

Т. І. Матченко, Л. Б. Шаміс, Л. Ф. Первушова

*ПАТ «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект»,
просп. Перемоги, 4, Київ, 01135, Україна*

РОЗРАХУНОК НА СТАТИЧНУ МІЦНІСТЬ, ОПІР КРИХКОМУ РУЙНУВАННЮ ТА ЦИКЛІЧНУ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ СТАЛЕВИХ ТРУБОПРОВОДІВ АЕС, НЕ ВАЖЛИВИХ ДЛЯ БЕЗПЕКИ

Розроблено методику розрахункового обґрунтування статичної міцності, опору крихкому руйнуванню та розрахунку на циклічну тріщиностійкість сталевих трубопроводів з тріщинами, що знаходяться в експлуатації на АЕС і належать до систем, не важливих для безпеки.

Ключові слова: тріщиностійкість, міцність, трубопровід.

Вступ

Трубопроводи, що знаходяться в експлуатації на АЕС можна поділити на ті, що належать до систем, важливих для безпеки (СВБ), і ті, що належать до систем, не важливих для безпеки (СНБ). Методи виконання перевірочних розрахунків для трубопроводів СВБ викладено в [1, 2], методи виконання розрахунків трубопроводів СНБ на стійкість і статичну міцність викладено в [3], який чинний на території України. Але формули (18) і (19) [3] містять помилки. В актуальній версії цього документа [8], який чинний у Росії, ці помилки виправлено. Метод виконання розрахунків трубопроводів СНБ на циклічну тріщиностійкість і опір крихкому руйнуванню не викладено в [3, 8].

Мета роботи - викласти співвідношення для розрахунку сталевих трубопроводів АЕС, не важливих для безпеки, що знаходяться в експлуатації, на циклічну тріщиностійкість та опір крихкому руйнуванню.

Основний зміст

Розрахунок на статичну міцність

Надземні (відкриті) трубопроводи слід перевіряти на міцність, поздовжню стійкість і витривалість [10] і на циклічну тріщиностійкість (коливання у вітровому потоці).

Перевірку на міцність надземних трубопроводів слід виконувати виходячи із умови

$$|\sigma_{np}| / (\psi_3 R_y) \leq 1, \quad (1)$$

або за формулою

$$\left(\frac{N}{A_n R_y \gamma_c \psi_3} \right)^2 + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{1,26 W_{n,\min} R_y \gamma_c \psi_3} \leq 1, \quad (2)$$

де ψ_3 – коефіцієнт, який враховує двовісний напружений стан металу труби; при розтягуючих поздовжніх напруженнях уздовж осі труби ($\sigma_{np} \geq 0$) приймаємо таким, що дорівнює одиниці; при стискаючих напруженнях ($\sigma_{np} < 0$) – визначаємо за формулою (з урахуванням, якщо розрахунковий опір $R_y > R_u$, то у формулі (1) замість R_y слід приймати R_u):

$$\psi_3 = \sqrt{1 - 0,75 \left(\frac{\sigma_{кц}}{R_y} \right)^2} - 0,5 \frac{\sigma_{кц}}{R_y}. \quad (3)$$

При розрахунках на витривалість або циклічну тріщиностійкість від динамічних впливів вітру величина R_y зменшується внаслідок добутку на коефіцієнти, що визначаються відповідно до [9].

Розрахунок на опір крихкому руйнуванню

Розрахунок на опір крихкому руйнуванню сталевих трубопроводів, що знаходяться в експлуатації і не важливих для безпеки АЕС, забезпечений у випадку виконання нерівностей за формулами:

© Т. І. Матченко, Л. Б. Шаміс, Л. Ф. Первушова, 2015

у випадку сумісної дії навантажень - маси трубопроводу, ізоляції, арматури та облаштувань, розташованих на трубопроводі, маси і внутрішнього тиску середовища, що транспортується, снігового, вітрового й ожеледного навантаження - за формулами

$$1,12\gamma_u \cdot \gamma_n (\pi \cdot L)^{0,5} \left[\eta \cdot \gamma_{f5(6)} \cdot P_n (\pi \cdot \eta \cdot \gamma_{f5(6)} \cdot P_n \cdot d_{mt}^2 - 2N_u) / (4\pi) \right]^{0,5} / (t_{nom} \cdot \gamma_c [K_{IC}]) \leq 1, \quad (4)$$

$$\left[1,12\gamma_u \cdot \gamma_n (\pi \cdot L)^{0,5} \cdot [168T_u^2 / (\pi^2 \cdot d_{mt}^4)] \right]^{0,5} / (t_{nom} \cdot \gamma_c [K_{IC}]) \leq 1; \quad (5)$$

у випадку сумісної дії навантажень - маси трубопроводу, ізоляції, арматури та облаштувань, розташованих на трубопроводі, впливу попередніх напружень трубопроводу (у тому числі пружного згину за заданим профілем), маси, внутрішнього тиску й температурного впливу середовища, що транспортується, впливу нерівномірних деформацій ґрунтів, снігового, вітрового й ожеледного навантаження - за формулами

$$1,12(\pi \cdot L)^{0,5} \left[\eta \cdot \gamma_{f5(6)} \cdot P_n (\pi \cdot \eta \cdot \gamma_{f5(6)} \cdot P_n \cdot d_{mt}^3 - 2N_u \cdot d_{mt} \pm 8m_s \cdot M_{1y}) / (4\pi \cdot d_{mt}) \right]^{0,5} / (t_{nom} \cdot \gamma_c [K_{IC}]) \leq 1, \quad (6)$$

$$1,12(\pi \cdot L)^{0,5} \left[(\eta \cdot \gamma_{f5(6)} \cdot P_n \cdot 8m_s \cdot M_{2y}) / (4\pi \cdot d_{mt}) \right]^{0,5} / (t_{nom} \cdot \gamma_c [K_{IIIc}]) \leq 1, \quad (7)$$

$$\left[1,12(\pi \cdot L)^{0,5} \cdot [(12T_y^2) / (\pi^2 \cdot d_{mt}^4)] \right]^{0,5} / (t_{nom} \cdot \gamma_c [K_{IIIc}]) \leq 1, \quad (8)$$

у випадку випробувань і пропуску очисних пристроїв, при впливах, що викликають різкі порушення технологічного режиму, тимчасову несправність або руйнування обладнання, сейсмічних впливах (з урахуванням [7]), особливих режимах експлуатації за формулами

$$1,12(\pi \cdot L)^{0,5} \left[N_y \cdot d_{mt} \pm 4m_s \cdot M_{1y} \right]^{0,5} / (\pi \cdot d_{mt}^2 \cdot t_{nom} [K_{IC}]) \leq 1, \quad (9)$$

$$1,12(\pi \cdot L)^{0,5} \left[4m_s \cdot M_{2y} \right]^{0,5} / (\pi \cdot d_{mt}^2 \cdot t_{nom} [K_{IIIc}]) \leq 1, \quad (10)$$

$$1,12(\pi \cdot L)^{0,5} \cdot 12^{0,5} \cdot T_y / (\pi \cdot d_{mt}^2 \cdot t_{nom} \cdot \gamma_c [K_{IIIc}]) \leq 1, \quad (11)$$

де M_{1y} , M_{2y} – відповідно розрахункові, згинаючі моменти симетричні та косиметричні по відношенню до площини тріщини, у розглянутому перерізі трубопроводу від сумісної дії навантажень - ваги трубопроводу, ізоляції, арматури і облаштувань, розташованих на трубопроводі, впливу попередніх напружень трубопроводу (у тому числі пружного згину за заданим профілем), маси, внутрішнього тиску й температурного впливу середовища, що транспортується, впливу нерівномірних деформацій ґрунту, снігового, вітрового навантаження та від ожеледі; L – глибина проникнення тріщини в стінку трубопроводу; $[K_{IC}]$, $[K_{IIc}]$, $[K_{IIIc}]$ – критичні розрахункові значення коефіцієнтів інтенсивності напружень відповідно до нормального відриву (різновид I), поперечного зсуву (різновид II), поздовжнього зсуві (різновид III), відповідно до рис. 1, характеристичні значення яких для прокату з вуглецевих та низьколегованих сталей і труб наведено в табл. 1 - 3; P_n – тиск у трубопроводі; R_u – розрахунковий опір сталі розтягу, стиску і згину за тимчасовим опором, який приймається таким, що має менше значення з двох: на початку експлуатації і на визначений час експлуатації з урахуванням коефіцієнтів надійності відповідно до [3]; R_y – розрахунковий опір сталі розтягу, стиску і згину, за границею текучості, який приймається таким, що має менше значення з двох: на початку експлуатації і на визначений час експлуатації з урахуванням коефіцієнтів надійності відповідно до [3]; γ_n – коефіцієнт надійності за призначенням трубопроводу; γ_u – коефіцієнт надійності для труб і з'єднуючих деталей у розрахунках для сполучення навантажень; γ_c – коефіцієнт умов роботи трубопроводу; η – коефіцієнт несучої здатності труб і деталей з'єднання; γ_{fi} – коефіцієнт надійності за навантаженням; d_{mt} – середній діаметр труби та з'єднуючих деталей; m_s – коефіцієнт інтенсивності напружень; t_{nom} – залишкова товщина стінки труби деталей поєднання на час експлуатації (τ) з урахуванням корозії:

$$t_{nom}(\tau) = t_{nom}(\tau = 0) - y, \quad (12)$$

де y – глибина корозії, яка визначається при обстеженні або приймається за [4].

Значення перелічених умовних позначень приймаються відповідно до [3].

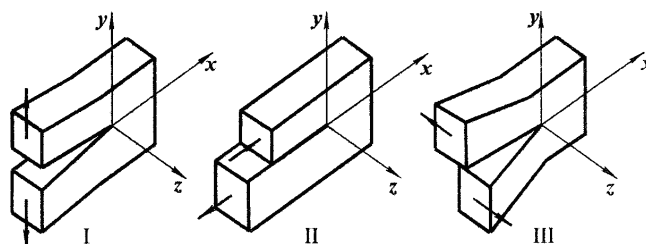


Рис. 1. Різновиди переміщення берегів тріщин і відповідно різновиди руйнувань (I - нормального відриву, II - подовжнього зсуву, III – поперечного зсуву)

Правило визначення допустимих розрахункових значень критичного коефіцієнта інтенсивності напружень для руйнування нормальним відривом $[K_{IC}]$

K_{IC} – характеристичні значення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень для руйнування нормальним відривом з довірчою ймовірністю $\alpha = 0,5$ наведено в табл. 1 для профілів і листів і в табл. 2 і 3 для труб. Механічні характеристики основного металу на початку експлуатації для марок конструкційних сталей, за значеннями яких визначається витривалість і циклічна тріщиностійкість, визначених з довірчою ймовірністю $\alpha = 0,5$, наведено в табл. 1. Значення коефіцієнтів в'язкості руйнування (критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень) нормального відриву (K_{IC}) з довірчою ймовірністю $\alpha = 0,5$ на початку експлуатації ($t = 0$) сталей, що використовуються в трубах діаметром D від 60 до 530 мм, наведено в табл. 2. Значення коефіцієнтів в'язкості руйнування (критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень) нормального відриву (K_{IC}) сталей з довірчою ймовірністю $\alpha = 0,5$ на початку експлуатації ($t = 0$), що використовуються в трубах великого діаметра, наведено в табл. 3.

Таблиця 1

Марка сталі	Товщина прокату, мм	Відносне подовження після розриву A, %	Відносне звуження після розриву Z, %	В'язкість руйнування K_{IC} , МПа·м ^{1/2}	Поріг напруженості K_{th} , МПа·м ^{1/2}	Циклічна тріщиностійкість K_{cf} , МПа·м ^{1/2}
10	Від 4 до 20	24	62,2	105	8,4	67
20	-/-	21	60,4	117	9,4	71
35	-/-	17	58,0	134	11,0	77
45	-/-	14	55,0	144	11,5	78
10Г2	-/-	21	60,4	140	11,2	85
20Х	-/-	16	57,0	103	8,2	58
40Х	-/-	9	47,5	80	6,4	40
30ХГСА	-/-	11	51,5	60	4,8	31
15ХМ	-/-	21	60,4	132	10,5	80
30ХМА	-/-	13	54,0	120	9,6	64
12ХН2	-/-	14	55,0	103	8,2	56
Ст1кп	-/-	23	61,5	82	6,5	51
Ст1пс	-/-	23	61,5	82	6,5	51
Ст1сп	-/-	23	61,5	85	6,8	53
Ст2кп	-/-	22	60,9	72	5,7	44
Ст2пс	-/-	22	60,9	74	5,9	45
Ст2сп	-/-	22	60,9	120	9,6	74
Ст3кп	-/-	20	60,0	93	7,4	56
Ст3пс	-/-	18	59,0	120	9,6	70
Ст3сп	-/-	18	59,0	80	6,4	46
Ст4кп	-/-	18	59,0	85	6,8	47
Ст4пс	-/-	18	59,0	85	6,8	47
Ст4сп	-/-	18	59,0	115	9,2	67

ВСт2кп	-/-	22	60,9	72	5,7	44
ВСт2пс	-/-	22	60,9	74	5,9	45
ВСт2сп	-/-	22	60,9	74	5,9	45
ВСт3кп	-/-	20	60,0	93	7,4	56
ВСт3пс	-/-	18	59,0	80	6,4	46
ВСт3сп	-/-	18	59,0	80	6,4	46
Ст5сп	-/-	17	58,0	131	10,5	75
Ст6сп	-/-	14	55,0	150	12,0	82
08Ю	-/-	18	59,0	74	5,9	43
08сп	-/-	18	59,0	74	5,9	43
08кп	-/-	18	59,0	74	5,9	43
08	-/-	18	59,0	74	5,9	43
10кп	-/-	15	56,0	71	5,7	40
10пс	-/-	15	56,0	71	5,7	40
15кп	-/-	14	55,0	80	6,4	43
15пс	-/-	14	55,0	80	6,4	43
15	-/-	14	55,0	80	6,4	43
20кп	-/-	14	55,0	80	6,4	43
20пс	-/-	14	55,0	80	6,4	43
22ГЮ	-/-	15	56,0	100	8,0	56

Таблиця 2

Марка сталі за ГОСТ 10705-80	Товщина стінки труби, мм	D від 60 до 152 мм	D від 152 до 244,5 мм	D від 244,5 до 377 мм	D від 377 до 530 мм
08сп, 08кп, 08	6 і менше	89	-	-	-
10кп, 10пс, 10	більше 6	-	86	86	86
Ст1кп, Ст1пс	6 і менше	103	-	-	-
Ст1сп,	6 і менше	99	-	-	-
Ст2кп, 20	більше 6	-	86	86	86
Ст2кп, 20	6 і менше	116	-	-	-
Ст2пс, Ст2сп	6 і менше	115	-	-	-
Ст2пс, Ст2сп	більше 6	-	89	89	92
15кп, 15пс, 15, 20пс, 20кп, 20	6 і менше	133	104	104	115
15кп, 15пс, 15, 20пс, 20кп, 20	більше 6	-	96	96	99
Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп	6 і менше	128	196	106	112
Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп	більше 6	-	96	96	96
Ст4кп, Ст4пс, Ст4сп	6 і менше	143	119	127	130
Ст4кп, Ст4пс, Ст4сп	більше 6	-	102	107	111
22ГЮ	усі розміри	120	120	120	120

Таблиця 3

Марка сталі за ГОСТ 8731-74	Характеристичні значення (K_{IC}), МПа·м ^{1/2}	Марка сталі за ГОСТ 8731-74	Характеристичні значення (K_{IC}), МПа·м ^{1/2}	Марка сталі за ГОСТ 8731-74	Характеристичні значення (K_{IC}), МПа·м ^{1/2}
10	127	10Г2	168	30ХМА	144
20	141	20Х	124	12ХН2	124
35	161	40Х	97	Ст4сп	138
45	173	30ХГСА	74	Ст5сп	158
15ХМ	160	-	-	-	-

У свою чергу $K_{IIC} \approx 2 \times K_{IC}$, $K_{IIC} \approx 3 \times K_{IC}$.

Розрахункові значення $[K_{IC}]$ і $[K_{III}]$ визначаються за формулами

$$[K_{IC}] = K_{IC} \cdot F(T - T_k + \Delta T) / \gamma_i, \quad (13)$$

$$[K_{II}] = K_{II} \cdot F(T - T_k + \Delta T) / \gamma_i, \quad (14)$$

$$[K_{III}] = K_{III} \cdot F(T - T_k + \Delta T) / \gamma_i, \quad (15)$$

де γ_i – коефіцієнт надійності, значення якого залежить від розрахункового випадку. Для нормальних умов експлуатації $i = 1$, $\gamma_i = 1,2$; для порушення нормальних умов експлуатації (ПНУЕ) $i = 2$, $\gamma_i = 1,15$; для аварійної ситуації (АС) $i = 3$, $\gamma_i = 1$. $F(T - T_k + \Delta T)$ – функція залежності $[K_{IC}]$, $[K_{II}]$, $[K_{III}]$ від температури (T) експлуатації і від температури в'язко-крихкого переходу (T_k).

Для конструкційних сталей

$$F(T - T_k + \Delta T) = (1 + 2,27 \cdot e^{0,02[T - T_k + \Delta T]}) / 3,72. \quad (16)$$

Для нормальних умов експлуатації (НУЕ) $\Delta T = +300$ °С; для порушення нормальних умов експлуатації (ПНУЕ) $\Delta T = +30$ °С; для АС $\Delta T = 0$ °С.

Критична температура крихкості сталей визначається за формулою

$$T_k = T_{k0} + \Delta T_t + \Delta T_N + \Delta T_F, \quad (17)$$

де T_{k0} – критична температура крихкості сталі на початку експлуатації. Для приведених співвідношень і значень K_{IC} в табл. 2 приймаємо $T_{k0} = 0$; ΔT_t – додатковий зсув критичної температури крихкості внаслідок температурного старіння сталі, при температурах $T = +250-350$ °С допускається приймати $\Delta T_t = 0$; ΔT_N – додатковий зсув критичної температури крихкості внаслідок циклічного пошкодження; ΔT_F – додатковий зсув критичної температури крихкості сталі внаслідок впливу нейтронного опромінення.

Допускається визначати ΔT_N за формулою

$$\Delta T_N = 20 \sum m_i N_i / [N_i], \quad (18)$$

де N_i – кількість циклів навантаження при i -му режимі експлуатації; $[N_i]$ – допустима кількість циклів навантаження при i -му режимі експлуатації; m – кількість режимів експлуатації.

Допускається визначати значення ΔT_F за формулою

$$\Delta T_F = A_F (F / F_0)^{1/3}, \quad (19)$$

Формула справедлива в межах $10^{22} \leq F \leq 3 \cdot 10^{24}$ нейтрон/м², де A_F – коефіцієнт радіаційного окрихчування, °С; F – флюенс нейтронів з $E \geq 0,5$ МеВ, нейтрон/м²; $F_0 = 10^{22}$ нейтрон/м².

Розрахунок трубопроводів на циклічну тріщиностійкість

Під живучістю трубопроводу з тріщиною розуміють довговічність від миті зародження першої макроскопічної тріщини втомі в зоні сплавлення металу розміром від 0,2-0,5 мм та можливе подальше її зростання до критичної довжини (L_K), при якій відбувається остаточне руйнування зварного з'єднання (крихке руйнування).

При розрахунках на довговічність або за другою групою критичних станів умова крихкого не руйнування елемента конструкції з тріщиною визначається залежностями:

$$\begin{aligned} K_I &\leq K_{CI}, \quad K_{II} \leq K_{CII}, \quad K_{III} \leq K_{CIII}, \\ \left((K_I / K_{CI})^2 + (K_{II} / K_{CII})^2 + (K_{III} / K_{CIII})^2 \right)^{0,5} &\leq 1, \\ \left((K_I / K_{CI})^2 + (K_{III} / K_{CIII})^2 \right)^{0,5} &\leq 1, \\ \left((K_{II} / K_{CII})^2 + (K_{III} / K_{CIII})^2 \right)^{0,5} &\leq 1, \\ \left((K_I / K_{CI})^2 + (K_{II} / K_{CII})^2 \right)^{0,5} &\leq 1, \end{aligned} \quad (20)$$

де K_I , K_{II} , K_{III} – коефіцієнти інтенсивності напруг відповідно для тріщин нормального відриву, поперечного і поздовжнього зсуву;

K_{CI} , K_{CII} , K_{CIII} – характеристичні значення критичних коефіцієнтів інтенсивності напруг відповідно для тріщин нормального відриву, поперечного і поздовжнього зсуву.

При розрахунках на визначення ресурсу, або за другою групою критичних станів (зокрема в розрахунках на крихку міцність) слід користуватися розрахунковими значеннями критичних коефіцієнтів інтенсивності напруг.

Розрахункові значення критичних коефіцієнтів інтенсивності напруг визначаються залежностями:

$$[K_{CI}] = K_{CI}/\gamma, [K_{CII}] = K_{CII}/\gamma, [K_{CIII}] = K_{CIII}/\gamma, \quad (21)$$

де $[K_{CI}]$, $[K_{CII}]$, $[K_{CIII}]$ – розрахункові значення критичних коефіцієнтів інтенсивності напруг; γ – коефіцієнт надійності.

Тріщина, яка виникає внаслідок несиметричного згину по відношенню до тріщини трубопроводу переважно є тріщиною поперечного зсуву і вона характеризується коефіцієнтами інтенсивності напруг K_{II} :

$$K_{II} = \tau(\pi \cdot L)^{0.5} Y_2, \quad (22)$$

$$Y_2 = \sin(\alpha/2)/[1 + \sin^2(\alpha/2)]. \quad (23)$$

Тріщина, яка виникає внаслідок кручення трубопроводу переважно є тріщиною поздовжнього зсуву і вона характеризується коефіцієнтами інтенсивності напруг K_{III} :

$$K_{III} = \tau(\pi \cdot L)^{0.5} Y_3, \quad (24)$$

$$Y_3 = [2/(\pi \cdot \alpha) \cdot \operatorname{tg}(\pi \cdot \alpha/2)]^{0.5}, \quad (25)$$

$$\alpha = 2L/B, \quad (26)$$

де τ – дотичні напруження в зоні виникнення тріщини, МПа; L – довжина тріщини, м; B – товщина листа або стінки профілю, м.

Для навантажень трубопроводу поздовжньою силою або симетричними по відношенню до тріщини згинальними моментами тріщина, що виникла, переважно є тріщиною нормального відриву, і вона характеризується коефіцієнтами інтенсивності напруг K_I .

Умова незростання тріщини нормального відриву при циклічному навантаженні визначається залежністю

$$K_I \leq K_{thI}, \quad (27)$$

де K_{thI} – поріг циклічної тріщиностійкості для тріщини нормального відриву.

Умова незростання тріщини поперечного і поздовжнього зсуву при циклічному навантаженні визначається залежністю

$$K_{II} \leq K_{thII}, \quad (28)$$

$$K_{III} \leq K_{thIII}, \quad (29)$$

де K_{thII} – поріг циклічної тріщиностійкості для тріщини поперечного зсуву; K_{thIII} – поріг циклічної тріщиностійкості для тріщини поздовжнього зсуву.

Умова стаціонарного (не прискореного) циклічного зростання тріщини нормального відриву визначається залежністю

$$K_I \leq K_{cfl}, \quad (30)$$

де K_{cfl} – межа циклічної тріщиностійкості для тріщини нормального відриву.

Умови стаціонарного (не прискореного) циклічного зростання тріщини поперечного або поздовжнього зсуву визначаються залежностями

$$K_{II} \leq K_{cflII}, \quad (31)$$

$$K_{III} \leq K_{cflIII}, \quad (32)$$

де K_{cII} – межа циклічної тріщиностійкості для тріщини поперечного зсуву; K_{cIII} – межа циклічної тріщиностійкості для тріщини поздовжнього зсуву.

Для визначення тріщиностійкості треба, насамперед, визначити з якою швидкістю може підростати тріщина і коли (через яке число циклів навантаження) вона сягне критичного розміру. За швидкість зростання тріщини втомленості (ШЗТВ) приймають змінну довжину (l) тріщини за один цикл обтягування (навантаження) dL/dN . Ця величина характеризує опір поширюванню тріщини втомленості (ТВ).

Загалом напруження в околі вістря тріщини повністю визначається значенням напруженості тріщини коефіцієнтами інтенсивності напружень трьох різновидів K_I , K_{II} , K_{III} (нормального відриву; поперечного зсуву; поздовжнього зсуву). Дослідно встановлено, що ШЗТВ є функцією коефіцієнтів інтенсивності напружень K_i відповідного різновиду. Графік цієї функції в логарифмічній системі координат називають кінетичною діаграмою втомного руйнування. Ця діаграма являє собою S-подібну криву, яка розташована між пороговою напруженістю тріщини K_{th} і межею циклічної тріщиноотривкості K_{cf} .

Порогове значення K_{th} відповідає такому найбільшому значенню K_{max} (або ΔK_{th}), МПа·м^{1/2}, за якого тріщина не зростає протягом 10⁶ циклів і збільшення якого на 3 % спричиняє зростання її зі швидкістю, що не перевищує 3·10⁻⁷ мм/цикл. Як правило, K_{th} (ΔK_{th}) визначають за умови $dL/d \cdot N < 10^{-8}$ мм/цикл. Величина K_{cf} характеризує циклічну тріщиноотривкість.

Значення коефіцієнтів K_{CI} , K_{CII} , K_{CIII} , K_{thI} , K_{thII} , K_{thIII} , K_{cfI} , K_{cfII} , K_{cfIII} приймаються за результатами випробувань зразків, узятих із конструкцій труби або фасонки. Зразки повинні містити в собі елемент, в якому утворилося тріщина.

Для металу труби або фасонки значення коефіцієнтів K_{CII} , K_{CIII} , K_{cfII} , K_{cfIII} можна вирахувати за наближеними залежностями

$$K_{CII} \approx 3K_{CI}, K_{CIII} \approx 2K_{CI}, \quad (33)$$

$$K_{cfII} \approx 0,6(0,7 + 0,3A/0,2)K_{CII}, K_{cfIII} \approx 0,6(0,7 + 0,3A/0,2)K_{CIII}, \quad (34)$$

де A – відносне видовження зразка з металу після його розриву;

Коефіцієнти $K_{thI} = K_{thII} = K_{thIII}$ (вираховуються за даними табл. 4) і за формулою

$$K_{thI} = 0,1K_{CI} / S_1 \quad (35)$$

Таблиця 4

Характеристика оброблення поверхні елемента конструкції	Висота нерівностей поверхні, мкм	Значення коефіцієнта S_1
Полірування	0,5 - 1,0	1
Чистове шліфування	1,5 - 2,0	1,0625
Шліфування	2,5 - 5,0	1,125
Чистове обточування, прокат	5,5 - 10,5	1,25
Грубе обточування, корозійні плями	10,5 - 30,0	1,5
Стругання, корозійне лущення	35,0 - 80,0	2,0

Для трубопроводів, що тривалий час експлуатуються, і у випадку, коли відбулося старіння сталі, значення відносного подовження зразка після його розриву $A(t)$ можна визначити за його твердістю за Віккерсом (HV) за методикою, викладеною в роботі [6].

Кінетичну діаграму втомного руйнування показано на рис. 2.

Діаграма має три характерні ділянки. На ділянці 1 амплітуди нормальних або дотичних напружень і ШЗТВ невеликі ($0 < dL/dN < 5 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл); на цій ділянці $\Delta K < K_{th}$. Середня ділянка 2 має вигляд прямої лінії і відповідає помірним значенням ШЗТВ ($10^{-5} < dL/dN < 10^{-3}$ мм/цикл). Для ділянки 2 швидкість зростання тріщини з достатньою точністю визначається залежністю:

для тріщин нормального відриву:

$$dL/dN = C_1 [\Delta K_I / (1 - R_1)^{0.5}]^{n_1}, \quad (36)$$

для тріщин поперечного зсуву:

$$dL/dN = C_2 [\Delta K_{II} / (1 - R_2)^{0.5}]^{n_2}, \quad (37)$$

для тріщин поздовжнього зсуву:

$$dL/dN = C_3 [\Delta K_{III} / (1 - R_3)^{0.5}]^{n_3}, \quad (38)$$

де $n_1 \approx 4,52 - 0,01K_{CI} \cdot S$, $n_2 \approx 4,52 - 0,01K_{CII} \cdot S$, $n_3 \approx 4,52 - 0,01K_{CIII} \cdot S$,
 S – коефіцієнт який дорівнює 1 і виміряється в $1/\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

$$R_1 = K_{I,\min} / K_{I,\max}, \quad (39)$$

$$R_2 = K_{II,\min} / K_{II,\max}, \quad (40)$$

$$R_3 = K_{III,\min} / K_{III,\max}, \quad (41)$$

$$\Delta K_I = K_{I,\max} - K_{I,\min}, \quad (42)$$

$$\Delta K_{II} = K_{II,\max} - K_{II,\min}, \quad (43)$$

$$\Delta K_{III} = K_{III,\max} - K_{III,\min}. \quad (44)$$

При відсутності експериментальних даних у першому приближенні можна прийняти

$$C_1 = (10^{-3} - 10^{-5}) / (K_{cfl} - K_{thI})^{n_1}, \quad (45)$$

$$C_2 = (10^{-3} - 10^{-5}) / (K_{cflI} - K_{thII})^{n_2}, \quad (46)$$

$$C_3 = (10^{-3} - 10^{-5}) / (K_{cflII} - K_{thIII})^{n_3}, \quad (47)$$

де C_1, C_2, C_3 – коефіцієнти, що вимірюються в $(\text{мм}/\text{цикл})/(\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2})^n$; $K_{thI}, K_{thII}, K_{thIII}$ вимірюються в $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; $10^{-3} - 10^{-5}$ – діапазон швидкостей зростання тріщини для другої ділянки на діаграмі втомного руйнування поздовжнього зсуву, мм/цикл.

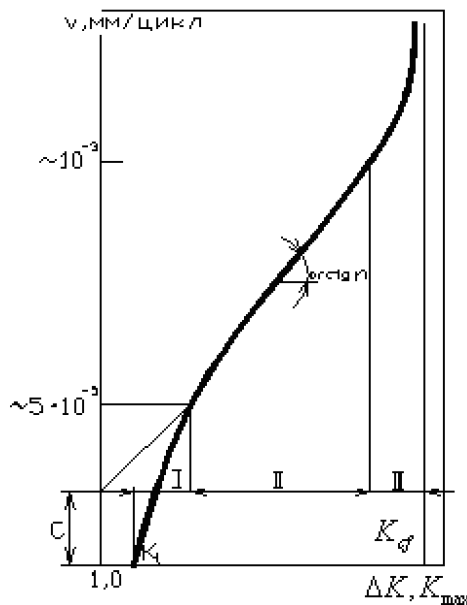


Рис. 2. Кінетична діаграма втомного руйнування (циклічного зростання тріщини) нормального відриву

Коефіцієнти інтенсивності напруг $K_{III,\max}, K_{III,\min}$ можна вирахувати за формулами

$$K_{III,\min} = (\tau_{\min} + \tau_{зал})(\pi \cdot L)^{0.5} Y_K, \quad (48)$$

$$K_{III,\max} = (\tau_{\max} + \tau_{зал})(\pi \cdot L)^{0.5} Y_K, \quad (49)$$

де $\tau_{зал}$ – залишкові напруження у зварному з'єднанні, МПа; Y_K – функція форми тріщини, яка визначається відповідно до формули

$$Y_K = 1,12 - 1,4b + 7,33b^2 - 13,08b^3 + 14b^4, \quad (50)$$

де $b = L/B$, B – товщина стінки фасонки або труби з урахуванням корозії.

На високоамплітудній ділянці номер III ШЗВТ різко зростає при

$$K_{сI} < \Delta K \leq \Delta K^*, \quad (51)$$

$$K_{сII} < \Delta K \leq \Delta K^*, \quad (52)$$

$$K_{сIII} < \Delta K \leq \Delta K^*, \quad (53)$$

де $\Delta K^* = \Delta K_{сI}$, або $\Delta K^* = \Delta K_{сII}$, або $\Delta K^* = \Delta K_{сIII}$. При $\Delta K = \Delta K_{сI}$, або $\Delta K = \Delta K_{сII}$, або $\Delta K = \Delta K_{сIII}$ припиняється циклічне збільшення довжини тріщини і вона переходить у неконтрольоване лавиноподібне руйнування фасонки або труби.

Спрощено можна всю діаграму втомного руйнування подати у вигляді похилої прямої лінії в логарифмічних координатах, обмеженої значеннями порогового і критичного розмаху ΔK . Кількість циклів навантаження до руйнування для тріщин нормального відриву визначається залежністю

$$N = 2(1 - R_1)^{n/2} (L_0^{1-n/2} - L_{k1}^{1-n/2}) / [C_1(n-2)(\Delta\sigma \cdot Y_1)^n \pi]. \quad (54)$$

Для тріщин поперечного або поздовжнього зсуву кількість циклів навантаження до руйнування визначається залежністю

$$N = 2(1 - R_2)^{n/2} (L_0^{1-n/2} - L_{k2}^{1-n/2}) / [C_2(n-2)(\Delta\sigma \cdot Y_2)^n \pi], \quad (55)$$

$$N = 2(1 - R_3)^{n/2} (L_0^{1-n/2} - L_{k3}^{1-n/2}) / [C_3(n-2)(\Delta\sigma \cdot Y_3)^n \pi], \quad (56)$$

де L_0 – початкова довжина тріщини, яка виявлена під час обстеження, мм; L_{k1} , L_{k2} , L_{k3} – критична довжина тріщини, при якій відбудеться руйнування труби або фасонки, мм.

$$L_{k1} = 1000(K_{сI} / \sigma_{\max})^2 / \pi, \quad (57)$$

$$L_{k2} = 1000(K_{сII} / \sigma_{\max})^2 / \pi, \quad (58)$$

$$L_{k3} = 1000(K_{сIII} / \sigma_{\max})^2 / \pi. \quad (59)$$

У формулах 1000 – коефіцієнт для переходу, мм, якщо $K_{сI}$, $K_{сII}$, $K_{сIII}$ вимірюються в МПа·м^{1/2}.

Висновки

У результаті проведеної роботи запропоновано просту у використанні інженерну методику, яка дає змогу розрахувати статичну міцність, циклічну тріщиностійкість та опір крихкому руйнуванню сталевих трубопроводів, що знаходяться під впливом циклічного вітрового та температурного навантаження й тривалий термін експлуатуються.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Госатомэнергонадзор СССР. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 525 с.
2. ПНАЭ Г-5-006-87 Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций / ВГНИПИ "Атомэнергопроект". - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 19 с.
3. СНиП 2.04.12-86 Расчет на прочность стальных трубопроводов / Госстрой СССР. - М., 1986. - 18 с.
4. Матченко Т.І., Шаміс Л.Б., Матченко П.Т., Первушова Л.Ф. Методика оцінки корозійного ресурсу зварних з'єднань конструкційних сталей // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2010. - Вип. 14. - С. 78 - 84.
5. Матченко Т.І., Шаміс Л.Б., Первушова Л.Ф. Методика оцінки довговічності трубопроводів АЕС // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2010. - Вип. 14. - С. 57 - 68.
6. РД ЭО 0027-94 Инструкция. Определение характеристик механических свойств металла оборудования АЭС безобразцовым методом по характеристикам твердости. 1994.
7. Матченко П.Т. Методика врахування старіння несучих конструкцій і основ в розрахунках будівель і споруд на сейсмічні дії // Будівництво України. - 2012. - № 5. - С. 31 - 35.

8. СП 33.13330.12. Свод правил. Расчет на прочность стальных трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 2.04.12-86. – М.: Минрегион России, 2013. - 22 с.
9. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. – 199 с.
10. Матченко Т.І., Шаміс Л.Б., Матченко П.Т. Розрахунок зварних з'єднань елементів сталевих конструкцій на витривалість і циклічну тріщиностійкість // Будівництво України. – 2015. - №1. - С. 37 - 44.

Т. І. Матченко, Л. Б. Шаміс, Л. Ф. Первушова

*ПАО «Киевский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Энергопроект»,
просп. Победы, 4, Киев, 01135, Украина*

РАСЧЕТ НА СТАТИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ, СОПРОТИВЛЕНИЕ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ И ЦИКЛИЧЕСКУЮ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ СТАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ АЭС, НЕ ВАЖНЫХ ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Разработана методика расчетного обоснования статической прочности, сопротивления хрупкому разрушению и расчета на циклическую трещиностойкость стальных трубопроводов с трещинами, которые находятся в эксплуатации на АЭС и относятся к системам, не важным для безопасности.

Ключевые слова: трещиностойкость, прочность, трубопровод.

T. I. Matchenko, L. B. Shamis, L. F. Pervushova

*Public Company Kyiv Scientific-Research and Design Institute «Energoprojekt»,
Peremogy pr., 4, Kyiv, 01135, Ukraine*

CALCULATION OF STATIC STRENGTH RESISTANCE TO BRITTLE FRACTURE AND CYCLIC CRACK RESISTANCE OF STEEL PIPE NPP NOT IMPORTANT TO SAFETY

The technique of calculation justification static strength and resistance to brittle fracture based on cyclic crack resistance of steel pipes with cracks which are in operation at the NPP and which do not relate to systems important to safety.

Keywords: crack, strength, pipeline.

REFERENCES

1. PNAE G-7-002-86 The norms for calculation of the strength of the equipment and pipelines of nuclear power plants / Gosatomenergondzor USSR. - Moskva: Energoatomizdat, 1989. - 525 P. (Rus)
2. PNAE G -5-006-87 Earthquake-resistant design norms of nuclear power / VGNPIPI "Atomenergoproet". - Moskva: Energoatomizdat, 1989. - 19 P. (Rus)
3. SNiP 2.04.12-86 Strength calculation of steel pipe / Gosstroj USSR. - Moskva, 1986. – 18 P. (Rus)
4. Matchenko T. I., Shamis L. B., Matchenko P. T., Pervushova L. F. Estimation procedure of the corrosive resource of the welded joints in constructional steel // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyly). - 2010. - Iss. 14. - P. 78 - 84. (Ukr)
5. Matchenko T. I., Shamis L. B., Pervushova L. F. Longevity evaluation procedure of pipelines of NPP // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyly). - 2010. - Iss. 14. - P. 57 - 68. (Ukr)
6. RD EO 0027-94 Instructions. Determination of mechanical properties of metal NPP equipment by the characteristics of hardness. 1994. (Rus)
7. Matchenko P. T. Methods of using aging supporting structures and foundations in the calculation of buildings and structures on seismic effects // Budivnytstvo Ukrainy. – 2012. - № 5. - P. 31 - 35. (Ukr)
8. SP 33.13330.12. Rulebook. Strength calculation of steel pipe. The updated edition of SNiP 2.04.12-86. – Moskva: Minregion Rossii, 2013. - 22 P. (Rus)
9. DBN V.2.6-198:2014. Steel structures. Design norms. – Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, 2014. – 199 P. (Ukr)
10. Matchenko T. I., Shamis L. B., Matchenko P. T. Calculation of welded elements of steel constructions on endurance and cyclic crack // Budivnytstvo Ukrainy. – 2015. - № 1. - P. 37 - 44. (Ukr)

Надійшла 12.05.2015

Received 12.05.2015