелектричної характеристики досліджуваного матеріалу з використанням залежності цієї характеристики від концентрації водню [6]. Для реалізації способу на поверхню досліджуваного зразка встановлюють термоелектричний зонд із стабільного

металу, за допомогою нагрівального елемента створюють різницю температур між досліджуваним матеріалом і матеріалом термоелектричного зонда та вимірюють термоелектричну характеристику. Зокрема визначають коефіцієнт Зеебека як відношення наведеної термоелектричної напруги до різниці температур.

Недоліком відомого способу є необхідність забезпечення безпосереднього контакту з поверхнею металу, а також залежність показів від якості очищення цієї поверхні. На точність вимірювань істотно впливають зовнішня температура та вологість оточуючого середовища. Крім цього, спосіб не дозволяє проводити вимірювання крізь шар захисних покриттів без їх попереднього видалення, що обмежує можливість його практичного застосування.

В основу корисної моделі поставлена задача забезпечення можливості безконтактного визначення концентрації водню в металах виробів і конструкцій, у тому числі в реальних умовах їх експлуатації.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі визначення концентрації водню в металах конструкцій, при якому визначають фізичну характеристику металу конструкції, яка корелює з концентрацією водню в металі, і за визначеним значенням фізичної характеристики оцінюють концентрацію водню в металі конструкції, згідно з корисною моделлю, як фізичну характеристику металу конструкції, що корелює з концентрацією водню в металі, використовують параметри петлі магнітного гістерезису металу, які визначають за допомогою приставного магнітного перетворювача, при цьому попередньо визначають кореляційну залежність між вибраним параметром петлі магнітного гістерезису і концентрацією водню для застосованого типу магнітного перетворювача з використанням зразків, матеріал і обробка яких відповідає металу контрольованої конструкції.

Як параметр петлі магнітного гістерезису вибирають коерцитивну силу металу конструкції.

Як параметр петлі магнітного гістерезису вибирають залишкову індукцію металу конструкції.

Параметри петлі магнітного гістерезису в металі конструкцій і зразках визначають за допомогою приставного магнітного перетворювача, оснащеного електромагнітом із П-подібним або С-подібним магнітопроводом, який полюсами встановлюють на поверхню контрольованої конструкції, утворюючи з локальною ділянкою конструкції або зразка замкнуте магнітне коло.

Концентрацію водню в зразках здійснюють методом гарячої екстракції водню в потоці інертного газу та визначення маси водню за теплопровідністю.

На фіг. 1 подано електромагніт із П-подібним осердям 1 приставного магнітного перетворювача з двома обмотками перемагнічування 2, який встановлено на поверхню контрольованої конструкції 3.

На фіг. 2 подано типову кореляційну залежність між концентрацією водню та коерцитивною силою для вуглецевої сталі.

Розглянемо приклад реалізації запропонованого способу для визначення концентрації водню в конструкціях із вуглецевої сталі шляхом безконтактного вимірювання коерцитивної сили H_c , яка є одним із параметрів петлі магнітного гістерезису. Для цього використовують приставний магнітний перетворювач, електромагніт якого має П-подібне осердя 1 з двома симетричними обмотками перемагнічування 2 (фіг. 1).

Для визначення коерцитивної сили магнітний перетворювач встановлюють торцями на поверхню контрольованої конструкції або зразка, утворюючи разом із матеріалом замкнуте магнітне коло. Відомо, що коерцитивна сила відповідає значенню напруженості зовнішнього магнітного поля, яке необхідно прикласти до феромагнітного матеріалу, попередньо намагніченого до стану технічного насичення, для його розмагнічування.

Способи визначення коерцитивної сили та інших параметрів петлі магнітного гістерезису за допомогою приставних магнітних перетворювачів описано, зокрема у розробках [7, 8].

Для реалізації заявленої корисної моделі необхідно попередньо встановити кореляційну залежність між концентрацією водню в металі C_H та коерцитивною силою H_c для металу контрольованої конструкції. З цією метою виготовили набір зразків із феромагнітної вуглецевої сталі, марка сталі та термічні й механічні режими обробки яких повністю відповідають металу контрольованої конструкції.

Підготовлені зразки наводнювали до різних концентрацій водню електрохімічним методом у водному розчині NS_4 . Після цього вимірювали коерцитивну силу зразків за допомогою магнітного аналізатора типу МА-5 (виробник - ТОВ "Спеціальні наукові розробки", м. Харків) з приставним магнітним перетворювачем, який накладали на поверхню кожного зразка [8].

Для точнішого визначення коерцитивної сили використовують відомі операції градування за допомогою стандартних зразків або мір коерцитивної сили, які, у свою чергу, атестують, наприклад, за допомогою балістичної установки (див. наприклад, [9]).

Концентрацію водню в зразках визначали методом гарячої екстракції водню в потоці інертного газу за допомогою аналізатора типу LECO DH603 [10]. За результатами вимірювань побудовано кореляційну залежність між концентрацією водню в металі C_H та коерцитивною силою H_c (фіг. 2), яку надалі використовували для визначення концентрації водню на основі виміряної коерцитивної сили.

Аналогічно можна побудувати кореляційні залежності й для інших параметрів петлі магнітного гістерезису, зокрема для залишкової намагніченості.

Для визначення концентрації водню на поверхню металевої конструкції накладають приставний магнітний перетворювач і вимірюють коерцитивну силу H_c . Далі, використовуючи попередньо отриману кореляційну залежність, визначають концентрацію водню в локальній зоні конструкції. За потреби, переміщуючи магнітний перетворювач у інші ділянки конструкції, можна отримати розподіл концентрації водню по її поверхні, у тому числі в умовах реальної експлуатації.

Проведені експерименти підтвердили ефективність запропонованого способу визначення концентрації водню в металах конструкцій, за якого концентрацію водню оцінюють на основі вимірних значень коерцитивної сили з використанням попередньо встановленої кореляційної залежності (фіг. 2). Для сталевих конструкцій, що перебувають в експлуатації, отримані значення концентрації водню дають змогу прогнозувати швидкість процесів водневої деградації металу, зумовленої проникненням та накопиченням водню у його структурі, а також оцінювати довговічність конструкцій [5].

Запропонований спосіб забезпечує можливість безконтактного визначення концентрації водню в металах виробів і конструкцій, у тому числі, в умовах їх експлуатації. Спосіб може бути реалізований без видалення захисних діелектричних покриттів товщиною до 2-3 мм. Це дозволяє запобігти втраті службових властивостей металу, що може призвести до раптового руйнування конструкції, особливо під дією навантаження.

ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ:

1. Вайнман А.Б., Мелехов Р.К., Смиян О.Д. Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления. - К.: Наукова думка, 1990. - 272 с.

2. Костенко А.А., Раздобреев В.Г., Перков О.Н., Степина Ю.А. Разработка методики определения количества остаточного водорода в твердом металле при производстве железнодорожных колес. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. тр. - Днепропетровск: ИЧМ НАН Украины, 2005. - Вып. 11. - С. 215-222.

3. Спосіб визначення концентрації водню в маловуглецевих сталях за параметрами магнітної післядії: пат. 71821 Україна, МПК G01N 17/00 / Андрейків А.Є., Іваницький Я.Л., Чекурін В.Ф., Гембара О.В. Опубл. 15.12.2004, Бюл. № 12.

4. Evers S., Senoz C, Rohwerder M. Hydrogen detection in metals: a review and introduction of a Kelvin probe approach. Science and Technology of Advanced Materials. 2013. Vol. 14(1). 014201. DOI: 10.1088/1468-6996/14/1/014201.

5. Burgstaller W., Schimo G., Hassel A. W. Challenges in hydrogen quantification using Kelvin probe technique at different levels of relative humidity. Journal of Solid State Electrochemistry. 2017. - Vol. 21. P. - 1785-1796. DOI: 10.1007/s10008-017-3541-3.

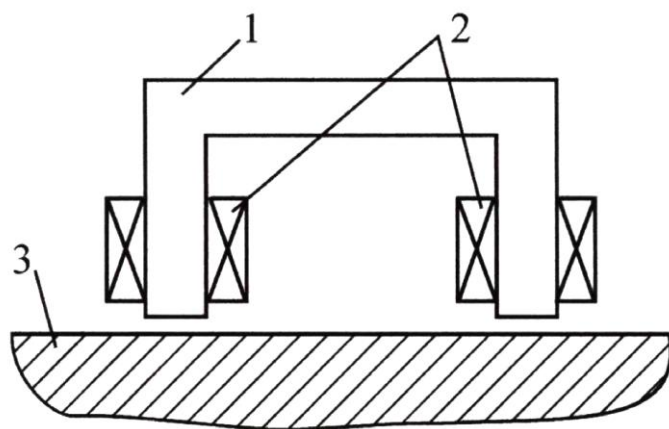
6. Sajdak M, Tobola J., Parashchuk T., Krzywiecki M., Powroznik P., Wojciechowski K. Probing hydrogen content in steel using the thermoelectric effect. Chemical Engineering Journal. - 2024. - Vol. 485. Art. no. 149735. DOI: 10.1016/j.cej.2024.149735.

7. Остап О., Вольдмаров О., Учанін В., Безлюдько Г. Діагностика напружено- деформованого стану та накопичення пошкоджуваності в елементах сталевих конструкцій магнітним методом. Механіка руйнування і міцність конструкцій. - Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ, 2004. - С 749-753.

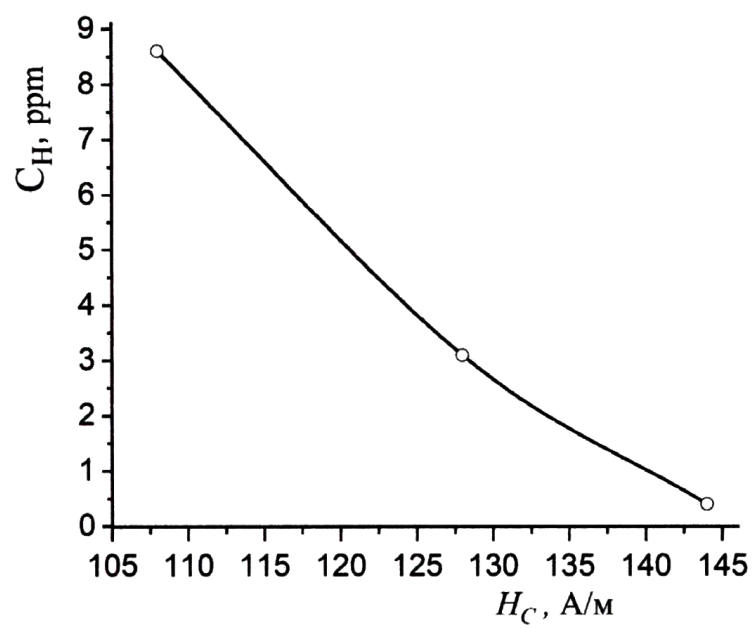
8. Uchanin V., Ostash O., Nardoni G., Solomakha R. Coercive Force Measurements for Structural Health Monitoring. In: The Fundamentals of Structural Integrity and Failure I ed. Richard M. Wilcox. New York: Nova Science Publishers, 2020. - P. 163-192.

9. Міра коерцитивної сили для метрологічного забезпечення коерцитиметрів з приставними давачами: пат. 129707 Україна / Учанін В.М., Рибачук В.Г., Мінаков С.М., Соломаха Р. Заявл. 08.02.2022; Опубл. 09.07.2025, Бюл. № 32.

10. Аналізатор концентрації водню в металах типу LECO DH603. LECO Corporation. URL: <http://www.ukrleco.com/elemental-analyzers-inorganic/index.html>



Фиг. 1



Фиг. 2