УДК 620.178.3

В.Андрієвський[1], канд. фіз.-мат.наук; О.Обухівський[2], канд. техн. наук, П.Пшоняк[2]

[1] *Тернопільський державний педагогічний університет імені В.Гнатюка*

[2] *Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ РОСТУ ТРІЩИНИ У ГАЗОВОДНЕВОМУ СЕРЕДОВИЩІ ПРИ ТРИВАЛОМУ СТАТИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Розглянуто методику дослідження кінетики росту тріщини у газоводневому середовищі з використанням силової схеми навантаження квадратного зразка жорстким клином, що забезпечує стабілізацію коефіцієнта інтенсивності напруженнь у певному інтервалі довжин тріщин. Для контролю росту тріщини запропоновано вихорострумовий перетворювач, описано його принцип роботи і конструктивну схему.

Умовні позначення

a – ширина зразка;

K_1 – коефіцієнт інтенсивності напруження;

K_{1scc} – порогове значення коефіцієнта інтенсивності напружень;

l – довжина тріщини;

$\mu_0 -= 4\pi*10^{-7}$ – магнітна стала у вакуумі;

$\eta_1 = l/a$ – безрозмірний параметр довжини тріщини;

f – робоча частота;

E – модуль пружності першого роду;

δ – глибина проникнення вихорових струмів;

$\omega = 2\pi f$ – кругова частота електромагнітної хвилі;

σ – електропровідність матеріалу;

U – переміщення берегів тріщини на лінії розклинювального зусилля;

АЕ – акустична емісія;

ВСП – вихрострумовий перетворювач;

ОК – об’єкт контролю.

Методи механіки руйнування зайняли провідне місце у сучасних підходах до оцінки водневої деградації металів і сплавів [1]. Доповнені методами неруйнівного контролю дефектів типу тріщин, вони становлять комплекс сучасного експериментального інструментарію для отримання широкої інформації взаємодії системи “метал-середовище”.

Відомі два підходи для дослідження водневої крихкості з позиції механіки руйнування. Перший полягає у побудові кінетичних діаграм водневого руйнування (КДВР) при тривалому циклічному та статичному навантаженні, тобто побудові експериментальної залежності $V = f(K_1)$ при заданих параметрах тиску, температури середовища і стану досліджуваного матеріалу [2-4].

Можливий також інший підхід для визначення характеристик тріщиностійкості при тривалому статичному навантаженні. Вимірюється час до руйнування зразка з тріщиною, навантаженого до різних значень КІН K_1, при якому не спостерігається ріст тріщини у наперед заданому інтервалі часу, сприймається як порогове K_{1scc} [2, 3].

Залежно від поставлених завдань обидва підходи можуть бути ефективними. Питання полягає у виборі оптимальної схеми навантаження і методу контролю тріщини у закритому об’ємі. Є доволі багато ефективних силових схем [4]. Проте, враховуючи специфіку визначення тріщиностійкості в умовах газового середовища при підвищених параметрах тиску і температури серед існуючих схем необхідно вибрати таку, що

проста в реалізації і дає якомога ширшу інформацію про поведінку тріщини при дії середовища і механічних напружень. На наш погляд найбільш ефективною силовою схемою, за допомогою якої можна реалізувати сформульовані завдання є квадратний зразок, навантажений жорстко з наперед заданим переміщенням берегів тріщини на лінії дії розклинювального зусилля (Рис. 1).

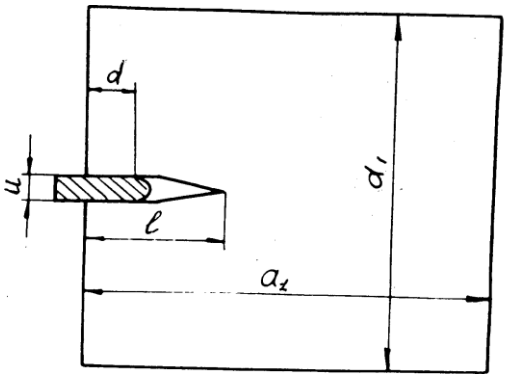

Рис. 1. Силова схема навантаження квадратного зразка жорстким клином.

Перевага такої схеми навантаження полягає у тому, що її використання спрощує конструкцію камер для середовища з заданими параметрами тиску і температури, забезпечує, в залежності від діапазону довжин тріщини спадання, зростання і незмінність K_1.

Як бачимо з рис. 2, стабілізація K_1 можлива у широкому інтервалі відносних довжин тріщин $0{,}3 \le \eta \le 0{,}45$, де похибка КІН K_1 становить не більше як 5%. При $\eta \ge 0{,}45$ K_1 зростає, а при $0{,}1 \le \eta \le 0{,}3$ K_1 різко спадає.

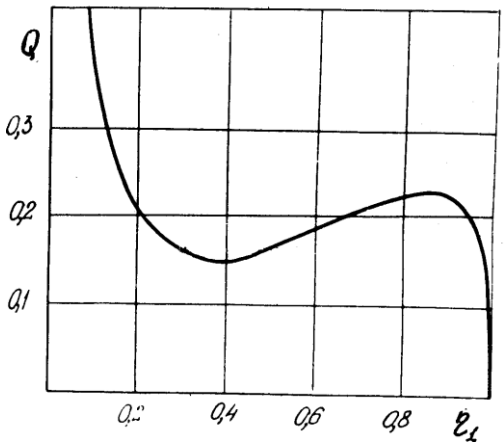

Рис. 2. Залежність функції Q від безрозмірного параметру тріщини η_1.

При використанні такої силової схеми немає потреби контролювати зусилля, оскільки коефіцієнт інтенсивності є функцією переміщення берегів тріщини на лінії дії розклинювального зусилля, що задається до завантаження зразка в камери і визначається за формулою [6]:

$$K_1 = \frac{U \cdot E}{\sqrt{a_1}} \cdot Q, \qquad (1)$$

де
$$Q = \frac{0{,}219\sqrt{1-\eta} \cdot \left(1-\eta-3{,}414\sqrt{\eta}\right)^2}{\sqrt{\eta} \cdot (1+14{,}151\eta)\left[1-\eta+0{,}833\sqrt{1-(1-\eta)^2}\right]^2}$$

Ще однією особливістю даної схеми є вирощування тріщини від концентратора за допомогою комплексної дії водневого середовища і механічних напружень. У зв'язку з цим можна оцінити час зародження макротріщини від концентратора упродовж якого мікротріщини що утворилися у вершині концентратора, зливаються в одну магістральну тріщину. При цьому вважаємо, що мікротріщини утворюються в зоні довжиною $l_м$, що є меншою за довжину підростання макротріщини $l_т$ тобто $l_м << l_т$.

У цьому випадку час зародження макротріщини можна визначити з співвідношення (2):

$$t_{зар} = t - \frac{l_T}{V}, \qquad (2)$$

де t – час зародження макротріщини і її росту до величини $l_т$.

$$V = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta l_i}{\Delta t_i}; \qquad (3)$$

де V – середня швидкість росту тріщини, визначена на ділянці з стабільним K_1.

Оскільки напружено-деформівний стан у вершині тріщини стабільний (K_1=const), то ріст тріщини і її швидкість визначатиметься часом доставки водню і його нагромадження до певної критичної концентрації C_{cr} в зоні максимальних напружень або деформацій, що перебувають на віддалі δ…2δ від вершини тріщини (δ - розкриття у вершині тріщини) [7].

При статичному жорсткому навантаженні змінюється напружено-деформівний стан в залежності від товщини зразка. На поверхні зразка нормальні напруження можуть релаксуватися, а в його центральній частині реалізовуватиметься стан плоскої деформації, а отже збільшиться концентрація напружень. Тому тріщина просуватиметься шляхом тунелювання, і її вихід на поверхню запізнюватиметься в часі. Таке тунелювання не можливо виявити традиційними методами. Аналогічна поведінка тріщини виявляється в корозійно-агресивних середовищах, особливо коли домінантним механізмом руйнування є водневий. Іншою перешкодою для контролю за ростом тріщини є середовище камери, а також необхідність контролювати тріщину упродовж тривалого періоду. На сьогодні перспективним є використання методу акустичної емісії (АЕ) для контролю зародження і підростання тріщини [8-10]. Цим методом можна фіксувати відсутні на боковій поверхні зразка стрибки тріщини, що супроводжуються АЕ. Однак при використанні методу АЕ не завжди можна розмістити перетворювач АЕ безпосередньо на зразкові, що знаходиться в камері. У таких випадках застосовують спеціальні хвилеводи, розрахунки і виготовлення яких є непростим завданням.

Для цього (приповерхневого росту тріщини) пропонуємо метод вихорострумового контролю (ВСК), особливо неферомагнітних матеріалів. Суть методу полягає у використанні явища електромагнітної індукції. При дії на об'єкт контролю (ОК) змінним магнітним полем, що створюється в обмотці збудження вихорострумового перетворювача (ВСП), в ОК виникають вихорові струми, що утворюють вторинне електомагнітне поле. Характер і розподіл вихорових струмів залежить від геометрії ОК, його електрофізичних властивостей, наявності дефектів, їх розмірів і глибини залягання.

Глибина проникнення вихорових струмів є складною функцією від багатьох параметрів. Відомо, що на глибину проникнення вихорових струмів впливають такі параметри, як діаметр обмотки ВСП, товщина ОК, товщина проміжку між ВСП і ОК, відстань від краю ОК тощо [8].

Тому реальна глибина проникнення вихорових струмів, а отже можливість виявлення дефектів на певній віддалі від поверхні ОК, визначаються залежно від конкретних умов контролю [12]. У зв'язку з цим для контролю за ростом тріщини при тривалому статичному жорсткому навантаженні у середовищі водню з використанням квадратного зразка розроблено вихорострумовий перетворювач і електронно-

вимірювальну схему. ВСП є феритовим броньованим осердям з обмоткою на каркасі з наклеєною діалектичною немагнітною прокладкою (Рис. 3). ВСП через немагнітну діалектичну прокладку іншим боком приклеєний до поверхні зразка, навантаженого клином як подано на рис.3.

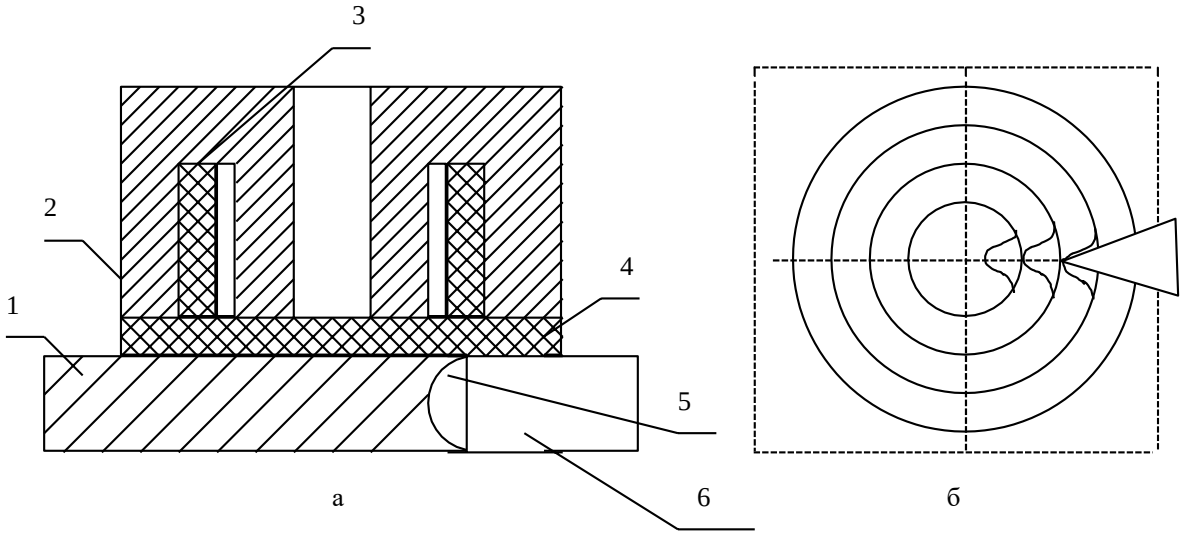

Рис.3 Конструктивна схема вихорострумового перетворювача.
1 – досліджуваний зразок; 2 – феритове осердя; 3 – обмотка;
4 – діелектрична прокладка; 5 – контур тріщини.

Обмотка перетворювача є індуктивністю LC-контуру, що задає частоту генерації LC-генератора. Полем розсіювання перетворювач збуджує у зразкові вихорові струми, що циркулюють колом, та паралельні струми в обмотці перетворювача. Наявність цих струмів приводить до зменшення індуктивності перетворювача, а отже, підвищення частоти генерації LC-генератора. Якщо тріщина стає завадою для ліній вихорових струмів, то вони викривлюють її як подано на рис. 3 б, вплив зразка на індуктивність перетворювача при цьому послаблюється, а частота генерованих LC-генератором коливань посилюється. Рівень зниження частоти зв'язаний з розміром тріщини.

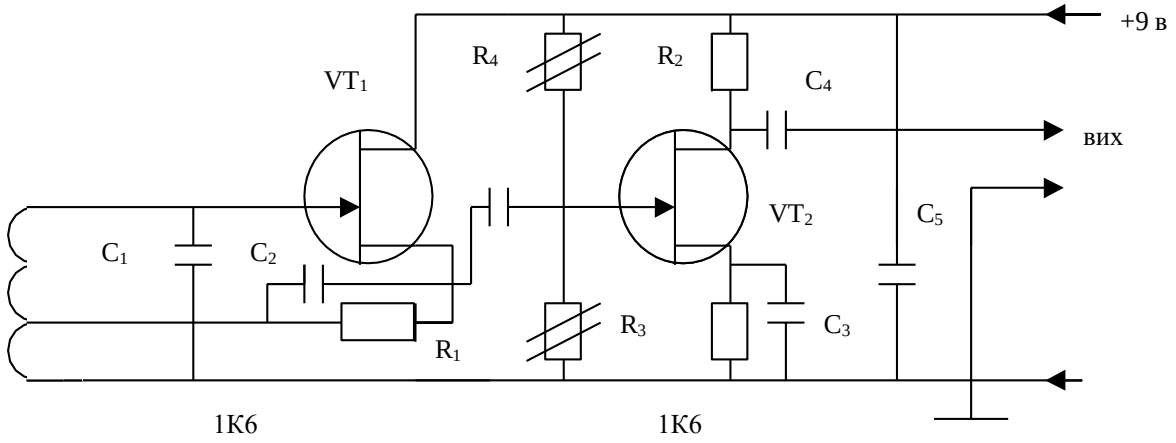

Рис. 4. Схема електронної частини вимірного пристрою.

Схема електронної частини вимірного пристрою подана на рис. 4. На індуктивності перетворювача LC_1 та транзисторі VT_1 зібраний LC-генератор. Підбором резистора R_1 транзистор VT_1 входить у режим термостабілізації. На транзисторі VT_2 зібраний буферний каскад, що усуває вплив вхідних кіл частотоміра на роботу LC-

генератора. Каскад працює у режимі перепідсилення і на виході отримує сигнал близький до прямокутного. Частоту генерованого сигналу вимірювали частотоміром-хромометром Ф50-41.

Глибина проникнення електромагнітного поля (товщина вимірювального шару), а отже фіксація тріщини що підходить до поверхні зразка визначається глибиною скін-ефекту [8]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{(\omega\sigma)\cdot\mu_0}}, \qquad (4)$$

Використовуючи перетворювачі з різною індуктивністю, можна змінювати глибину або довжину досліджуваної області зразка. Для тарування вихорострумового перетворювача ми вимірювали тріщини у зразку з алюмінієвого сплаву. При таруванні довжина тріщини змінювалася у широкому діапазоні $0{,}1 \le \eta \le 0{,}6$. Залежність зміни частоти генерованого сигналу від довжини тріщини подано на рис. 5.

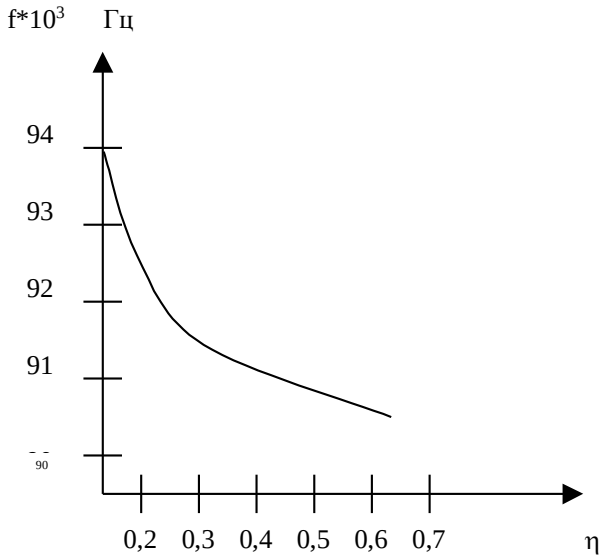

Рис. 5. Залежність частоти генерованого сигналу від довжини тріщини.

Запропонований метод реєстрації росту тріщини має перевагу, тому що він простий для виконання і інтерпретації результатів вимірювання.

Таким чином, поєднання запропонованої силової схеми і методу вимірювання тріщини дозволяє ефективно досліджувати поведінку тріщини при одночасній дії механічних напружень та газоводневих середовищ з заданими параметрами тиску та температури на стадії її зародження і докритичного росту.

The investigation method of the fatigue crack growth kinetics in the gas-hydrogen medium using the force schere of solid square specimen loading which provider the stabilization of stress intensity factor (SIF) within the definite crack length interval. To control the crack growth whirl-current transformer is suggested, its operation principle and construction schere are described.

Література

1. Andreikiv O. Ye. and Ivanytsky Ya. L. Methodological aspects of estimation of materials crack growth resistance characteristics in hydrogen environment and sustained and cyclic loading// Physicochemical mechanics of materials. – 1998. - №4.-p.5-19.
2. Джонсон Г. Влияние среды на разрушение высокопрочных материаллов//Разрушение.- М.: – Мир.- 1986. – с. 729-775.
3. Frick V., Hanser O. R., Brawn I. A. Enhanced haw crown see main engine alloys in environment pressure gaseous hydrogen. In Space Shuttle Materials V. №5. Society of Aerospace Cliff. 1971.- pp. 537-592.

4. Панасюк В. В., Ковчик С. Э., Сморода Г. И. Методы оценки водородной хрупкости конструкционных материалов// Физ.-хим. механика материаллов.- 1979.- №3. –с. 5-17.
5. Механика разрушения и прочность материаллов: О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин и др. Справочное пособие. Т.4. К: Наукова думка.1990. с. 679.
6. Обухивский О. И. Расклинивание образца с боковой трещиной// Физ.-хим. механика материалов.- 1983.- №3. –с. 111-112.
7. Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Харин В. С. Теоретический анализ роста трещины в материалах при воздействии водорода// Физ.-хим. механика материалов.- 1981.- №4. –с. 61-75.
8. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідниковий посібник.- Т. 5. За ред. акад. В. В. Панасюка.- Львів. – ФМІ. – 2001.- с. 205-212.
9. Andreykiv O. Ve., Lysak M, V., and Skalsky V. R. Method of accelerated evalution of K under stress corrosion cracking//Eng. Frac. Mech. – 1996. №3. – pp. 387-394.
10. А. С. 1769086 СССР. П01№29/04. Способ определение нижнего порогового значения коэффициента интенсивности напряжения/ А. Е. Андрейкив, Н. В. Лысак, В. Р. Скальский, О. М Сергієнко. 15.10.92. Бюл. №38.
11. Лисак М. В., Скальский В. Р., Сергієнко О. М. Дослідження впливу хвилеводу на зміну параметрів сигналів акустичної емісії//Фіз – хім. механіка матеріалів. – 1994. - №2. – с. 64-70.
12. Stusky P. And Lord W. Skin Depth Considerations in Eddy Curent NDT//Review of Progress Quantitative Nondestructive Evaluation/ - New-York. 1992. – Vol.11. - P. 299-306.

Одержано 24.12.2001 р.