

треба здійснювати із врахуванням отриманих результатів і водночас вибирати діаметри із певним запасом, можливих реконструкцій і здійсненням оперативного контролю. І хоча затрати при будівництві будуть більшими, проте це окупиться, оскільки термін експлуатації буде більшим, буде можливість підключення нових споживачів і можливість зміни та збільшення обладнання без додаткової реконструкції системи газопостачання.

1. Гімер Р.Ф., Гімер П.Р. Основи газової динаміки: Навч. посіб. – Івано-Франківськ: Факел, 2000. – 228 с.
2. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. – М.: Недра, 1970. – 216 с.
3. Левин А.М., Смирнов В.А., Черкасова А.Я. Расчет газовых сетей на минимум металла // Газ. пром-сть. – 1966. – № 9. – С. 28-32.
4. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. – М.: Недра, 1975.

УДК 621.673.001.2

ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС ЗМІЦНЕНИХ КОМПОЗИТНИМИ БАНДАЖАМИ ТРУБОПРОВОДІВ З ДЕФЕКТАМИ

Б.В.Конеї, А.М.Найда

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42353
e-mail: korey@nimg.edu.ua, andr@kl.if.ua

Рассматривается оценка малоциклового долго-вечности по критерию зарождения трещины при наличии выявленных диагностикой нетрещиновидных дефектов: вмятин, задиров, рисок – с учётом теоретических коэффициентов концентрации напряжений, приводится расчёт остаточного ресурса по характеристикам трещиностойкости.

The estimation of low cycle longevity is examined on the criterion of origin of crack at the presence of exposed by diagnostics of defects: dents, mechanical damage, draw – taking into account the theoretical coefficients of concentration of stresses, a calculation over of remaining resource is brought by recommendations of crack resistance.

Оцінка малоциклової довговічності за критерієм зародження тріщини

Оцінка малоциклової довговічності виконується за наявності виявлених діагностикою нетрещиноподібних дефектів: вм'ятин, задирів, ризок з врахуванням теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень α_σ [6].

Загальне число циклів до руйнування N складається з двох доданків: N_z – число циклів до зародження тріщини на вершині дефекту; N_p – число циклів на етапі розвитку (росту) тріщини

$$N = N_z + N_p. \quad (1)$$

Число циклів до зародження тріщини визначається рівняннями Коффина-Менсона, які встановлюють взаємозв'язок між амплітудою зміни істинних деформацій у вершині дефекту, механічними характеристиками металу і числом циклів N_p .

Існують два режими навантаження: жорсткий – при постійному розмаху деформацій, м'який – при постійному розмаху напружень.

Дефекту в трубопроводі зазвичай знає зона проміжного режиму навантаження, що знаходиться між крайніми подіями. Тому доцільно вибрати менше (або середнє) число циклів N_z з двох крайніх ситуацій.

Режими циклічного навантаження розрізняються також за симетричністю (коефіцієнтом асиметрії). Коефіцієнтом асиметрії по напруженнях R_σ і деформаціях R_e називаються відношення відповідних величин (напружень і деформацій) у вершині дефекту в моменти мінімального і максимального навантажень в циклі

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}; R_e = \frac{e_{\min}}{e_{\max}}. \quad (2)$$

Максимальні і мінімальні значення істинних напружень в циклах навантаження визначаються за кільцевими напруженнями для максимальних і мінімальних тисків з врахуванням теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень α_σ .

Якщо коефіцієнт асиметрії $R = -1$, то навантаження симетричне. При цьому розтяг чергується зі стиском. Для труб з дефектами характерні циклічні навантаження з початковим коефіцієнтом асиметрії, коли $\sigma_{\min} > 0$. При цьому метал завжди перебуває в стані розтягу. Але можуть бути випадки з від'ємними значеннями R_e і R_σ (переходи під дорогами, підводні переходи та ін.).

Для жорсткого симетричного режиму навантаження число циклів до зародження тріщини N_z визначається за рівнянням

$$e_a = \frac{1}{4} \ln \frac{1}{1 - \psi_e} N_z^{-S_1} + \frac{\sigma_{-1}}{E}, \quad (3)$$

Література

де: e_a – амплітуда істинних деформацій на вершині дефекту;

σ_{-1} – втомне напруження металу при симетричному навантаженні;

E – модуль пружності;

\aleph_1 – показник жорсткого циклічного навантаження.

Параметр \aleph_1 визначається за наближеними формулами

$$\aleph_1 = 0.5 \text{ при } \sigma_\epsilon \leq 700 \text{ МПа};$$

$$\aleph_1 = 0.5 + 0.0002(\sigma_\epsilon - 700) \text{ при } \sigma_\epsilon > 700 \text{ МПа}.$$

Втомне напруження для сталей, що використовуються на нафтопроводах,

$$\sigma_{-1} = 0.47\sigma_\epsilon. \quad (4)$$

Для м'якого симетричного режиму навантаження число циклів визначається з такого рівняння:

$$e_a = \ln \frac{1}{1 - \psi_\epsilon} N_3^{-\aleph_2} + \frac{\sigma_{-1}}{E}, \quad (5)$$

де: e_a, σ_{-1}, E – ті ж самі величини, що і раніше;

ψ_ϵ – відома величина;

\aleph_2 – показник м'якого циклічного навантаження.

Параметр \aleph_2 визначається за наближеною формулою

$$\aleph_2 = 1.2 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_\epsilon} - 0.35. \quad (6)$$

Число циклів N_3 при несиметричному навантаженні можна знайти, виходячи з таких міркувань.

Цикли навантаження характеризуються такими параметрами: e_a – амплітудою деформацій на вершині дефекту; e_{cp} – середньою деформацією. Зі збільшенням кожного з цих параметрів значення N_3 зменшується. Щоб зберегти постійним значення N_3 при збільшенні параметра e_{cp} , треба еквівалентно знизити амплітуду деформацій e_a .

Можна побудувати залежності типу $e_a = f(e_{cp})$ за умови, що $N_3 = const$. Ці залежності мають монотонно спадаючий характер. Приблизно ці значення приймаються лінійними. Похибка такого наближення йде в запас довговічності.

Таким чином, за заданим несиметричним циклічним навантаженням можна приблизно знайти еквівалентне симетричне навантаження, що відповідає однаковому числу циклів N_{cp} .

Виходячи з попередніх міркувань, для визначення N_3 при несиметричному навантаженні необхідно виконати такі операції:

знайти параметри еквівалентного навантаження

$$e'_{cp} = 0; \quad e'_a = \frac{e_a}{1 - \frac{e_{cp}}{e_k}}; \quad (7)$$

за значенням e_a знайти числа циклів N_3 за формулами (3) і (5), що відповідають жорсткому і м'якому навантаженням;

шукане число циклів для труби на етапі зародження тріщини вибрати меншим (або середнім) з отриманих значень.

Значення e_{cp} і e_a для використання формул (7) визначаються так:

$$e_{cp} = (e_{\max} + e_{\min}) / 2; \quad e_a = (e_{\max} - e_{\min}) / 2,$$

де e_{\max}, e_{\min} – відповідно найбільша і найменша деформації на вершині дефекту в процесі циклічної зміни тиску (навантаження).

Розрахунок залишкового ресурсу за характеристиками тріщиностійкості

Залишковий ресурс за характеристиками статичної тріщиностійкості визначається при наявності встановлених діагностикою гострих тріщиноподібних дефектів.

Розрахунок залишкового ресурсу виконується за характеристиками статичної тріщиностійкості при статичному навантаженні, що визначаються у відповідності з ГОСТ 25.506-85 і ГОСТ 1497-84.

Попередньо за даними механічних випробувань на одноосний розтяг обчислюють параметри малоциклової тріщиностійкості

$$\psi_B = \frac{F - F_B}{F}; \quad (8)$$

$$m = -\ln(1 - \psi_B); \quad (9)$$

$$n = 1 + m; \quad (10)$$

$$\epsilon_{ikp} = \frac{\ln(1 + \psi_k)}{\epsilon_{0.2}}; \quad (11)$$

$$C = \frac{1}{2\pi\epsilon_{ikk}^n}, \quad (12)$$

де: ψ_B – коефіцієнт рівномірного звуження перерізу при розтязі;

ψ_k – коефіцієнт відносного звуження при розриві;

F – вихідна робоча площа перерізу взірця;

F_B – площа перерізу в зоні рівномірного звуження;

$\epsilon_{0.2} = 0.002$ – відносна залишкова деформація, яка рівна 0,2%.

Характеристики статичної тріщиностійкості визначаються за результатами циклічних випробувань взірців у відповідності з ГОСТ 25.506-85:

1) руйнівне напруження по максимальній руйнівній силі P_c для взірця з тріщиною

$$\sigma_c = \frac{P_c}{bt}, \quad (13)$$

де: b – ширина взірця;
 t – товщина взірця „брутто”;
 2) ступінь зниження руйнівних напружень від наявності тріщин у взірці при відносній глибині тріщини, рівній $\eta = h/t = 0.5$,

$$\alpha_{TP}^{(0.5)} = \frac{2\sigma_c}{\sigma_{BP}}, \quad (14)$$

де σ_{BP} – тимчасовий опір розтягу;
 3) межа тріщиностійкості для відносної глибини, рівної $\eta = 0.5$,

$$I_c^{(0.5)} = 5\sigma_c \sqrt{h}, \quad (15)$$

де h – повна глибина тріщини на взірці;
 4) руйнуючі кільцеві напруження для бездефектної труби з врахуванням характеристик циклічної тріщиностійкості

$$\sigma_{об} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_{0.2}}{\varepsilon_{0.2}^m} \left(\frac{m}{\sqrt{3}} \right)^m, \quad (16)$$

де $\sigma_{0.2}$ – умовне напруження текучості.
 Допустима товщина тріщини визначається за максимальним усередненим тиском із спільного розв’язку двох функцій, що утворюють рівність

$$K_I = I_c / m_I, \quad (17)$$

де: K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень при максимальному усередненому тиску, МПа $\sqrt{м}$;

I_c – критична тріщиностійкість для допустимої глибини тріщини, МПа $\sqrt{м}$;

m_I – коефіцієнт запасу по критичній тріщиностійкості, що визначається за формулою

$$m_I = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_p} \left(\frac{1 - \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{BP}} \right)^2}{1 - \left(\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{BP}} \right)^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (18)$$

де σ_p – рівень робочих напружень, в даному випадку рівний кільцевим напруженням при максимальному тиску

$$\sigma_p = \frac{P_{\max} D_{вн}}{2t_n}, \quad (19)$$

де: $D_{вн}$ – внутрішній діаметр труби, м;

t_n – товщина стінки, м.

Коефіцієнт інтенсивності напружень визначається за формулою

$$K_I = \sigma_p \sqrt{h} Y(\eta), \quad (20)$$

де $Y(\eta)$ – поліном, що залежить від поточного значення глибини тріщини η . Для взірця типу 5 за ГОСТ 25.506-85

$$Y(\eta) = 1.99 - 0.41\eta + 18.7\eta^2 - 38.48\eta^3 + 53.85\eta^4. \quad (21)$$

Критична тріщиностійкість визначається за формулою

$$I_c = 0.4 I_c^{(0.5)} \frac{\alpha_{TP}}{\alpha_{TP}^{(0.5)}} (1 - \eta) Y(\eta), \quad (22)$$

де α_{TP} – ступінь руйнування при поточному значенні напружень.

$$\alpha_{TP} = 1 - 4\eta(1 - \eta) \left(1 - \alpha_{TP}^{(0.5)} \right). \quad (23)$$

Із спільного розв’язку рівнянь (20) і (22) з врахуванням коефіцієнта m_I у відповідності з рівнянням (17) отримується допустима відносна глибина тріщини η_{mp} .

Критична глибина тріщини визначається для середнього робочого тиску за період, що досліджується. Для цього із спільного розв’язку рівняння (20) і (22) при коефіцієнті запасу по критичній тріщиностійкості m_I , рівному одиниці ($m_I = 1$), визначається відносно значення критичної глибини тріщини $\eta_{кр}$.

Залишковий ресурс визначається за часом росту тріщини від допустимої глибини до критичної при усередненому максимальному тиску перекачки за формулою

$$T_9 = \frac{N_{TP}}{N_p}, \quad (24)$$

де: N_p – розрахункове число циклів перепаду робочого тиску за 1 рік;

N_{TP} – довговічність труб при циклічному навантаженні (в числах циклів), що визначається за формулою

$$N_{TP} = \frac{h_0}{h_{кр}} N_0, \quad (25)$$

де: h_0 – початкова глибина тріщини, що визначається за даними діагностики. У випадку відсутності гострих тріщиноподібних дефектів за даними діагностики початкова глибина тріщини h_0 приймається рівною допустимій глибині тріщини;

N_0 – граничне число циклів навантаження

$$N_0 = \frac{h_{кр} - h_0}{c \left[K_{I\varepsilon}^{(0)} \right]^n}, \quad (26)$$

де коефіцієнт інтенсивності пружнопластичних деформацій

$$K_{I\varepsilon}^{(0)} = \left(\frac{K_I^{(0)}}{\sigma_{0.2}} \right)^{\frac{2}{n+1}}. \quad (27)$$

У формулах (26) і (27):

c, n – параметри тріщиностійкості;

$K_{I\varepsilon}^{(0)}$ – коефіцієнт інтенсивності напружень, що визначається за формулою (20) для максимального усередненого робочого тиску і початкової глибини тріщини.

Граничний допустимий тиск визначається за характеристиками тріщиностійкості, що визначаються при випробуваннях на малоцикловоу тріщиностійкість за формулою

Таблиця 1 — Результати розрахунку довговічності зміщеної бандажем труби з дефектом

x мм	σ_r , МПа			σ_θ , МПа			Умова міцності			N_3 , циклів	T , років
	1	2	3	1	3	1	2	3			
2	-50	-2.8	7.7	800	752	742	-	-	-	312	1.95
4	-50	-5.9	13.4	744	700	680	-	-	-	352	2.2
6	-50	-9.2	17.1	685	643	618	-	-	-	361	2.25
8	-50	-12.8	18.5	619	582	551	-	-	-	383	2.39
10	-50	-16.7	17.5	549	515	481	-	-	-	398	2.49
14	-50	-25.7	7.96	386	362	329	-	-	-	412	2.58
15	-50	-28.3	3.75	341	319	287	-	-	+	414	2.59
16	-50	-30.9	-1.2	293	274	244	-	-	+	419	2.62
17	-50	-33.7	-7.1	242	226	199	+	+	+	424	2.65
0	-50	0	0	851	800	800				306	1.91

$$p_c = \frac{2t}{D_{\text{вн}}} \sigma_{\alpha c}, \quad (28)$$

де $\sigma_{\alpha c}$ – руйнуюче колове напруження для труби з тріщиною.

$$\sigma_{\alpha c} = \alpha_{\text{ТР}} \sigma_{\text{об}} (1 - \eta), \quad (29)$$

де: η – відносна глибина тріщини, що обчислюється за початковою глибиною тріщини, яка приймається рівною допустимій глибині;

$\alpha_{\text{ТР}}$ – ступінь зниження руйнуючих напружень;

$\sigma_{\text{об}}$ – руйнуюче колове напруження для бездефектної труби, що визначається за формулою (16).

Отже, для того, щоб збільшити загальне число циклів до зародження тріщини на вершині дефекту руйнування N_3 , необхідно зменшити значення мінімальних і максимальних колових напружень в трубі. Це досягається шляхом намотки на тіло труби композитного бандажа. Визначимо довговічність зародження тріщини T і число циклів перепаду тисків до зародження тріщини в нафтопроводі внутрішнім радіусом $R_1=132$ мм, зовнішнім радіусом $R_2=140$ мм за наявності ризику шириною 1 мм глибиною 0,5 мм. Проведемо розрахунок при різних значеннях товщин бандажа x , використовуючи методику [1]. Коефіцієнт Пуассона для сталі $\nu_1=0.3$, для бандажа $\nu_2=0.2$, відношення модуля Юнга матеріалу труби до матеріалу бандажа $E_1/E_2=4$, допустиме напруження $[\sigma]=300$ МПа, тиск в трубопроводі $P=50$ МПа, істинні деформації при розриві $\alpha_K=0.323$, відносне рівномірне звуження $\psi_B=12.48\%$, модуль пружності сталі $E=2.1 \cdot 10^5$ МПа, число циклів навантаження за 1 рік $N_2=160$. Результати розрахунку занесемо в таблицю 1, де σ_r , σ_θ – радіальні і колові напруження в трьох вимірних точках (на радіусах R_1 , R_2 , $R_3 = R_2 + x$). В таблиці також вказана умо-

ва міцності, яка свідчить про те, яка мінімальна товщина бандажа, намотана на трубопровід з тріщиною, дозволяє його експлуатацію, тобто за якої сталеві труба з пошкодженнями не поступатиметься за міцністю монолітній трубі без пошкоджень (“+” – не поступатиметься, “-” – поступатиметься).

Отримані числові дані свідчать, що зі збільшенням товщини бандажа зменшуються колові напруження в трубі, а отже збільшується довговічність і число циклів до зародження тріщини у вершині дефекту, що дозволить експлуатувати трубопровід з пошкодженнями значно більший термін.

Література

1. Бородавкін П.П. Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1987.
2. Копей Б.В., Розгонюк В.В., Максимук В., Щербина Н.В., Найда А.М. Зміцнення пошкодженої сталеві труби композитним бандажем: модель і розрахунок // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2003. – № 5(5). – С. 31-36.
3. СНиП 2.04.12-86. Расчёт на прочность стальных трубопроводов. – М.: Изд. стандартов, 1986.
4. Методика определения остаточного ресурса нефтегазопромысловых трубопроводов и трубопроводов головных сооружений. ОСТ 153-39.4-010-2002. – Москва, 2002.
5. Кордонский Х.Б. Приложения теории вероятностей в инженерном деле. – М.-Л.: Физматгиз, 1963. – 434 с.
6. Гумеров А.Г., Ямалеев К.М., Гумеров Р.С., Азметов Х.А. Дефектность труб и методы ремонта / Под ред. А.Г. Гумерова. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1998. – 252 с.