

ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО СТАНУ НАПРУЖЕНОГО МЕТАЛУ З ДЕФЕКТАМИ

© В. Юзевич, 2017

Національний університет „Львівська політехніка, Львів, Україна
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна
Куявсько-Поморська Вища школа, Бидгощ, Польща

Дослідження стосуються якісного моделювання металевого підземного трубопроводу (ПТ) із сталі. Підземний трубопровід моделювали нескінченною трубою з внутрішнім радіусом R_V і зовнішнім R_Z ($d = R_Z - R_V$). Зовнішня поверхня ПТ покрита діелектричним покривом. Між покривом і металом є дефект типу каверни з тріщиною. Каверна і тріщина заповнені розчином електроліту. Тріщину вважаємо не наскрізною.

Сприятлива для корозійного розчинення металу ситуація буде, коли у вершині тріщини під дією внутрішнього тиску p появиться зона пластичних деформацій, яка супроводжується утворенням ювенільної поверхні (ЮП). На ЮП проходить корозійне розчинення, а за її межами утворюється оксидна плівка [1].

Обмежимо розглядом в трубі кільцевих σ_θ , меридіональних σ_m і зсувних напружень $\tau_{m\theta}$. Для аналізу граничного стану у вершині тріщини, який відповідає умові пластичного деформування, розглянемо два варіанти енергетичного критерію за несучою здатністю:

$$(\sigma_\theta)^2 + (\sigma_m)^2 + \sigma_\theta \cdot \sigma_m = (\sigma_T)^2 / 3; \quad \sigma_\theta = pD/(2d); \quad \sigma_m = p\nu D/(2d), \quad (1)$$

$$\sigma_G = \left((\sigma_\theta)^2 + (\sigma_m)^2 - \sigma_\theta \cdot \sigma_m + 3(\tau_{m\theta})^2 \right)^{0.5} \leq |\sigma_D|, \quad (2)$$

де σ_T – межа текучості (плинності) матеріалу труби; ν – коефіцієнт Пуассона; $|\sigma_D|$ – допустиме напруження; σ_G – механічне напруження у потенційно небезпечному місці дефекту, зокрема, у вершині тріщини; (1) – критерій Губера-Мізеса [1], (2) – енергетичний критерій [2]. У співвідношеннях (2) для σ_θ , σ_m враховано, що товщина стінки труби d значно менша діаметра $D=2 R_V$.

У праці [3] розглянуто зміну міцнісних характеристик маловуглецевих низьколегованих трубних сталей залежно від часу експлуатації. Оцінку проведено за критерієм залишкової міцності γ сталі трубопроводу по відношенню до нормативної величини. Величину γ розраховували за наступним співвідношенням [3]:

$$\gamma = \sigma_e / (0,95 \sigma_T K_S), \quad \text{де } K_S = 1 + 2,5 \cdot T \cdot C_h; \quad C_h = C_C + C_{Mn}/6. \quad (3)$$

Тут $C_h = C_C + C_{Mn}/6$ – еквівалент вуглецю; T – час, роки; C_C – концентрація вуглецю; C_{Mn} – концентрація марганцю; σ_e – межа міцності.

Запропоновано критерій граничного стану [3]:

$$[\gamma] \geq 1. \quad (4)$$

Середню швидкість зміни γ оцінювали для періоду T за співвідношенням [3]:

$$V_\gamma = \gamma/T. \quad (5)$$

Температурно-часова залежність стану текучості і хрихкого руйнування, перевірена для металів, жорстких полімерів і низки будівельних матеріалів має вигляд [4, 5]:

$$\tau = \tau_m \exp \left(\frac{U_m - \zeta \cdot \sigma}{RT} \left(1 - \frac{T}{T_m} \right) \right), \quad (6)$$

де τ_m , U_m , T_m , ζ – константи для двох граничних процесів; τ – час; T – температура; σ – номінальне напруження. Всього одна константа ζ залежить від вигляду напруженого стану. Основною константою є початкова енергія активації U_m , яка визначає характер граничного стану під навантаженням. Формула (6) справедлива для статичного навантаження постійним у часі навантаженням, а також для навантаження з постійною швидкістю деформації.

Крім електричних важливими для підземних трубопроводів із металу (сталі) є механічні параметри, зокрема [6]: ударна в'язкість (КСВ) в локальній зоні окрихчення, критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) K_{Ic} , твердість НВ за Брінеллем, границя міцності σ_B і границя плинності σ_T металу труби.

Оскільки матеріальні і часові затрати на експериментальне визначення ударної в'язкості КСВ є набагато меншими від затрат на знаходження критичного КІН, то доцільно для тріщини, заповненої розчином електроліту, визначати коефіцієнт K_{Ic} , застосовуючи емпіричну залежність [6]:

$$K_{Ic} = 0,1 \sqrt{0,1 \frac{E}{1-\nu^2} KCV}, \text{ МПа} \times \text{м}^{0,5}. \quad (7)$$

Для розрахунку коефіцієнтів запасу міцності ділянок магістральних трубопроводів з тріщинами під дією статичного навантаження застосовуємо діаграму оцінки руйнування (ДОР) і двокритеріальний підхід щодо оцінювання міцності матеріалу, що дає можливість одночасно аналізувати два граничні стани – крихкий та в'язкий [6]:

$$Y = f(S_r, K_r), \quad (8)$$

де $K_r = K_1/K_{Ic}$ – коефіцієнт, що характеризує ступінь наближення стану матеріалу до крихкого руйнування в деякій точці зони тріщиноподібного дефекту; K_1 – розрахунковий КІН; $S_r = \sigma_{ref}/\sigma_V$ – параметр, що виражає ступінь наближення стану матеріалу до в'язкого руйнування; σ_V – межа міцності матеріалу; σ_{ref} – довідкове напруження.

Параметри K_r і S_r комплексно враховують характеристики напружено-деформованого стану, форму і розміри дефектів, а також властивості матеріалу, що визначають опір відповідно крихкому та в'язкому руйнуванню. Діаграму руйнування (ДОР) будують у координатах K_r і S_r [6]:

Відоме співвідношення (Kaeshe) для густини струму i_a у вершині тріщини за даними праці [7] має вигляд:

$$i_a = \frac{\alpha \cdot \chi \cdot \Delta \psi_{ak}}{\delta \cdot \ln(c/\delta)}, \quad (9)$$

де α – кут у вершині тріщини; χ – електропровідність електроліту; $\Delta \psi_{ak}$ – омична зміна потенціалу між анодною і катодною частинами; c – глибина тріщини. Вираз (9) записано для тріщини в металі, який не навантажений. В реальних умовах експлуатації елементів конструкцій, зокрема трубопроводів, необхідно враховувати умови корозії під навантаженням (стрес-корозія). Тому співвідношення (9) узагальнено шляхом доповнення його інформацією про механічні параметри та характеристики анодного процесу:

$$i_a = \frac{\alpha \cdot \chi \cdot \Delta \psi_{ak}}{\delta \cdot \ln(c/\delta)} \cdot \left(\exp\left(\frac{DE}{a}\right) \right) \cdot (1 + \beta_W \cdot WPL). \quad (10)$$

Тут β_W – коефіцієнт пропорційності (емпіричний параметр); a – параметр Тафеля анодного процесу; DE – зміна електродного потенціалу для сталі у розчині електроліту для рівнів σ/σ_T навантаження. Співвідношення (10) описує залежність струму анодного розчинення i_a від електрохімічних характеристик вершини тріщини χ , ψ_{ak} , DE , a , геометричних α , δ , c та ефективної енергії пластичного деформування WPL .

Висновки. Розроблено елементи комплексної математичної моделі, в яку входять відмічені в даній праці співвідношення з урахуванням параметрів, що характеризують інформаційне забезпечення граничного стану напруженого металу з дефектами, а також узагальнено співвідношення типу Кеше (10) для моделювання корозійного струму у вершині тріщини на поверхні деформованого металу.

1. Джала Р. Оцінювання параметрів напруженого стану металу трубопроводу з корозійною каверною / Р. Джала, В. Юзевич // Матеріали 5-ї Міжнародної конференції „Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій”. – Львів: 24-27 червня 2014 р. – С. 675-680. 2. Шацький І. П. Деформування підземного трубопроводу в місцях локального руйнування основи / І. П. Шацький, А. Б. Струк // Доповіді Національної академії наук України. – 2009. – № 12. – С. 69-74. 3. Гевлич С. О. Выбор критерия предельного состояния диагностируемых металлоконструкций / С. О. Гевлич, С. А. Пегішева // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия „Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении”. – 2010. – Т. 4, вып. 4, – С. 183-187. 4. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Р. Томашевский. – Л.: Наука, 1974. – 246 с. 5. Потапова Л. Б. Статистический критерий текучести твердых материалов при сложном напряженном состоянии / Л. Б. Потапова, В.П. Ярцев // Вестник ТГТУ. – 2003. – Том 9. № 3. – С. 477-485. 6. Савула Р. С. Оцінка залишкової міцності ділянок магістральних газопроводів з дефектами / Р. С. Савула, Є. В. Харченко, А. О. Кичма // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2012. – № 2(32). – С. 165-166. 7. Джала Р. Моделювання корозійних струмів металу з поверхневим дефектом / Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів / Р. Джала, В. Юзевич // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – Спецвипуск № 11. – С. 47-50.