
АСИМПТОТИЧНИ РЕШЕНИЯ ПРИ УЛТРАЗВУКОВ КОНТРОЛ НА КОРОЗИЯ*

АЛЕКСАНДЪР ПОПОВ, МИТКО МИХОВСКИ

Александър Попов, Митко Миховски. АССИМПТОТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ КОРРОЗИИ

В работе представлен ультразвуковой метод для оценки степени развития межкристаллитной коррозии в аустенитных сталях. Распространение ультразвуковых волн представлено при помощи уравнения эйконала. Время распространения ультразвуковых волн и расстояние между передающими и принимающими преобразователями в условиях оптимального приема являются информационными параметрами контроля. Предложены критерии для оценки степени развития межкристаллитной коррозии.

Alexander Popov, Mitko Michovski. ASSYMPTOTIC SOLUTIONS IN THE ULTRASONIC CORROSION CONTROL

Ultrasonic method for intercrystalline corrosion in austenitic steels is presented. The ultrasonic waves propagation is described by eikonal equation. The information parameters for intercrystalline corrosion testing are the time of propagation and the distance between ultrasonic transducers (transmitter and receiver). Testing criteria are proposed.

Изследването на зараждането и развитието на междукристална корозия (МКК) е актуална задача при контрола на неръждаеми стомани от аустенитен клас, използвани в съоръжения от атомната енергетика, химическата промишленост и нефтодобива, които работят при повишени

* Работата е финансирана по договор ТН 263 на НФНИ.

температури, в контакт с агресивни среди, при наличие на механични на-товарвания и радиационно лъчение. Изследването на МКК с използване на разрушителни теглови методи, на металографски анализ на структу-рата и чрез механични изпитвания показва неравномерния характер на развитие на корозията в дълбочина на метала, незначително намалява-не на плътността на материала, наличие на нови фази на границата на зърната и съществена промяна на еластичните, пластичните и якостните характеристики на материала [1-3]. Чувствителността на акустичните вълни към тези промени в материала наложи ултразвуковия метод при оценка на развитието на МКК [1, 2, 4].

В работата се предлага един нов ултразвуков подход за повишаване на достоверността и информативността на контрола с отчитане разпре-делението на скоростта на разпространение на надлъжни ултразвукови вълни C_L по дълбочина (x_2) на увредения материал (фиг. 1)

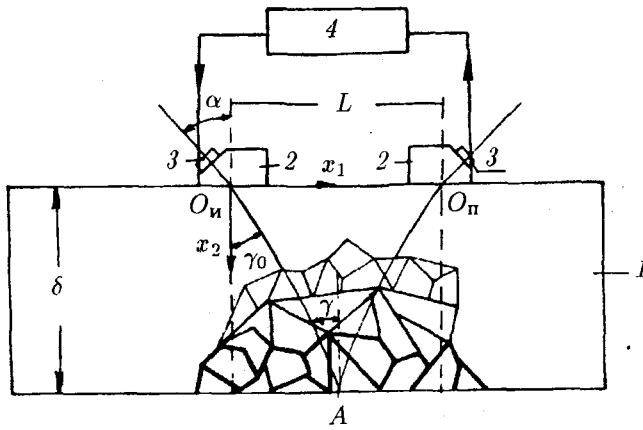
$$(1) \quad C_L(x_2) = \left(\frac{\lambda(x_2) + 2\mu(x_2)}{\rho(x_2)} \right)^{1/2},$$

където C_L е скоростта на разпространение на ултразвуковите вълни, λ и μ — коефициенти на Ламе, ρ — плътност на материала. На фиг. 1 са представени развитието на МКК в неръждаема аустенитна стомана с начална дебелина δ и схемата на ултразвуково изследване. Използува-ни са следните означения: 1 — материал с развиваща се МКК, 2-3 — стандартни ултразвукови осезатели с променлив ъгъл, състоящи се от плексигласова призма (2) и пиезопреобразувател (3), 4 — ултразвуков дефектоскоп-измерител, α и γ_0 — ъгли съответно на падане и на пречуп-ване на надлъжните ултразвукови вълни. С цел в изследвания материал да се създадат условия за разпространение на надлъжна вълна ъгълът на падане α се подбира в границите $0 \leq \alpha \leq \alpha_{кр}$, където $\alpha_{кр}$ е първият критичен ъгъл, определен от закона на Снелиус $\sin(\alpha_{кр}) = C_{пл}/C_L(0)$ ($C_{пл}$ и $C_L(0)$ са съответно скоростите на разпространение на надлъжните въл-ни в плексигласовата призма на осезателя и в контролирания материал) [4].

Ултразвуковият дефектоскоп генерира къси радиоимпулси с честота на запълване в диапазона от 2 до 10 МHz. След преобразуване в осеза-телите 2-3 те се разпространяват като акустични сигнали в аустенитната стомана в посока $O_{и} - A$, отразяват се и след изминаване на пътя $A - O_{п}$ пристигат в осезателя-приемник. С помощта на специални устройства за линейни измервания, прикрепени към ултразвуковите осезатели, се из-мерва разстоянието L между центровете на осезателите. Времето на раз-пространение на ултразвуковата вълна t по акустичния път $O_{и} - A - O_{п}$ се определя с използване на ултразвуковия дефектоскоп.

Уравненията, описващи разпространението на ултразвуковите вълни в изследвания материал, се представят във вида [4, 5]

$$(2) \quad \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ [\lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})] \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right\} = 0,$$



Фиг. 1

където u_i е преместването в i -то направление; δ_{ij} — символ на Кронекер.

Като се отчете високочестотният характер на използваните ултразвукови вълни, решението на (2) се търси във вида [5]

$$(3) \quad u_i(t, x_1, x_2) \cong \sum_{n=0}^{\infty} \phi_n(x_1, x_2) f_n(Q_i),$$

където ϕ_n е n -тото приближение за амплитудата на ултразвуковите вълни; $f_n(Q_i) = (-i\omega)^{-n} \exp(-i\omega Q_i)$; Q_i е повърхнината на вълновия фронт, описвана със зависимостта $t - \sigma(x_1, x_2) = 0$; i — имагинерна единица. След полагане на (3) в (2) и приравняване на нула на коефициентите пред f_n , вълновото уравнение се записва във вида [5]

$$(4) \quad \sigma_{x_i}^2 - C_L^{-2}(x_2) = 0,$$

$$(5) \quad 2\sigma_{x_i} \frac{\partial \phi_0}{\partial x_i} + \sigma_{x_i x_i} \phi_0 = 0.$$

Уравнението (4) е уравнение на ейконола и представлява частно диференциално уравнение. То се решава, като се сведе до система обикновени диференциални уравнения от вида [5]

$$(6) \quad \frac{d\rho_1}{ds} = 0; \quad \frac{d\rho_2}{ds} = \frac{1}{C_L(x_2)} \frac{dC_L}{dx_2}; \quad \frac{d\sigma}{ds} = \frac{1}{C_L(x_2)}$$

върху характеристиките $x_i = x_i(s)$ (s — параметър), които се определят от системата уравнения

$$(7) \quad \frac{dx_1}{ds} = C_L(x_2)\rho_1; \quad \frac{dx_2}{ds} = C_L(x_2)\rho_2.$$

В (6) и (7) е въведено означението $\rho = (\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}) = (\rho_1, \rho_2)$.

Като се вземе предвид законът на Снелиус $C_L^{-1}(x_2) \sin \gamma = q$; $q = C_L(0)^{-1} \sin \gamma_0$, от системите (6) и (7) се получават зависимости за разстоянието $L = O_{\text{и}} - O_{\text{п}}$:

$$(8) \quad L = 2 \int_0^{\delta} q C_L(y) \{1 - [q C_L(y)]^2\}^{-1/2} dy,$$

и за времето на разпространение на вълновия фронт t по пътя $O_{\text{и}} - A - O_{\text{п}}$ във вида

$$(9) \quad t = 2 \int_0^{\delta} C_L^{-1}(y) \{1 - [q C_L(y)]^2\}^{-1/2} dy.$$

Интегралите (8) и (9) се решават за линейно намаляваща зависимост на скоростта на разпространение на ултразвуковите вълни C_L от дълбочината x_2 , т. е. при

$$(10) \quad C_L(x_2) = C_L(0) - Ax_2; \quad A = \text{const.}$$

Такава апроксимация е подходяща съгласно проведените ултразвукови изследвания на развитието на МКК [2] за среди, в които различна част от обема на материала е обхваната от корозията. В този случай в слоевете, които са разположени непосредствено до ултразвуковия осезател, практически няма промени в скоростта на разпространение на надлъжните вълни, докато в слоеве, които контактуват с агресивната среда, намалението на скоростта е максимално.

След заместване на (10) в (8) и (9) се получават за L и t съответно зависимостите:

$$(11) \quad 0,5L = (Aq)^{-1}(\cos \gamma - \cos \gamma_0),$$

$$(12) \quad 0,5t = A^{-1} \ln \frac{\text{tg}(0,5\gamma_0)}{\text{tg}(0,5\gamma)},$$

където γ е ъгълът на пречушване в слоя с максимално развита корозия ($C_L(\delta) = \text{min}$).

От (11) и (12), след като се изключи $\cos \gamma$, се получава трансцендентно уравнение за определяне на параметъра A :

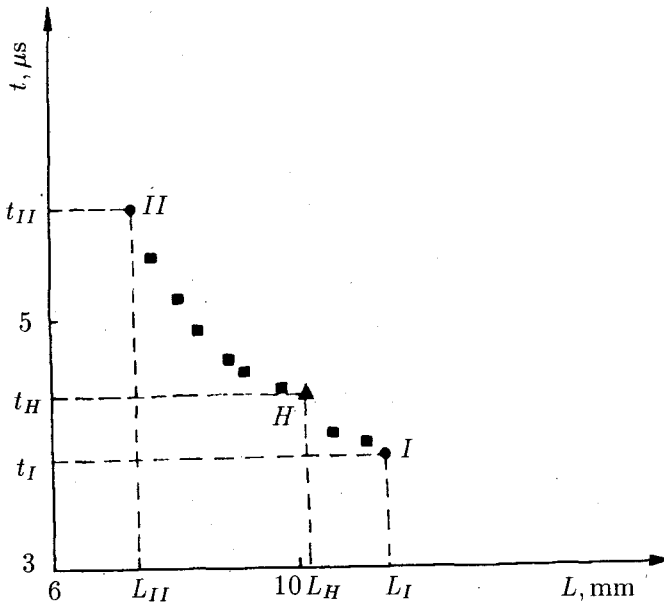
$$(13) \quad G_2 + 0,5qAL - \frac{1 - G_1 \exp(-At)}{1 + G_1 \exp(-At)} = 0,$$

където са въведени коефициентите

$$G_2 = \text{tg}^2(0,5\gamma_0); \quad G_1 = \frac{1 - \text{tg}^2(0,5\gamma_0)}{1 - \text{tg}^2(0,5\gamma)}$$

Един пример за апробиране на предложения подход е представен по-нататък. Използувани са експериментални данни от изследване на образци от аустенитна стомана марка 12X18H10T с големина на зърната

30 μm и различна степен на развитие на МКК [2]. Пресметнати са стойностите на L и t при $C_L(0) = 5850 \text{ m/s}$, $\alpha = 13^\circ$, $\gamma_0 = 30^\circ$, $C_{\text{пл}} = 2700 \text{ m/s}$. Ъгълът γ се определя въз основа на получени в [2] за образци с различна степен на МКК експериментални данни за промяна на скоростта на разпространение на ултразвуковите вълни C_H при нормално падане ($\alpha = 0$), като се предполага, че $C_H = 0,5(C_L(0) + C_L(\delta))$. За двата гранични случая — липса на МКК и обхващане на цялата дебелина ($\delta = 10 \text{ mm}$) на контролираното изделие от МКК — случай, който е недопустим при експлоатация на съоръжения от аустенитна стомана; данните са представени съответно с точки I и II на фиг. 2. Обикновено в безразрушителния ултразвуков контрол въз основа на якостни пресмятания на реални съоръжения се въвеждат норми за допустимо развитие на МКК. Например за случая, когато такава норма предполага обхващане на 30% от дебелината на материала δ от МКК, стойностите за L и t са представени с точка H. Стойностите на L и t , съответстващи на $L_H \leq L \leq L_I$ и $t_I \leq t \leq t_H$, отговарят на материал с допустимо развитие на МКК. Останалите точки на фиг. 2 съответстват на различна степен на недопустимо развитие на МКК.



Фиг. 2

Представеният подход и получените данни са основа за разработване на ултразвукови технологии за контрол на МКК в изделия от аустенитна неръждаема стомана за нуждите на енергетиката, нефтодобива и химическата промишленост.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миховски, М., М. Лозев. Безразрушителен контрол в химическото машиностроене. Техника, С., 1987.
2. Приходко, В. Н. Неразрушающий контроль межкристаллитной коррозии. Машиностроение, М., 1982.
3. Смирнов, Н. А. Современные методы анализа и контроля продуктов производства. Металлургия, М., 1985.
4. Алешин, Н. П., В. Е. Белый, А. Х. Вовилкин, А. К. Воцанов, И. Н. Ермолов, А. К. Гурвич. Методы акустического контроля металлов. Машиностроение, М., 1989.
5. Уизем, Дж. Линейные и нелинейные волны. Мир, М., 1987.

Постъпила 15.03.1994