

МОНІТОРИНГ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ІМПУЛЬСНО-ЕЛЕКТРОХІМІЧНИМ МЕТОДОМ

О. Г. АРХИПОВ¹, М. С. ХОМА², В. О. ЛИФАР¹, Д. О. КОВАЛЬОВ¹

¹ Технологічний інститут Східноукраїнського національного університету
ім. Володимира Даля, Сєвєродонецьк;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Описано новий спосіб електрохімічного імпульсного контролю корозійно-механічного руйнування технологічних об'єктів, які експлуатуються в середовищі рідких електролітів у хімічній та нафтопереробній галузях, зокрема технічного стану обладнання, і прогнозування його залишкового ресурсу за зміною з часом різниці потенціалів та інтенсивністю появи електричних імпульсів руйнування.

Ключові слова: корозійно-механічне руйнування, різниця потенціалів, імпульс, контроль, ідентифікація, імовірність руйнування.

Корозійний моніторинг і контроль найуразливіших ділянок технологічних об'єктів необхідний, щоб запобігти руйнуванню обладнання. На сьогодні відсутній універсальний метод, придатний для визначення характеру і швидкості корозії різних матеріалів. Тому важливо в кожному конкретному випадку правильно підібрати найефективніший. Найчастіше корозійні процеси протікають у рідких електролітах [1, 2], тому тут доцільні електрохімічні методи, які універсальні, дають можливість виявити пошкодження на ранніх етапах, високоточні і чутливі. Крім того, з їх допомогою можна оцінити поточний стан обладнання і швидкість протікання руйнівних процесів, а також спрогнозувати залишковий ресурс [3, 4].

Мета праці – розробити метод контролю ідентифікації електрохімічних імпульсів, який дасть можливість контролювати ступінь корозійно-механічного пошкодження технологічних об'єктів і прогнозувати залишковий ресурс за кількістю та інтенсивністю появи імпульсів і зміною різниці потенціалів.

Методика випроб. На електромеханічній установці випробовували зразки труб із нержавної сталі 12X18H10T діаметром 32 mm, товщиною стінки 2 mm, довжиною 0,5 m, в які заливали 5%-ий водний розчин NaCl. Середня робоча температура 15°C. Для пришвидшення руйнування всередині труби нанесли гострий концентратор напружень трикутного профілю поблизу консольного кріплення. Трубу циклічно навантажували з частотою 5 Hz і амплітудою коливань 11 mm (рис. 1).

У середину труби вмонтовували електрод занурювального типу [5, 6]. Різницю потенціалів ΔE передавали через плату вводу аналогового сигналу до аналого-цифрового перетворювача (АЦП) [7, 8]. Імпульсом вважали коротку за часом стрибкоподібну зміну значень ΔE внаслідок розвитку корозійної тріщини у верхині концентратора напружень. З АЦП оцифрований сигнал $\Delta E(t)$ надходив до комп'ютера і на реєстрацію. Далі відділяли імпульсний складник від шумового, використовуючи метод математичної ідентифікації імпульсів. Визначали кількість ідентифікованих імпульсів та інтенсивність їх появи з часом.

Контролювали стан обладнання і прогнозували залишковий ресурс за зміною двох параметрів: ΔE та інтенсивністю появи імпульсів. За досягнення зазда-

легідь установлених граничних значень цих параметрів вмикається попереджувальний сигнал або зупиняється обладнання [9].

- Рис. 1. Схема імпульсного контролю:
 1 – об’єкт контролю (трубопровід);
 2 – 5%-ий водний розчин NaCl; 3 – концентратор напружень; 4 – електрод;
 5 – плата вводу аналогового сигналу;
 6 – АЦП; 7 – персональний комп’ютер;
 8 – програма реєстрації сигналу;
 9 – програма ідентифікації імпульсів;
 ΔE – різниця потенціалів;
 A – амплітуда коливань.

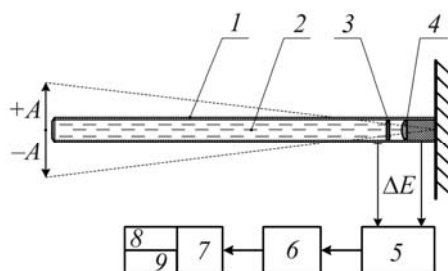


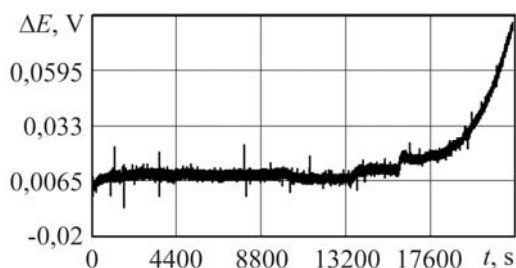
Fig. 1. Scheme of pulse control: 1 – monitored item (pipeline); 2 – 5% NaCl water solution; 3 – stress concentrator; 4 – electrode; 5 – input board of analog signal; 6 – analog-to-digital converter; 7 – PC; 8 – logging routine; 9 – program identification of pulses; ΔE – differing potentials; A – peak-to-peak amplitude.

Результати та їх обговорення. Під час випроб із зареєстрованого сигналу отримували інформацію про характерні зміни ΔE у часі, які є типовими для сталі 08X18H10T, та про імпульси, що виникають з розвитком тріщини (рис. 2). Реєстрували значення ΔE , використовуючи АЦП, за частоти 20 Hz, що в чотири рази перевищує частоту навантаження зразка. Ця частота була достатньою, оскільки вважали, що за кожного навантаження труби може виникати не більше одного імпульсу.

Виявили, що сигнал $\Delta E(t)$ супроводжується шумом, обумовленим стохастичними фізичними процесами під час вимірювань і реєстрації. За зміною ΔE визначали амплітуду шумів упродовж вимірювань. Із загального масиву вимірних значень ідентифікували і підраховували імпульси відносно їх середньостатистичної апроксимації.

Рис. 2. Зміна значень ΔE у часі для труби з нержавної сталі 12X18H10T у 5%-му розчині NaCl.

Fig. 2. Change of ΔE values with time for the 12X18H10T steel pipe in 5% NaCl solution.



Для виділення імпульсів, що свідчать про руйнування металу, необхідно вибрати граничний критерій їх відмінності від шуму із загального масиву даних. Рівень шуму можна приблизно оцінити за амплітудою $dP = 2 \div 2,5$ mV.

Існують апаратні і програмні методи виділення корисного сигналу з масиву даних. З урахуванням сучасного розвитку цифрової техніки доцільніші програмні. Алгоритм виявлення імпульсів полягає в циклічній обробці масиву даних шляхом розрахунку усередненого значення Sr_i різниці потенціалів в околі $y \pm k$ точки j з порівнянням амплітуди ΔE з амплітудою шуму dP (рис. 3).

Усереднені значення масиву значень ΔE розраховували за формулою

$$Sr_j = \frac{\sum_{i=-k}^k MM_i}{2k + 1}, \quad (1)$$

де MM_i – масив вимірних значень ΔE , $i = -k..k$. Амплітуду шуму dP визначали за середньоквадратичним відхиленням ΔE у всьому масиві даних. Порівнюючи середнє значення зміни потенціалу Sr_j у кожній точці виміру з поточним значенням амплітуди MM_j , можна ідентифікувати імпульс. Імпульсом, який свідчить про корозійно-механічне пошкодження, вважають такий, що відповідає умовам для імпульсу додатного

$$MM_j \geq (Sr_j + dP \cdot \sqrt{2}) \quad (2)$$

та від'ємного напрямків

$$MM_j \leq (Sr_j - (dP \cdot \sqrt{2})). \quad (3)$$

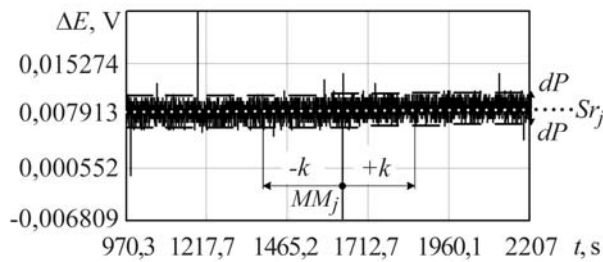


Рис. 3. Фрагмент графіка $\Delta E(t)$ з імпульсами руйнування.

Fig. 3. Fragment of the graph $\Delta E(t)$ with fracture pulses.

Якщо амплітуда відхиляється від значення Sr_j більше ніж на $dP \cdot \sqrt{2}$, вважають, що ці відхилення є імпульсом. Далі обчислювали кількість імпульсів p з масиву вимірних значень зміни ΔE за час реєстрації і будували графік їх зміни в часі (рис. 4а), який ілюструє появу загальної кількості імпульсів руйнування від моменту навантаження зразка до його зламу. Диференціюючи функцію зміни імпульсів $p'(t)$, визначили інтенсивність їх появи з часом, а також динаміку наростання (рис. 4б). Істотне збільшення їх інтенсивності відповідало наближенню до моменту руйнування труби.

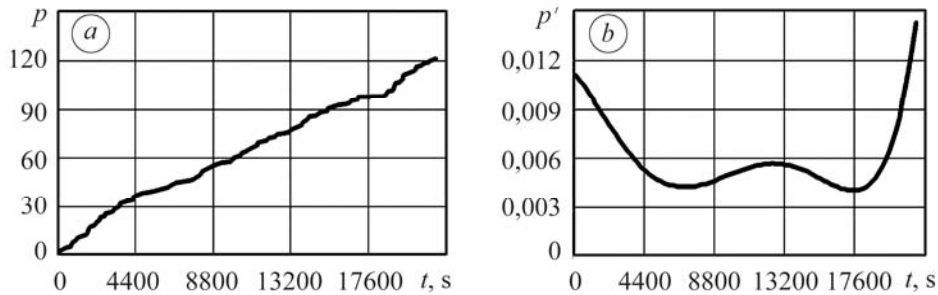


Рис. 4. Зміна кількості імпульсів (а) та інтенсивність їх появи (б) під час корозійно-механічного руйнування сталі 12Х18Н10Т.

Fig. 4. Change of pulses amount (a) and pulses intensity (b) under corrosion-mechanical fracture of 12X18H10T steel.

Встановлення ймовірності руйнування обладнання. Для практичного застосування імпульсного контролю за вимірними значеннями ΔE доцільно визначити ймовірність руйнування досліджуваного об'єкта, який в технологічних умовах знаходиться під циклічним навантаженням і контактує з корозивно-активним середовищем.

Для цього досліджували вісім зразків зі сталі 12Х18Н10Т (див. рис. 1). Інформативним параметром вважали зміну значень ΔE у часі. Кожен експеримент

закінчували в момент утворення наскрізної тріщини. Час руйнування зразка фіксували як $t_{i \max}$. Отримані масиви експериментальних даних обробляли так.

Параметр ΔE приводили до нормованого значення за формулою

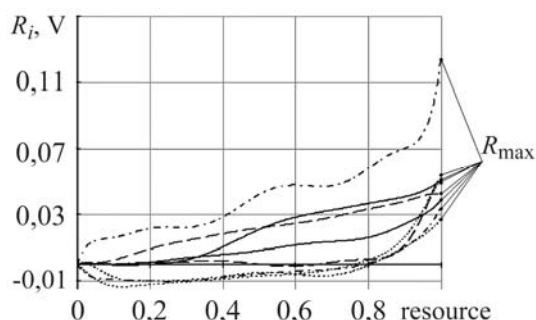
$$R_i = E_i - E_0, \quad (4)$$

де R_i – нормоване значення різниці E_i і E_0 ; E_i – поточне вимірне значення ΔE ; E_0 – його початкове значення. Цією операцією зводимо початкову точку вимірювань ΔE до нуля для кожного з восьми експериментів.

Поточний час t_i кожного виміру ΔE поділяли на максимальний $t_{i \max}$, коли утворюється наскрізна тріщина. Отримували безрозмірну величину, яка описує розвиток тріщини і має значення залишкового ресурсу (рис. 5), що знаходиться в діапазоні (0...1).

Рис. 5. Зміна параметра ΔE в координатах R_i – ресурс (криві відповідають різним зразкам).

Fig. 5. Change of parameter ΔE in the coordinates R_i – life time (curves correspond to different samples).



Для восьми експериментів ймовірність руйнування залежить від значень R_i . Побудувавши масив з максимальних значень ΔE , за яких відбулось руйнування зразків (R_{\max}) та посортувавши їх за зростанням, одержали можливість поставити у відповідність кожному $R_{j \max}$ значення залишкового ресурсу:

$$P = \frac{\sum_{f=1}^j f}{n}. \quad (5)$$

При цьому $j \in 0 \dots n$.

За результатами випроб різних зразків одержали такий масив:

$$\text{sort}(R) = \begin{matrix} \left[\begin{array}{l} 0,0276 \\ 0,0357 \\ 0,0392 \\ 0,0419 \\ 0,0509 \\ 0,0511 \\ 0,0550 \\ 0,1275 \end{array} \right] \rightarrow \begin{matrix} \left[\begin{array}{l} 0,125 \\ 0,250 \\ 0,375 \\ 0,500 \\ 0,625 \\ 0,750 \\ 0,875 \\ 1,000 \end{array} \right], \end{matrix} \quad (6)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\Delta E} \qquad \underbrace{\hspace{10em}}_P$

де $\text{sort}(R)$ – сортування елементів масиву R_i за зростанням з відповідним значенням ймовірності P ; перший стовпчик – значення максимальних $R_{\max} = (E_i - E_0)$ у момент зламу зразка; другий – ймовірність руйнування зразка за відповідного R_{\max} .

Для аналітичного опису ймовірності руйнування залежно від потенціалу $P(R)$ використовували інтеграл ймовірності Гауса в поєднанні з пробіт-функцією [10, 11]:

$$\text{Pr}(a, b, k) = a + b \cdot \ln(k), \quad (7)$$

де $\text{Pr}(a, b, k)$ – пробіт-функція (формальне подання); k – формальний параметр, що впливає на ймовірність (у нашому випадку дорівнює R)

$$P(a, b, k) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\text{Pr}(a, b, k) - 5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt, \quad (8)$$

$P(a, b, k)$ – функція ймовірності Гаусса.

Нескладно перевірити, що для ймовірності $P(R_j) = 0,125$ і $0,5$ значення пробіт-функції становить 3,84 та 5 відповідно. Для пошуку коефіцієнтів a і b , які залежать від експериментально одержаних значень $\text{sort}(R)$, досить розв'язати систему рівнянь (9) і (10). Тоді для двох точок

$$a(h) = \text{Pr}_n - b(h) \cdot \ln(\text{sort}(R)_h), \quad (9)$$

$$b(h) = \frac{\text{Pr}_n - \text{Pr}_h}{\ln(\text{sort}(R)_n) - \ln(\text{sort}(R)_h)}, \quad (10)$$

де h і n – відповідно індекси двох різних рядків масиву (6); Pr – відповідні цим рядкам значення пробіту, за яких реалізується ймовірність для цих рядків. Середнє значення функції ймовірності

$$P_S(R) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} P(a(i), b(i), R)}{n-1}. \quad (11)$$

Оскільки пошук довірчого інтервалу з використанням коефіцієнтів Стюдента безпосередньо для значень інтеграла Гаусса досить проблематичний, доцільно відобразити максимальне і мінімальне відхилення функції ймовірності, які містять всі результати експерименту. Побудована (рис. 6) залежність ймовірності руйнування зразків від різниці поточного та початкового значень ΔE , а також границі функцій максимального і мінімального відхилення ймовірності руйнування.

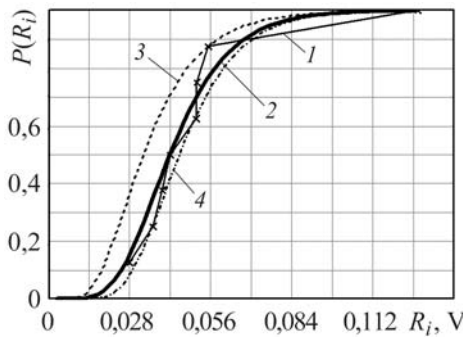


Рис. 6. Визначення залишкового ресурсу за кривою ймовірності: 1 – крива залишкового ресурсу, яка складається зі значень R_{\max} ; 2 – крива усередненої ймовірності руйнування труби; 3, 4 – криві максимального і мінімального відхилення ймовірності руйнування.

Fig. 6. Determination of residual life by the probability curve: 1 – curve of residual life, which consists of R_{\max} values; 2 – curve of averaged probability of pipe fracture; 3, 4 – curve of maximum and minimum rejection of failure probability.

Максимальне і мінімальне відхилення описують функції:

$$P_{\max}(R) = \max(P(a(1), b(1), R) \dots P(a(n-1), b(n-1), R)), \quad (12)$$

$$P_{\min}(R) = \min(P(a(1), b(1), R) \dots P(a(n-1), b(n-1), R)). \quad (13)$$

Так як механізм розвитку тріщин залежить від природи металу, корозивного середовища і виду навантаження, можна припустити, що отримані коефіцієнти для визначення ймовірності руйнування зразка, залежно від ΔE , придатні і для аналогічних зразків з такого ж металу. Відмітимо, що ймовірність $P(R)$ у реальній робочій системі необхідно контролювати від моменту введення обладнання в

експлуатацію. Тобто початкове значення E_0 слід виміряти до подачі навантаження на об'єкт. Далі вимірювати слід безперервно. Здійснивши серію експериментів для однотипних зразків, отримали функцію ймовірності руйнування під час вимірювань ΔE . За допомогою функції $\Delta E(t)$ можна оцінити залишковий ресурс і досліджуваного зразка, і реального об'єкта. Це дає змогу своєчасно розпочати ремонтно-відновлювальні роботи, наприклад, за настання ймовірності руйнування 0,8.

ВИСНОВКИ

Описано новий спосіб та схему електрохімічного імпульсного контролю корозійно-механічного руйнування за загальною кількістю зареєстрованих імпульсів і динамікою їх появи під час пошкодження обладнання, який дає змогу оцінювати його ступінь та прогнозувати залишковий ресурс. З його допомогою можна контролювати корозійно-механічні пошкодження технологічного обладнання за зміною в часі двох параметрів: різниці потенціалів та інтенсивності появи електричних імпульсів. Розвинуто методику виявлення і математичного опрацювання та визначення інтенсивності імпульсів і ймовірності руйнування, а також оцінки залишкового ресурсу за зміною у часі електродного потенціалу, що дає змогу завчасу розпочинати ремонтно-відновлювальні роботи.

РЕЗЮМЕ. Описан новий спосіб електрохімічного імпульсного контролю корозійно-механічного руйнування технологічних об'єктів, експлуатуваних в середовищі жидких електролітів в хімічній і нафтопереробній галузях, в частности, технічного стану обладнання і прогнозування його залишкового ресурсу по изменению разницы потенциалов во времени и интенсивности появления импульсов разрушения.

SUMMARY. The new method of electrochemical pulse control of corrosion-mechanical fracture of technological objects, operating in the environment of liquid electrolytes in chemical and oil-processing industry, in particular, the technical state of equipment and prediction of its residual life by the change of potentials difference and by the intensity of fracture pulses appearance, is described.

1. Никифорчин Г, Цирульник О., Генега Б. Особливості протекторного захисту від корозії навантажених низьколегованих сталей // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – Т. 1, спецвип. № 4. – С. 360–364.
2. Чвірук В. П., Поляков С. Г., Герасименко Ю. С. Електрохімічний моніторинг техногенних середовищ. – К.: Академперіодика, 2007. – 322 с.
3. Новицкий В. С., Писчик Л. М. Коррозионный контроль технологического оборудования. – К.: Наук. думка, 2001 – 170 с.
4. Архипов А., Любимова-Зинченко О., Ковалев Д. Электрохимический импульсный метод мониторинга коррозионно-механических повреждений // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1(4). – С. 75–79.
5. Ковалев Д. А., Боярчук А. Г. Импульсный метод контроля коррозионных повреждений технологического оборудования. // Науч. стремления. – 2012. – № 1. – С. 114–120.
6. Импульсный метод определения коррозионно-механического повреждения в среде электролитов / В. И. Похмурский, М. С. Хома, А. Г. Архипов, Д. А. Ковалев // Тез. докл. Междунар. конф., посвященной 110-летию со дня рождения чл.-кор. АН СССР Г. В. Акимова. – М., 2011. – С. 138.
7. Патент 55489 Україна, МПК (2010) G01N 3/32, G01N 27/26. Імпульсний спосіб / В. І. Похмурський, М. С. Хома, О. Г. Архипов та ін. – Опубл. 10.12.2010; Бюл. № 23.
8. Похмурський В. І., Хома М. С. Корозійна втома металів і сплавів. – Львів: Сполом, 2008. – 300 с.
9. Розробка методу оцінки ступеня пошкодження обладнання нафтохімічної промисловості / М. С. Хома, В. І. Похмурський, О. Г. Архипов, В. А. Борисенко / Зб. наук. статей “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”. – 2009. – С. 149–154.
10. Мастрюков Б. С. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. – М.: Academia, 2004. – 328 с.
11. Poblete B. R., Lees F. P., and Simpson G. B. The assessment of major hazards: estimation of injury and damage around a hazard source using an impact model based on inverse square law and probit relations // J. of Hazardous Mat. – 1984. – № 9. – P. 355–371.

Одержано 11.07.2013