

ДО ПРОБЛЕМИ ЗВАРЮВАЛЬНИХ РОБІТ НА ДІЮЧИХ ГАЗОПРОВОДАХ. Частина II

А.В. Василик, В.Б. Запхляк, І. М. Сем'яник, Н.М. Запхляк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48090,
e-mail: ztk@nuing.edu.ua

Описано можливі процеси наводнювання і науглецювання металу магістральних газопроводів при термічному розкладанні метану на нагрітій ділянці внутрішньої поверхні труб під час виконання зварювальних робіт безпосередньо під тиском газу.

Виходячи із загальних процесів розчинення водню в металі, зародження і розвитку водневих тріщин в трубних сталях, запропоновано математичну модель дифузії водню в металі за наявності "уловлювачів" (пасток), які вилучають водень з дифузійного процесу. Проаналізовано розв'язок задачі, отримано розрахункові рівняння для визначення кількості водню, вилученого з дифузійного процесу, сумарної (експериментально вимірюваної) кількості водню в металі. Проаналізовано кінетику водневого насичення металу.

Викладено умови науглецювання металу труб при термічному розкладанні метану на нагрітій пристінній ділянці труби. Описано експериментальні результати стендових досліджень, дано аналітичну оцінку процесу науглецювання металу. Сформульовано практичні висновки і рекомендації.

Ключові слова: газопровід, зварювання, водень, наводнювання, науглецювання, математична модель.

Описаны возможные процессы наводороживания и науглероживания металла магистральных газопроводов при термическом разложении метана на нагретом участке внутренней поверхности труб при проведении сварочных работ непосредственно под давлением газа.

Исходя из общих процессов растворения водорода в металле, зарождения и развития водородных трещин в трубных сталях, предложена математическая модель диффузии водорода в металле при наличии "уловителей" (ловушек), которые исключают водород из диффузионного процесса. Проанализовано решение задачи, получены расчетные уравнения для определения количества водорода, изъятого из диффузионного процесса, расчета суммарного (экспериментально измеряемого) количества водорода в металле. Проанализована кинетика водородного насыщения металла.

Изложены условия науглероживания металла труб при термическом разложении метана на нагретом пристенном участке трубы. Изложены результаты стендовых исследований, дана аналитическая оценка процесса науглероживания металла. Сформулированы практические выводы и рекомендации.

Ключові слова: газопровод, сварка, водород, наводороживание, науглероживание, математическая модель.

Processes of hydrogenation and carburization of metal that may take place at thermal decomposition of methane on pipe's heated inner surface during in-service welding of gas pipelines are described.

Based on processes of hydrogen dissolving in metal, initiation and development of cracks in pipe steels, a mathematical model of hydrogen diffusion into the metal in case of hydrogen trapping was developed. Solution of the problem was analyzed. Equations for estimating the amount of hydrogen that is excluded from diffusion process as well as the total amount (experimentally measurable) of hydrogen in metal were derived. Kinetics of metal saturation with hydrogen was analyzed.

Conditions for metal carburization during thermal decomposition of methane nearby pipe's heated inner surface are explained. Experimental results of bench tests are provided and analysis of carburization process was given. Practical hints and conclusions were made.

Key words: gas pipeline, in-service welding, hydrogen, hydrogenation, carburization, mathematical model.

Вступ. Основними методами ремонту магістральних газопроводів під тиском газу є контрольоване шліфування або заплавлення поверхневих дефектів, установлення підсилюючих конструкцій (муфт, бандажів).

Раніше [1] було проаналізовано основні ризики і технологічні складнощі при виконанні зварювальних робіт на газопроводах під тиском газу. Описано реакцію металу трубних сталей на термічний цикл зварювання і чутливість низьколегованих трубних сталей до утворення холодних тріщин у зварному з'єднанні. Проаналізовано вплив водню як одного з головних чинників, що впливають на утворення холодних тріщин в металі.

Розглянуто схеми термічного розкладання метану $\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}_{(\text{ТВ.})}$ в пристінній зоні на-

грітої ділянки внутрішньої поверхні труби при проведенні зварювальних робіт на поверхні газопроводів. Термодинамічним аналізом обґрунтовано, що утворюваний при розкладанні метану водень можна розглядати як джерело наводнювання металу зварного з'єднання.

З іншої сторони, наявність вуглецю як продукту термічного розкладання метану на внутрішній поверхні труби при певних температурних умовах може викликати науглецювання металу стінки труби.

Постановка задачі досліджень. Беручи за основу локальне термічне розкладання метану в зоні проведення зварювальних робіт, в рамках даної роботи доцільно дослідити процеси наводнювання і науглецювання металу на локаль-

них ділянках труб, проаналізувати кінетику дифузійних процесів. При цьому слід відмітити, що дифузійні процеси активізуються в металі газопроводів зі значним ступенем фізичного старіння [2]. Проблема окрихнення трубних сталей може корінитися в тому, як водень змінює поведінку металу на нанорівні. В роботі [3] розвивається новий напрям досліджень впливу карбогідридоподібних наносегрегацій на границях зерен на фізико-механічні властивості металевих матеріалів, в тому числі і на технологічний ресурс сталей магістральних газопроводів.

I. Процеси наводнювання. При виконанні зварювальних робіт на газопроводах під тиском газу відбувається інтенсивне тепловідведення від стінки труби на локальній ділянці труби (під дугою) потоком газу. Підвищені швидкості охолодження сприяють формуванню в металі твердих гартувальних структур, чутливих до водневого розтріскування. На рис.1 показано вигляд холодної водневої тріщини.

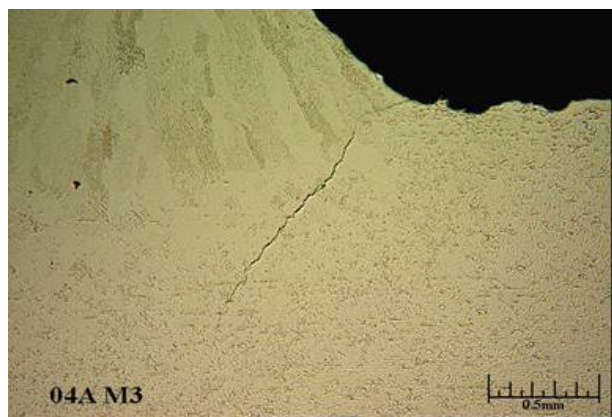


Рисунок 1 – Холодна воднева тріщина на внутрішній поверхні труби в зоні зварювання [4]

Для зон металу зварного з'єднання, які перебувають під ризиком холодних тріщин, необхідно знати поле концентрацій водню в металі, його перерозподіл в металі. При цьому зародження тріщини пов'язують з нерухомим воднем, закріпленим у різних пастках, а розвиток тріщини відбувається з участю дифузійно-рухливого водню.

В загальному випадку для аналізу перерозподілу водню в металі доцільно розв'язати нестационарну задачу дифузії водню, розділивши поглинутий металом водень на дифузійно-рухливий і нерухомий [5].

Диференціальне рівняння дифузії запишемо у вигляді

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} - K \cdot [C(x,t) - C_p],$$

$$t > 0, \quad 0 \leq x \leq \delta, \quad (1)$$

де $C(x,t)$ – концентрація водню в металі;

D – коефіцієнт зернограничної дифузії водню в сталі;

C_p – початкова рівноважна концентрація водню в металі.

Другий член у правій частині рівняння (1) визначає потужність від'ємного джерела водню, пропорційного змінам концентрації водню. Це джерело з характерним кінетичним коефіцієнтом K враховує поглинання дифузійного водню різними “уловлювачами” (пастками) в металі і вилучення його з дифузійного процесу.

Задамо початкову умову

$$C(x,0) = C_p. \quad (2)$$

Виходячи з розв'язку задачі (1) при заданих граничних умовах, можна визначити кількість водню, вилученого з дифузійного процесу і захопленого різними “уловлювачами” (пастками), а саме

$$C^*(x,t) = K \cdot \int_0^t [C(x,t) - C_p] dt. \quad (3)$$

Тоді фактичний, експериментально вимірюваний розподіл водню у пластині складе

$$C^\Sigma(x,t) = C(x,t) + C^*(x,t). \quad (4)$$

Особливості кінетики водневого насичення за наявності стоків підкреслюється виразом для загальної кількості водню в металі як функції часу

$$\Delta m(t) = - \int_0^t D \cdot \frac{\partial C(0,t)}{\partial x} dt. \quad (5)$$

Застосувавши операційний метод [6], вихідне рівняння (1) з початковою умовою (2) перетвориться на звичайне диференціальне рівняння другого порядку (відносно x).

Загальний розв'язок рівняння (5) має вигляд

$$\bar{C}(x,s) - \frac{C_p}{s} =$$

$$= A \cdot \operatorname{ch} \left(\sqrt{\frac{s+K}{D}} x \right) + B \cdot \operatorname{sh} \left(\sqrt{\frac{s+K}{D}} x \right), \quad (6)$$

де $\operatorname{ch} \left(\sqrt{\frac{s+K}{D}} x \right)$ і $\operatorname{sh} \left(\sqrt{\frac{s+K}{D}} x \right)$ – відповідно гіперболічний косинус і синус змінної x .

Постійні коефіцієнти A і B визначаються із заданих граничних умов.

Задамо такі граничні умови, які відбивають специфіку водневого насичення стінки труби.

На внутрішній поверхні труби (при $x = 0$) можна задати граничну умову третього роду

$$\frac{\partial C(0,t)}{\partial x} = h \cdot [C(0,t) - C_n]. \quad (7)$$

Тут C_n – поверхнева (на внутрішній поверхні труби) концентрація водню;

h – коефіцієнт фазового переходу.

Умова (7) враховує зміну в часі концентрації атомарного водню на внутрішній поверхні, що виділяється, наприклад, при термічному розкладанні метану, адсорбується на поверхні і дифундує, головним чином, углиб металу.

На зовнішній поверхні труби (при $x = \delta$) можна задати умову першого роду

$$C(\delta, t) = C_p, \quad (8)$$

у відповідності з якою впродовж усього дифузійного процесу на зовнішній поверхні труби підтримується постійна концентрація C_p , тобто закладається повна десорбція дифузійного водню.

Інша гранична умова

$$\frac{\partial C(\delta, t)}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

передбачає повну непроникність водню через зовнішню поверхню труби. Іншими словами, увесь поглинутий водень залишається в металі впродовж усього дифузійного процесу.

Нижче подається два варіанти розв'язання дифузійної задачі, тобто з різними граничними умовами на зовнішній поверхні труби.

1. Для випадку повної десорбції дифузійного водню з металу, розв'язок задачі (1) з крайовими умовами (2), (7), (8) в зображеннях буде мати вигляд

$$\begin{aligned} \bar{C}(x, s) - \frac{C_p}{s} &= (C_{\Pi} - C_p) \cdot h \cdot \text{sh} \left[\sqrt{\frac{s+K}{D}} (\delta - x) \right] \times \\ &\times \left\{ s \cdot \left[\sqrt{\frac{s+K}{D}} \cdot \text{ch} \left(\sqrt{\frac{s+K}{D}} \delta \right) + h \cdot \text{sh} \left(\sqrt{\frac{s+K}{D}} \delta \right) \right] \right\}^{-1} = \\ &= \frac{\Phi(s)}{\Psi(s)}, \quad (10) \end{aligned}$$

придатний для переходу в простір оригіналів за теоремою розкладання [6]

$$L^{-1} \left[\frac{\Phi_1(s)}{\Psi_1(s)} \right] = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Phi_1(s_n)}{\Psi_1'(s_n)} \exp(s_n t). \quad (11)$$

Опустивши проміжні математичні операції, запишемо розв'язок задачі в оригіналах у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{C(X, \tau) - C_p}{C_{\Pi} - C_p} &= \frac{\beta \cdot \text{sh}[\sqrt{\alpha}(1-X)]}{\sqrt{\alpha} \cdot \text{ch}(\sqrt{\alpha}) + \beta \cdot \text{sh}(\sqrt{\alpha})} - \\ &- \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n^2 \cdot \beta \cdot \sin[\mu_n(1-X)] \cdot \exp[(\mu_n^2 + \alpha) \cdot \tau]}{(\mu_n^2 + \alpha) \cdot [(\mu_n^2 + \beta) \cdot \sin \mu_n - \beta \cdot \mu_n \cdot \cos \mu_n]}. \quad (12) \end{aligned}$$

Тут використано безрозмірні позначення:

$$\tau = \frac{Dt}{\delta^2}; \quad \alpha = \frac{K\delta^2}{D}; \quad \beta = h\delta; \quad X = \frac{x}{\delta}.$$

Корені μ_n визначаються з характеристичного рівняння

$$\text{tg} \mu_n = -\frac{\mu_n}{\beta}. \quad (13)$$

Дослідимо розв'язок задачі (12) при $\beta \rightarrow \infty$.

За цієї умови вираз (12) переписеться так:

$$\begin{aligned} \frac{C(X, \tau) - C_p}{C_{\Pi} - C_p} &= \frac{\text{sh}[\sqrt{\alpha}(1-X)]}{\text{sh}(\sqrt{\alpha})} - \\ &- \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n^2 \cdot \sin[\mu_n(1-X)] \cdot \exp[(\mu_n^2 + \alpha) \cdot \tau]}{(\mu_n^2 + \alpha) \cdot (\sin \mu_n - \mu_n \cdot \cos \mu_n)}. \quad (14) \end{aligned}$$

Для цього випадку характеристичне рівняння (13) набуде вигляду

$$\sin \mu_n = 0, \quad (15)$$

де $\mu_n = n \cdot \pi$.

Одночасно запишемо

$$\cos \mu_n = \cos(n \cdot \pi) = (-1)^n.$$

Остаточо розв'язок задачі при $\beta \rightarrow \infty$ прийме вигляд

$$\begin{aligned} \frac{C(X, \tau) - C_p}{C_{\Pi} - C_p} &= \frac{\text{sh}[\sqrt{\alpha}(1-X)]}{\text{sh}(\sqrt{\alpha})} + \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2\mu_n \cdot \sin[\mu_n(1-X)] \cdot \exp[(\mu_n^2 + \alpha) \cdot \tau]}{(\mu_n^2 + \alpha)}. \quad (16) \end{aligned}$$

Рівняння (16) буде розв'язком задачі при граничній умові першого роду на внутрішній поверхні труби, а саме

$$C(0, t) = C_{\Pi}. \quad (17)$$

Використовуючи рівняння (3) і (16), визначимо кількість водню, вилученого з дифузійного процесу. Отримаємо

$$C^*(X, \tau) = (C_{\Pi} - C_p) \times \left[\frac{\text{sh}[\sqrt{\alpha}(1-X)]}{\text{sh}(\sqrt{\alpha})} - \right. \quad (18)$$

$$\left. - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{2\mu_n^2 \cdot \sin[\mu_n(1-X)] \cdot \left\{ \exp[-(\mu_n^2 + \alpha)\tau] - 1 \right\}}{(\mu_n^2 + \alpha)^2} \right].$$

Фактичний, експериментально вимірюваний розподіл водню у стінці складе

$$\begin{aligned} \bar{C}^{\Sigma}(X, \tau) &= \frac{C^{\Sigma}(X, \tau) - C_p}{C_{\Pi} - C_p} \times \\ &\times \left[\frac{\text{sh}[\sqrt{\alpha}(1-X)]}{\text{sh}(\sqrt{\alpha})} \cdot (1 + \alpha\tau) + \right. \quad (19) \end{aligned}$$

$$\left. + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{2\mu_n \cdot \sin[\mu_n(1-X)] \cdot \left\{ \alpha + \mu_n^2 \exp[-(\mu_n^2 + \alpha)\tau] \right\}}{(\mu_n^2 + \alpha)^2} \right]$$

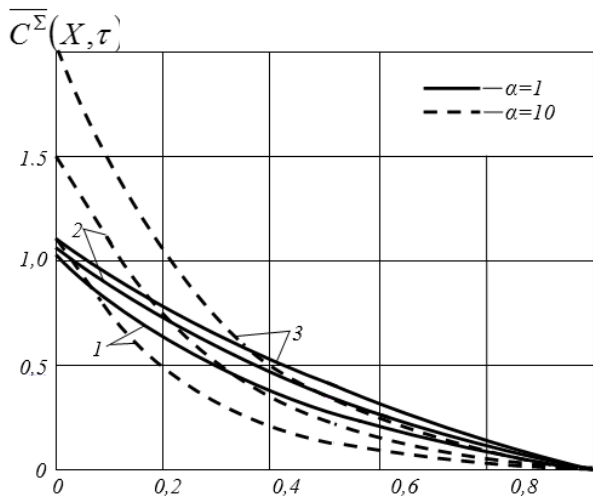
На основі рівнянь (5) і (16) кінетика водневого насичення стінки виразиться так:

$$\begin{aligned} \bar{\Delta m}(\tau) &= \frac{\Delta m(\tau)}{(C_{\Pi} - C_p) \cdot \delta} = \\ &= \frac{\text{ch}(\sqrt{\alpha})}{\text{sh}(\sqrt{\alpha})} \cdot \alpha\tau - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n^2 \cdot \left\{ \exp[-(\mu_n^2 + \alpha)\tau] - 1 \right\}}{(\mu_n^2 + \alpha)^2}. \quad (20) \end{aligned}$$

При $\alpha \rightarrow 0$, розкривши невизначеність у першому члені правої частини (20), отримаємо

$$\bar{\Delta m}(\tau) = \tau - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2} \left[\exp(-\mu_n^2 \tau) - 1 \right]. \quad (21)$$

За результатами розрахунків на рис. 2 побудовано графіки розподілу сумарної концентрації водню (дифузійний і поглинутий пастками) по товщині стінки для різних часів. З рисунка випливає, що ефект “уловлювачів” проявляється зі збільшенням часу дифузії. При цьому зі збільшенням часу нерівномірний розподіл водню в дифузійній зоні посилюється.



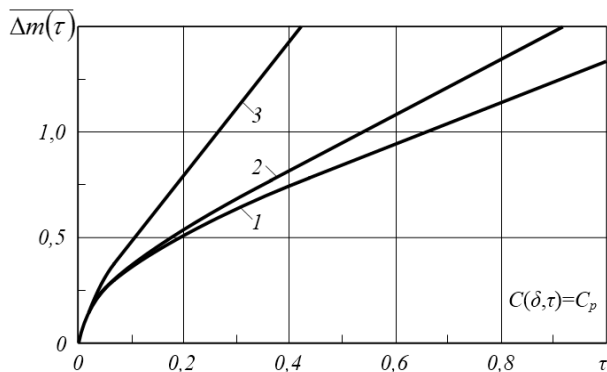
1 – τ=0,01; 2 – τ=0,05; 3 – τ=0,1; 4 – τ=0,05

Рисунок 2 – Розподіл водню по товщині пластини при різних часах

Аналітичні оцінки сумарної концентрації дифузійного водню і водню, вилученого пастками з дифузійного процесу, підтверджуються даними роботи [7] про наводнюваність металу труб газопроводів у процесі тривалої експлуатації.

Експериментальні вимірювання реального потоку водню через стінку труби магістрального газопроводу з допомогою стандартної гліцеринової проби [8] можна трактувати як поглинання дифузійного водню пастками – “уловлювачами”.

Криві (рис. 3) побудовані у відповідності з формулами (20) і (21) свідчать про інтенсифікацію водневого насичення за наявності “уловлювачів”.



1 – α=0; 2 – α=1; 3 – α=10

Рисунок 3 – Інтенсивність насичення металу пластини воднем при умові десорбції водню з металу

2. При граничних умовах (9) і (17), тобто в умовах, коли увесь поглинутий водень залишається в металі стінки, розв’язок задачі в зображеннях матиме вигляд

$$\bar{C}(x, s) - \frac{C_p}{s} = \frac{(C_n - C_p) \cdot \text{ch} \left[\sqrt{\frac{s+K}{D}} (\delta - x) \right]}{s \cdot \text{ch} \left(\sqrt{\frac{s+K}{D}} \delta \right)} = \frac{\Phi(s)}{\Psi(s)} \quad (22)$$

Опускаючи стандартні операції операційного числення при переході в простір оригіналів, розв’язок в безрозмірних величинах задачі матиме вигляд

$$\frac{C(X, \tau) - C_p}{C_n - C_p} = \frac{\text{ch}[\sqrt{\alpha}(1-X)]}{\text{ch}(\sqrt{\alpha})} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n \cdot \cos[\mu_n(1-X)] \cdot \exp[(\mu_n^2 + \alpha) \cdot \tau]}{(\mu_n^2 + \alpha) \cdot \sin \mu_n} \quad (23)$$

У цьому розв’язку корені

$$\mu_n = (2n-1) \cdot \frac{\pi}{2}$$

Кількість водню, вилученого з дифузійного процесу, складе

$$C^*(X, \tau) = (C_n - C_p) \times \left[\frac{\text{ch}[\sqrt{\alpha}(1-X)]}{\text{ch}(\sqrt{\alpha})} \cdot \alpha \tau + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n^2 \cdot \cos[\mu_n(1-X)] \cdot \left\{ \exp[-(\mu_n^2 + \alpha)\tau] - 1 \right\}}{\sin \mu_n \cdot (\mu_n^2 + \alpha)^2} \right] \quad (24)$$

Експериментально вимірюваний розподіл водню у стінці визначиться з рівняння

$$\bar{C}^{\Sigma}(X, \tau) = \frac{C^{\Sigma}(X, \tau) - C_p}{C_n - C_p} \times \left[\frac{\text{ch}[\sqrt{\alpha}(1-X)]}{\text{ch}(\sqrt{\alpha})} \cdot (1 + \alpha \tau) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n \cdot \cos[\mu_n(1-X)] \cdot \left\{ \alpha + \mu_n^2 \exp[-(\mu_n^2 + \alpha)\tau] \right\}}{\sin \mu_n \cdot (\mu_n^2 + \alpha)^2} \right] \quad (25)$$

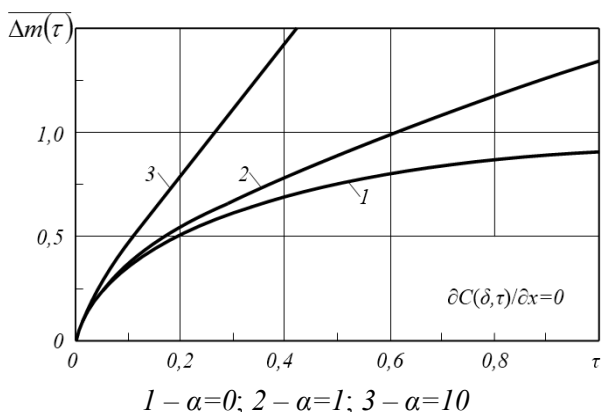
Кінетика водневого насичення металу опишеться формулою

$$\bar{\Delta m}(\tau) = \frac{\Delta m(\tau)}{(C_n - C_p) \cdot \delta} = \frac{\text{sh}(\sqrt{\alpha})}{\text{ch}(\sqrt{\alpha})} \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \tau - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n^2 \cdot \left\{ \exp[-(\mu_n^2 + \alpha)\tau] - 1 \right\}}{(\mu_n^2 + \alpha)^2} \quad (26)$$

При $\alpha \rightarrow 0$

$$\bar{\Delta m}(\tau) = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot \left\{ \exp[-(\mu_n^2 + \alpha)\tau] - 1 \right\}}{\mu_n^2} \quad (27)$$

На рис. 4 показано особливості насичення металу воднем в умовах блокування десорбції водню з металу.



1 – $\alpha=0$; 2 – $\alpha=1$; 3 – $\alpha=10$
Рисунок 4 – Інтенсивність насичення металу пластини воднем при блокуванні дифузії через зовнішню поверхню

Аналізуючи кінетику водневого насичення в умовах як повної блокади десорбції водню з металу (рис. 4), так і при повній його десорбції з металу (рис. 3), можна стверджувати, що при малих значеннях безрозмірного часу τ , інтенсивність насичення практично однакова. При короткочасності дифузійного процесу, пов'язаного з тривалістю існування нагрітої ділянки внутрішньої поверхні труби, вплив пасток-уловлювачів водню практично відсутній. Вплив водневих пасток буде проявлятися при великих значеннях часу.

II. Процес науглецювання. Як відмічалось вище, при проведенні зварювальних робіт на поверхні труб на локальній нагрітій внутрішній ділянці труби може відкладатися вуглець як продукт термічного розкладання метану. При рекомендованих температурах внутрішньої поверхні не вище 983 °С в умовах короткочасного термічного циклу науглецювання металу, якщо і матиме місце, то воно буде незначним.

Інша ситуація складатиметься, якщо температура металу на внутрішній поверхні досягне 1147 °С і вище. За наявності вуглецю на внутрішній поверхні при концентрації приблизно 4,3 % формується рідка плівка евтектичного складу чавуну на локальній ділянці внутрішньої поверхні безпосередньо під зварювальною дугою. Формування рідкої плівки евтектичного складу відповідає аналізу нагрівання залізовуглецевих сплавів за діаграмою стану Fe-Fe₃C [9].

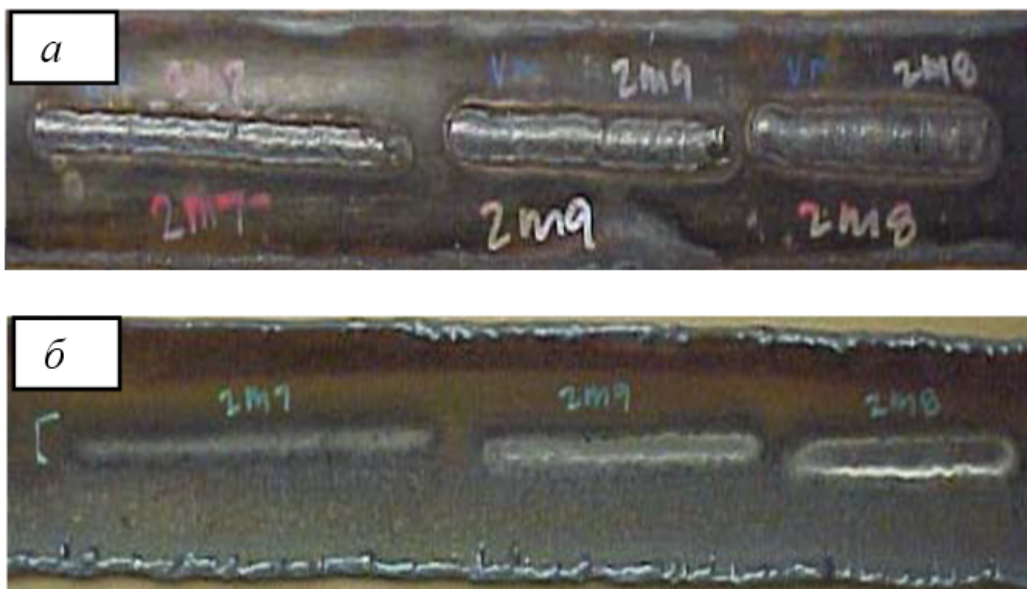
В роботі [10] описано результати стендових досліджень при наплавленнях на трубу, якою транспортується метан. Загальний вигляд наплавлених валиків і нагрітих ділянок на внутрішній поверхні труби показано на рис. 5.

На рис. 6 наведено макроструктуру зварного з'єднання при наплавленні валика на трубу. Стрілкою відмічено ділянку шару евтектичного складу, утвореного безпосередньо під наплавленим валиком.

Мікроструктуру сталі на ділянці зони термічного впливу з новоутвореним шаром на внутрішній поверхні труби наведено на рис. 7. Структури евтектичного складу мають високу твердість і крихкість, а отже, проявляють високу схильність до тріщиноутворення. На рис. 7, б показано тріщину в утвореному шарі евтектичного складу. Зрозуміло, що такі тріщини можуть розвиватися в металі стінки труби.

Для аналітичної оцінки росту шару нової фази можна використати розрахункову схему росту рідкої фази (рис. 8) з монографії Б. Я. Любова [11]. Ріст рідкої фази L здійснюється за рахунок дифузії вуглецю з поверхні і далі, через рідку фазу вуглець буде дифундувати у тверду фазу S .

Тут C_{L0} , $C_{L\gamma}$, $C_{\gamma L}$ – рівноважні концентрації вуглецю на поверхнях розділу фаз, які визначаються з діаграми стану залізо – цементит



товщина стінки 3,2 мм; тиск метану 4,5 МПа; швидкість потоку газу 6,1 м/с

Рисунок 5 – Наплавлені валики на поверхні труби (а) і сліди температурного поля на внутрішній поверхні (б) [10]

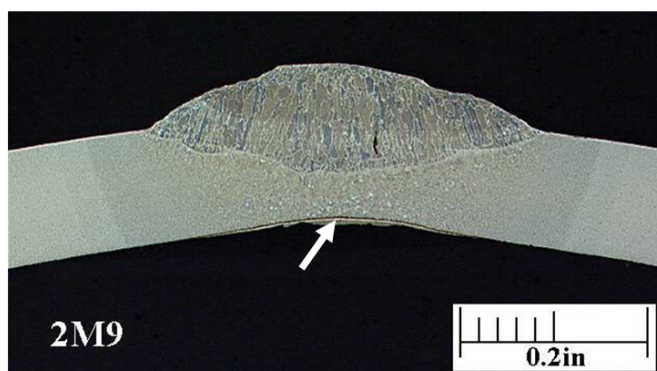


Рисунок 6 – Макроструктура зварного з'єднання при наплавленні валика на поверхню труби [10]

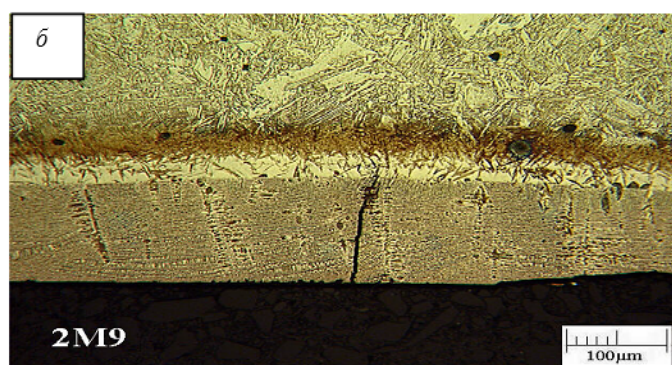
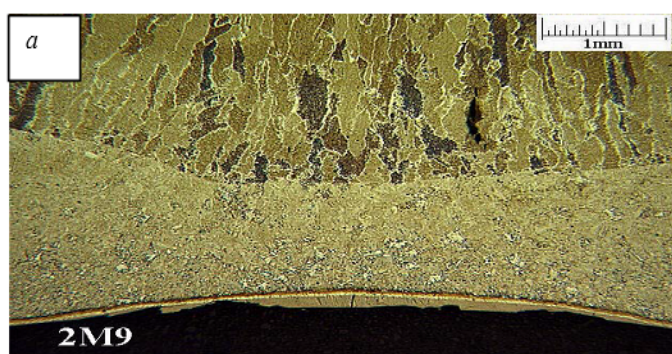


Рисунок 7 – Мікроструктура сталі в зоні термічного впливу (а) з утвореним шаром евтектичного складу на внутрішній поверхні (б) і тріщина в ньому [10]

при заданій температурі T_i на лініях ліквідуса і солідуса (рис. 9); $x = y(t)$ – координата рухомої поверхні шару; C_0 – початковий вміст вуглецю в сталі.

Дифузійне перенесення вуглецю в рідкій і твердій фазах описується рівняннями

$$C_L(x,t) = C_{L0} + (C_{L\gamma} - C_{L0}) \cdot \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_L t}}\right)}{\operatorname{erf}(\beta)};$$

$$C_S(x,t) = C_0 + (C_{\gamma L} - C_0) \cdot \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_S t}}\right)}{\operatorname{erfc}\left(\beta \sqrt{\frac{D_L}{D_S}}\right)}. \quad (32)$$

В наведених рівняннях D_L і D_S – відповідно коефіцієнти дифузії вуглецю в рідкій і твердій фазах.

Координата рухомої границі визначиться з рівняння

$$y(t) = 2\beta \cdot \sqrt{D_L t}, \quad (33)$$

де коефіцієнт β визначається з трансцендентного рівняння

$$(C_{\gamma L} - C_{L\gamma}) \cdot \sqrt{\pi} \cdot \beta = (C_{L\gamma} - C_{L0}) \cdot \frac{\exp(-\beta^2)}{\operatorname{erf}(\beta)} + \sqrt{\frac{D_S}{D_L}} \cdot (C_{\gamma L} - C_0) \cdot \frac{\exp\left(-\beta^2 \frac{D_L}{D_S}\right)}{\operatorname{erfc}\left(\beta \sqrt{\frac{D_L}{D_S}}\right)}. \quad (34)$$

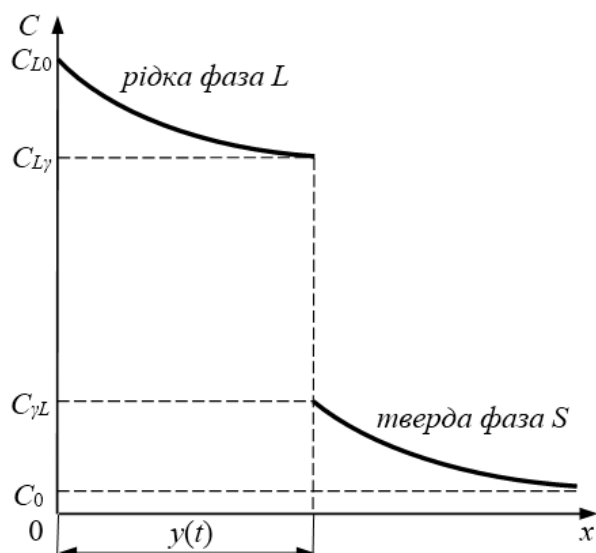


Рисунок 8 – Схема розподілу вуглецю при рості рідкого шару L на поверхні твердої фази S

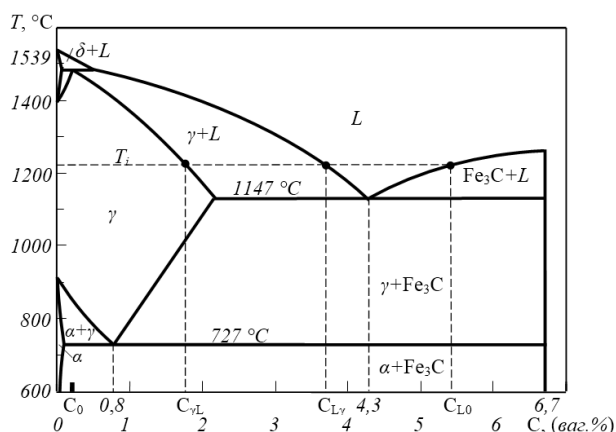


Рисунок 9 – До вибору концентрацій вуглецю на поверхнях розділу фаз при температурі T_i на діаграмі залізо–цементит

Для прикладу розрахуємо розподіл вуглецю в новоутвореному рідкому шарі і твердій фазі в умовах, коли внутрішня поверхня труби нагріється до 1220°C . Прийmemo вихідний вміст вуглецю в сталі $C_0=0,1\%$. З діаграми залізо–цементит (рис. 9) рівноважні концентрації складуть: $C_{L0}=5,4\%$; $C_{L\gamma}=3,7\%$; $C_{\gamma L}=1,8\%$. Коефіцієнти дифузії вуглецю в рідкій і твердій фазах відповідно виберемо: $D_L=2\cdot 10^{-8}\text{ м}^2/\text{с}$, $D_S=1\cdot 10^{-9}\text{ м}^2/\text{с}$.

На рис. 10 побудовано графіки розподілу вуглецю в рідкій і твердій фазах сталі для різних часів існування нагрітої ділянки сталі. Видно, що зі збільшенням часу перебування нагрітої внутрішньої поверхні металу товщина рідкої фази, а отже, і товщина закристалізованого шару евтектичного складу збільшується. При цьому глибина насичення твердої фази вуглецем незначна і нею можна знехтувати.

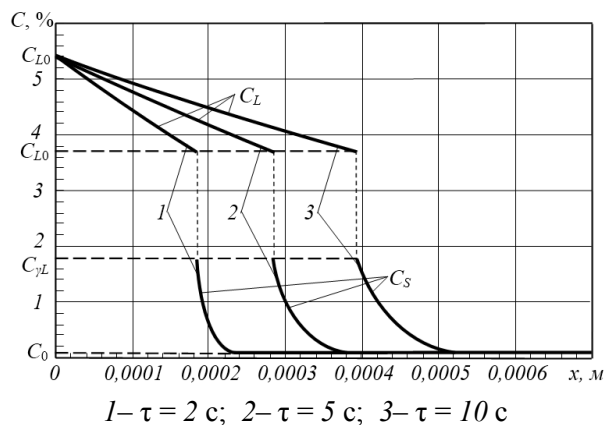


Рисунок 10 – Розподіл вуглецю в рідкій навуглецьованій півці і в твердій фазі по товщині стінки труби

В розглянутому процесі навуглецювання відбувалося в умовах зварювання при наявності потоку метану у трубах. Між тим, за даними роботи [7], на внутрішніх поверхнях газопроводів зі значним терміном експлуатації спостерігаються відкладення сажі (вуглецю) як результату довгого ланцюга хімічних перетворень газу з утворенням вільних радикалів і проміжних продуктів. В цьому зв'язку виникає проблема навуглецювання металу при виконанні ремонтно-зварювальних робіт навіть і за відсутності потоку газу у трубі, тобто на зупиненому трубопроводі. В таких умовах залишкова товщина стінки на ділянці ураження, наприклад корозією, як правило, може не регламентуватися, а зварювальні параметри вибираються такими, щоб уникнути наскрізного пропалення труби.

В загальному необхідно відмітити, що і локальне наводнювання металу, так і навуглецювання сприяють окрихченню сталі.

Висновки

1. При виконанні ремонтно-зварювальних робіт на газопроводах під тиском газу можуть створюватися умови для наводнювання і навуглецювання локальних ділянок труб в результаті термічного розкладання метану за реакцією $\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}$.

2. Запропоновано математичну модель дифузії водню в металі з урахуванням наявності у трубо-провідних сталях пасток для водню, які вилучають його з дифузійного процесу. Показано, що основний приріст вмісту водню в металі стінки труби відбувається при малих часах дифузійного процесу. При цьому роль водневих пасток незначна.

3. Дано аналітичну оцінку кінетики росту шару евтектичного складу на локальній нагрітій ділянці внутрішньої поверхні труби.

4. Ділянки труби, в металі яких відбулося одночасне як наводнювання, так і навуглецювання металу продуктами термічного розкладання метану, можуть бути місцями з підвищеним ризиком тріщино утворення.

5. Враховуючи можливі процеси наводнювання та науглецювання металу трубопроводу, необхідно переглянути рекомендації стосовно вибору режиму зварювання під час ремонту як діючих, так і зупинених трубопроводів. А також, в подальшому, необхідно провести практичні дослідження з виявлення вмісту водню та вуглецю в металі нового трубопроводу та такого, що був в експлуатації.

Література

1 Василик А. В. До проблеми зварювальних робіт на діючих газопроводах. Частина 1 / А. В. Василик, В. Б. Запхляк, М. І. Височан // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2014. – № 2(37). – С. 170–177.

2 Нохрин А. В. Старение сталей труб магистральных газопроводов / А. В. Нохрин, В. Н. Чувильдеев // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2010, 3 5 (2). – С. 171–180.

3 Нечаев Ю. С. О физической проблеме старения, водородного охрупчивания и деградации свойств металлических материалов водородной энергетики и магистральных газопроводов / Ю. С. Нечаев // Четвертая российская конференция “Физические проблемы водородной энергетики”. – С.-Петербург, 26–28 декабря 2007. – С. 1–2.

4 Final Report – R 2269-01R. Pipeline Research Council International, ING. – Appendix A – Welding onto an In-Service Pipeline. – Arlington, Virginia. – August 28, 2006.

5 Павлина В. С. Математическое моделирование процессов реакционного воздействия водорода на сталь парогенерирующих труб / Мелехов Р. К., Василик А. В. // Физ.-хим. механика материалов (ФХММ). – 1984. – № 3. – С. 26–29.

6 Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 2001. – 550 с.

7 Кузюков А. Н. Водородное разрушение сталей в условиях транспортировки природного газа / А. Н. Кузюков, В. А. Борисенко и др. // Тр. V Международ. конф. “Водородная экономика и водородная обработка материалов”. – Донецк, 2007. – Т.2. – С. 861–865.

8 Махненко В. І. Поведение водорода при ремонтной сварке магистральных трубопроводов под давлением / В. І. Махненко, О. І. Олейник, А. П. Пальцевич // Автоматическая сварка. – 2011. – № 9. – С. 5–11.

9 Гуляев А. П. Металловедение, 6-е изд. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

10 Internal Repair of Pipelines Review & Evaluation of Internal Pipeline Repair Trials Report. – EWI Project No. 46211GTH/ Electronic File Name: 41633R47.pdf. – 2004.-108 p.

11 Любов Б. Я. Диффузионные процессы в неоднородных твердых средах. – М.: Наука, 1981. – 295 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
04.11.15*

*Рекомендована до друку
професором **Тимківим Д.Ф.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук **Костівим В.В.**
(УМГ «Прикарпаттрансгаз»,
м. Івано-Франківськ)*