

## ОЦІНКА ЕТАПУ ВТОМНОГО ЗРОСТАННЯ ТРІЩИНИ ТА МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИЧНОГО РУЙНУВАННЯ НАФТОПРОВОДУ

А.В. Андрусак

ІФНТУНГ, 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
e-mail: public@nung.edu.ua

Показаны характерные области изменения напряженно – усталостного состояния трещины к ее критическому значению, отвечающему моменту разрушения конструкции. Рассмотрены условия, при которых происходит статическое разрушения нефтепровода. Разрушения нефтепровода может произойти при выполнении хотя бы одного из рассматриваемых условий.

It is shown the typical fields of the alteration of stressedly – fatigue state of crack up to the critical value corresponding to the wrack of the structure. The methods leading to statical wrack of pipeline are reviewed. The wrack of pipeline may occur if at least one of the described conditions is followed

Зміна структурного стану металу труб у ході тривалої експлуатації трубопроводів може відбуватися не лише внаслідок процесу старіння, але і через накопичення дефектів у результаті дії впливу напруг та корозійного середовища і водню. Корозійні процеси викликають зміни стану поверхні металу труб, що призводять до утворення дефектів типу корозійних каверн, язв, пітингів тощо.

Для оцінки числа циклів навантаження від моменту зародження тріщини до моменту, коли тріщина стає наскрізною, існують кінетичні діаграми втомного руйнування [1]. Ці діаграми зв'язують між собою швидкість зростання тріщини  $da/dN$  і зміни навантаження за цикл напружено - деформованого стану у вершині тріщини [2]. Оскільки напружено-деформований стан у вершині тріщини описується за допомогою коефіцієнта інтенсивності зусиль  $K_1$  і деформацій  $K_{1e}$ , то кінетичні діаграми втомного руйнування описуються формулами типу

$$\frac{da}{dN} = f_{\sigma}(\Delta K_1) \quad \frac{da}{dN} = f_{\epsilon}(\Delta K_{1e}), \quad (1)$$

де:  $\Delta K_1$  – коефіцієнт інтенсивності зусиль;  
 $\Delta K_{1e}$  – коефіцієнт інтенсивності деформацій.

Загальний вигляд залежностей зображено на рис. 1. На рисунку виділено характерні області зміни напружено-втомного стану тріщини до її критичного значення, що відповідає руйнуванню конструкції. В області  $\Delta K < K_{th}$  тріщина практично не розвивається. Величина  $K_{th}$  є граничним розміром для зростання тріщини. В області  $\Delta K > K_{th}$  тріщина не може існувати, тому що при  $\Delta K = K_{fc}$  відбувається повне руйнування (долом). Величина  $K_{fc}$  є критичним (граничним) розміром для зростання тріщини.

Область  $K_{th} < \Delta K < K_{fc}$  умовно поділяється на три підобласті. У другій підобласті діаграма втомного руйнування добре описується рівняннями Периса – Махутова.

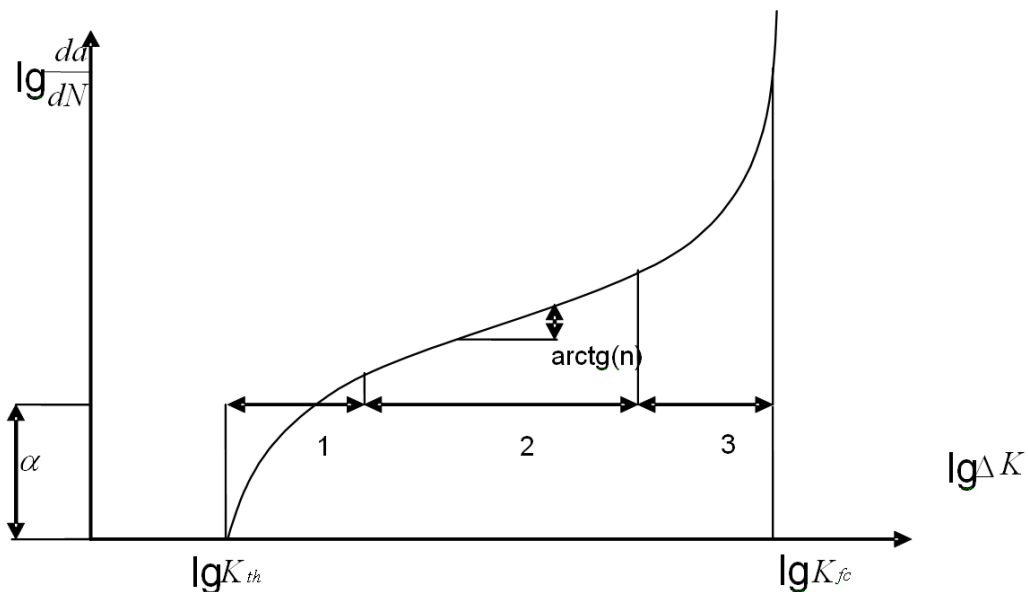


Рисунок 1 – Кінематична діаграма втомного руйнування

Це діаграма залежності швидкості зростання тріщини від зміни навантаження

$$\frac{da}{dN} = C_{\sigma} (\Delta K)^{n_{\sigma}}; \quad \frac{da}{dN} = C_e (\Delta K)^{n_e}; \quad (2)$$

де  $C_{\sigma}, n_{\sigma}, C_e, n_e$  – константи.

У режимі циклічного навантаження основними характеристиками тріщин є параметри:  $C, n_{\sigma}, C_e, n_e$ . Рівняння (2) Периса-Махутова є напівемпіричними і не враховують накопичення пошкоджень, викликаних деформаційним і корозійним старінням матеріалу труби в ході експлуатації.

Відповідно до розрахункової діаграми циклічного руйнування число циклів  $N$  на етапі росту тріщини при циклічному навантаженні визначається за формулою

$$N_P = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C_e (\Delta K_{Ie})^{n_e}}, \quad (3)$$

де:  $a_0$  – вихідна глибина дефекту,

$a_c$  – критична глибина, що задовольняє хоча б одній з умов статичного руйнування.

Статичне руйнування труби відбувається у разі виконання хоча б однієї з таких умов:

1) Середнє умовне зусилля в нетто-перетині досягає межі міцності або текучості металу. Розрахункові опори розтягу (стиску)  $R_1$  і  $R_2$  слід визначати за формулами:

$$R_1 = R_1^H \frac{m}{k_1} k_H; \quad (4)$$

$$R_2 = R_2^H \frac{m}{k_2} k_H,$$

де:  $R_1^H$  – мінімальне значення межі міцності;

$R_2^H$  – мінімальне значення межі текучості;

$m$  – коефіцієнт умов роботи трубопроводу;

$k_1, k_2$  – коефіцієнти надійності за матеріалом;

$k_H$  – коефіцієнт надійності за призначенням трубопроводу.

Для лінійних ділянок трубопроводів, де оболонка перебуває в безмоментному стані, товщина стінки повинна задовольняти умові [3]

$$h \geq n \cdot P_{роб} \frac{D}{2} (R_1 + P_{роб}), \quad (5)$$

де:  $P_{роб}$  – робочий тиск у даній точці трубопроводу з врахуванням висотного рівня траси;

$n$  – коефіцієнт надійності за навантаженням (за внутрішнім тиском);

$D$  – зовнішній діаметр труби.

Ця умова буде виконуватись, якщо значення робочого тиску знаходиться у межах, що описується виразом:

$$P_{роб} \leq 2 \cdot h \cdot \frac{R_1}{n} (D - 2 \cdot h). \quad (6)$$

Окружні (кільцеві) зусилля в трубі  $\sigma_o$  визначаються за формулою

$$\sigma_o = P \frac{(D - 2 \cdot h)}{2 \cdot h}, \quad (7)$$

Ці зусилля повинні задовольняти умові неприпустимості пластичних деформацій у стінці труби:

$$\sigma_o \leq \frac{m \cdot R_2^H}{0.9 \cdot k_H}, \quad (8)$$

З останніх двох виразів випливає ще одне обмеження за робочим тиском:

$$P_{роб} \leq m \cdot 2 \cdot h \cdot \frac{R_2^H}{0.9 \cdot k_H} (D - 2 \cdot h). \quad (9)$$

Для ділянок трубопроводу, що знаходяться в складних умовах залягання, стан навантаження відрізняється від безмоментного.

2) Зародження тріщини у вершині дефекту відбувається після досягнення визначеної дійсної деформації  $e = e_k$ , де гранична деформація  $e_k$  обчислюється за відомим значенням відносного поперечного звуження в момент розірвання металу трубопроводу  $\psi_k$ :

$$e_k = \ln \left( \frac{1}{1 - \psi_k} \right). \quad (10)$$

3) Руйнація труби з тріщиною відбувається у випадку виконання умови руйнування за параметром статичної тріщиностійкості  $\alpha_{тр}$ :

$$\sigma_{CO} = \alpha_{zp} \sigma_B = \frac{Q_C}{h - a} b, \quad (11)$$

де:  $\sigma_{CO} = \sigma_{нетто}$  – зусилля в нетто-перетині в момент руйнування;

$Q_C$  – руйнуюче навантаження;

$b, h$  – відповідно ширина і товщина зразка;

$a$  – загальна глибина надрізу і тріщини.

Параметр  $K_{Ie}$  апроксимується відомою формулою [3] і залежить від співвідношення  $\eta = \frac{a}{h}$ . Зазвичай цей параметр знаходять при значенні  $\eta = 0.5$  і позначають як  $\alpha_{гр0.5}$ .

Руйнування труби з тріщиною за типом нормального відриву відбувається у разі виконання визначеної умови за коефіцієнтом інтенсивності деформацій  $K_{Ie}$ :

$$K_{Ie} = K_{Iec}. \quad (12)$$

Значення  $K_{Ie}$  та значення  $K_{Iec}$  розраховується при  $\sigma_{нетто} = \alpha_{гр0.5} \sigma_B$ ; далі застосовують розрахункові формули:

$$K_{Ic} = 5 \sigma_{брутто} \sqrt{0.5h}, \quad (13)$$

$$P_{ec} = \frac{2 - 0.5(1 - \mu)(1 - \sigma_{нетто})}{1 + \mu}, \quad (14)$$

$$K_{Iec} = \left[ \frac{K_{Ic}}{\sigma_T \cdot l} \right]^{P_{ec}} \quad \text{при } \sigma_{нетто} \leq \sigma_T \cdot l$$

$$K_{Iec} = \left[ \frac{K_{Ic}}{\sigma_T \cdot l} \right]^{P_{ec}} \left[ \frac{\sigma_{нетто}}{\sigma_T \cdot l} \right]^{(1-\mu)(1+\mu)\mu} \quad (15)$$

при  $\sigma_{нетто} > \sigma_T \cdot l$

4) Руйнування труби з тріщиною за умови одночасної дії нормального відриву зсуву (наприклад, для еліптичних і напівеліптичних трі-

щин) можна оцінити за модифікованим енергетичним критерієм руйнування:

$$\frac{G_1}{G_{1c}} + \frac{G_2}{G_{2c}} + \frac{G_3}{G_{3c}} = 1, \quad (16)$$

де:  $G_1, G_2, G_3$  – інтенсивності звільнення енергії деформації труби за відповідних парціальних навантажень;

$G_{1c}, G_{2c}, G_{3c}$  – відповідні питомі роботи руйнування [4]. Інтенсивності вивільнення енергії деформації визначаються в такий спосіб:

$$G_1 = \frac{K_1^2(1-v^2)}{E}; \quad G_2 = \frac{K_2^2(1-v^2)}{E}; \quad G_3 = \frac{K_3^2(1+v^2)}{E}, \quad (17)$$

де:  $E$  – модуль Юнга,  
 $v$  – коефіцієнт Пуассона.

Для оцінки довговічності і залишкового ресурсу зазвичай застосовують гіпотезу лінійного підсумовування ушкоджень. За цією гіпотезою у випадку експлуатації трубопроводів в складному циклічному режимі відбувається накопичення пошкоджень у дефектних місцях. Як тільки у якомусь дефекті функція накопичення пошкоджень дорівнюватиме одиниці, то тут і відбуватиметься розрив труби. Якщо трубопровід підлягає простому циклічному навантаженню, то кількість пошкодження за один рік  $\Pi_1$  визначаються так:

$$\Pi_1 = \frac{N_1}{N_p^*}, \quad (18)$$

де:  $N_1$  – кількість перепадів тиску за цей рік (1/рік);

$N_p^*$  – кількість циклів до руйнуванню (включаючи інкубаційну стадію зародження тріщини), що може витримати труба із заданим дефектом за даного режиму експлуатації.

Якщо трубопровід піддається впродовж року складному навантаженню, тобто присутні навантаження з  $n$  різноманітними значеннями амплітуд коливань тиску, то згідно з гіпотезою лінійного підсумовування ушкоджень, їх сума за рік  $\Pi_{1\Sigma}$  обчислюються за формулою:

$$\Pi_{1\Sigma} = \sum \frac{N_{1i}}{N_{Pi}^*}, \quad (19)$$

де:  $N_{1i}$  – число перепадів тиску кожної амплітуди за цей рік;

$N_{Pi}^*$  – число циклів до руйнування, що може витримати труба із заданим дефектом за даної амплітуди навантажень.

Підраховуючи щорічні ділянки ушкоджень знаходять рік, у якому суми пошкоджень стає рівній одиниці. Очевидно, що ресурс труби закінчується у цьому році.

Час, протягом якого проводиться підсумовування, є ресурсом трубопроводу в розрахунковій точці. При цьому підрахунку використовується коефіцієнт запасу довговічності  $n_N$ .

## Висновок

У даній роботі було виявлено, що зміна структурного стану металу труб у ході тривалої експлуатації трубопроводів може бути пов'язано не тільки з процесом старіння, але і з процесом накопиченням дефектів у результаті дії напруг, впливу корозійного середовища і водню.

## Література

- 1 Іванцов О.М. Надійність магістральних нафтопроводів / Іванцов О.М., Харитонов В.И. – М.: Надра, 1988. – 166 с.
- 2 Катаєв В.П. Розрахунки деталей машин і конструкцій на тривкість і довговічність / Катаєв В.П., Махутов Н.А., Гусенят А.П. – М.: Машинобудування, 1995. – 224 с.
- 3 Курочкин В.В. Методика оцінки статичної тривкості і циклічної довговічності магістральних нафтопроводів / Курочкин В.В. – Уфа.: ВНИИСПТнефть, 1990. – 89 с.
- 4 Болотин В.В. Ресурс машин і конструкцій / Болотин В.В. – М.: Машинобудування, 1990. – 448 с.