

Т. І. Матченко¹, П. Т. Матченко², О-й П. Шугайло²,
Л. А. Ляшенко², А. В. Панченко²

¹ Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект», м. Київ, Україна

² Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки, м. Київ, Україна

Аналіз підходів до оцінки витривалості та циклічної тріщиностійкості елементів металевих конструкцій

Розглянуто питання щодо призначення ресурсу конструкцій категорії відповідальності А для споруд класу наслідків (відповідальності) ССЗ, що можуть мати дефекти на початку експлуатації або пошкодження, накопичені в процесі експлуатації. Для зазначених конструкцій доцільно ще на етапі проектування виконувати розрахунки на стійкість до циклічного навантаження. У статті проаналізовано вимоги українських та міжнародних нормативних документів до розрахунку елементів конструкцій на квазістатичну, малоциклову втому, циклічну тріщиностійкість.

Ключові слова: квазістатична втома, малоциклова втома, циклічна тріщиностійкість, опір крихкому руйнуванню.

Т. И. Матченко, П. Т. Матченко, А-й П. Шугайло, Л. А. Ляшенко, А. В. Панченко

Анализ подходов к оценке выносливости и циклической трещиностойкости элементов металлических конструкций

Рассмотрен вопрос назначения ресурса конструкций категории ответственности А для сооружений класса последствий (ответственности) ССЗ, которые могут иметь дефекты в начале эксплуатации или повреждения, накопленные в процессе эксплуатации. Для данных конструкций целесообразно еще на этапе проектирования выполнять расчеты на устойчивость к циклической нагрузке. В статье проанализированы требования украинских и международных нормативных документов к расчету элементов конструкций на квазистатическую, малоцикловую усталость, циклическую трещиностойкость.

Ключевые слова: квазистатическая усталость, малоцикловая усталость, циклическая трещиностойкость, сопротивление хрупкому разрушению.

© Т. І. Матченко, П. Т. Матченко, О-й П. Шугайло, Л. А. Ляшенко, А. В. Панченко, 2017

Обґрунтовуючи призначення ресурсу конструкцій категорії відповідальності А для споруд класу наслідків (відповідальності) ССЗ, що можуть мати дефекти на початку експлуатації, доцільно ще на етапі проектування виконувати розрахунки елементів таких конструкцій на стійкість до циклічних навантажень — розрахунки на квазістатичну, малоциклову, багатоциклову втому, на циклічну тріщиностійкість та на опір крихкому руйнуванню.

У національних та міжнародних нормативних документах з проектування сталевих конструкцій [1, 2] і з оцінки технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що експлуатуються [3], відсутня методика розрахунку елементів конструкцій на квазістатичну та малоциклову втому, циклічну тріщиностійкість і на опір крихкому руйнуванню. Підходи до попередньої оцінки витривалості з кількістю циклів навантаження понад 10^5 (багатоциклова утома) викладено в ДБН В.2.6-198:2014 [1], але без урахування в окремих випадках (зокрема в разі вібраційних навантажень) якісної зміни характеру накопичення пошкоджень.

Серед дефектів та пошкоджень, що виявляються в будівельних конструкціях енергоблоків атомних електростанцій України, особливе місце займають тріщини. Утворення тріщин, наприклад у металевих конструкціях, може бути спричинено циклічними навантаженнями від роботи обладнання. Для оцінки залишкового ресурсу металевих конструкцій з тріщинами потрібно також виконання відповідних розрахунків на циклічну й тривалу циклічну міцність. Значної актуальності набуває питання врахування у розрахунках відповідальних металевих конструкцій АЕС оцінки витривалості та циклічної тріщиностійкості.

Ціль статті — взявши до уваги набутий досвід та практику проведення розрахунків металевих конструкцій для оцінки технічного стану та продовження терміну їх експлуатації проаналізувати наявні методи та підходи до оцінки квазістатичної, малоциклової, багатоциклової втоми, а також циклічної тріщиностійкості елементів конструкцій з можливими і наявними дефектами та пошкодженнями.

Основні припущення. Можна припустити, що металева конструкція має певне пошкодження від втоми металу $\alpha_T = 1$ в разі утворення макротріщин від 0,1 до 0,5 мм завдовжки внаслідок попередніх циклічних навантажень. Після утворення макротріщин відбувається їх циклічне зростання від початкової (L_0) до критичної довжини (L_k). Після досягнення тріщиною критичної довжини може статися крихке руйнування конструкції. Таким чином, довговічність конструкції визначається часом накопичення пошкоджень до утворення початкової тріщини ($0,1 \text{ мм} \leq L_0 \leq 0,5 \text{ мм}$) і часом циклічного зростання тріщини до стану можливого крихкого руйнування конструкції.

Циклічні навантаження, які спричинюють утворення тріщини до 0,5 мм, можна умовно розділити на три групи залежно від кількості циклів (n), за яких виникне повне пошкодження:

квазістатичні — $n = 2 \dots 10^2$;
малоциклові — $n = 10^2 \dots 10^4$;
багатоциклові — $n = 10^4 \dots 10^{12}$ (зокрема вібраційні — $n = 10^9 \dots 10^{12}$).

Позначимо пошкодження, що накопичуються в разі квазістатичної, малоциклової та багатоциклової втоми, відповідно через α_{T1} , α_{T2} , α_{T3} . Для квазістатичної, малоциклової та багатоциклової втоми характерні свої діапазони максимальних амплітуд напруження (σ_a):

Пошкодження	Діапазон максимальних амплітуд напруження (σ_a)
α_{T1}	$0,9R_{un} \leq \sigma_a \leq R_{un}$
α_{T2}	$R_{yn}0,9 \leq \sigma_a \leq 0,9R_{un}$
α_{T3}	$R_p \leq \sigma_a \leq 0,9R_{yn}$

Тут R_{un} — характеристичний опір прокату сталі, який приймається таким, що дорівнює мінімальному значенню σ_b згідно з державними стандартами і технічними умовами на сталь; R_p — границя витривалості сталі; R_{yn} — характеристичний опір прокату сталі, який приймається таким, що дорівнює значенню границі текучості згідно з державними стандартами і технічними умовами на сталь.

У загальному випадку, коли амплітуди навантаження можуть бути будь-які, сумарне пошкодження α_T є сумою пошкоджень квазістатичних (α_{T1}), малоциклових (α_{T2}) і багатоциклових (α_{T3}).

Прийmemo таке визначення: пошкодження α_T — це подія, яка полягає в порушенні справного стану (відхилення від проектних характеристик) матеріалів внаслідок втоми матеріалу. Пошкодження вимірюються відсотками або частками від одиниці проектних значень параметрів:

$$\alpha_T = \alpha_{T1} + \alpha_{T2} + \alpha_{T3} \leq 1.$$

Підходи до розрахунку на квазістатичну втому. Для квазістатичних циклічних навантажень характерно накопичення незворотних пластичних деформацій, які залишаються після навантаження й розвантаження сталевих конструкцій. Квазістатичні пошкодження визначаються залежністю [4]

$$\alpha_{T1} = \frac{\gamma_{s1} \cdot 2 \sum \Delta \epsilon_1}{\ln \left(\frac{1}{1 - Z_C} \right)} \leq 1,$$

де γ_{s1} — коефіцієнт запасу міцності основного матеріалу або матеріалу зони зварного з'єднання в розрахунках на довговічність або обґрунтування ресурсу конструкції для визначення квазістатичних пошкоджень, аналогічний наведеному в [4, п. 5.6] для розрахунків на багатоциклову втому. Цей коефіцієнт вводиться вперше (в [3] відсутня методика розрахунку елементів конструкцій на квазістатичну та малоциклову втому); $\Delta \epsilon_1$ — розмах пластичних деформацій i -го циклу навантаження; Z_C — найменше гарантоване значення Z (Z — відносне звуження зразка після розриву, в частках одиниці) за Державними стандартами, технічними умовами на матеріал або за [4, додаток 1].

Підходи до розрахунку на малоциклову втому (малоциклову витривалість). Для малоциклової втоми характерне накопичення незворотних пластичних деформацій, які руйнують структуру сталі. Пошкодження, спричинені малоцикловою втомою [4],

$$\alpha_{T2} = \frac{\gamma_{s2} \cdot 2^2 \sum \Delta \epsilon_1^2}{\ln \left(\frac{1}{1 - Z_C} \right)} \leq 1,$$

де $\Delta \epsilon_1$ — розмах пластичних деформацій i -го циклу навантаження; γ_{s2} — коефіцієнт запасу міцності основного матеріалу

або матеріалу зони зварного з'єднання в розрахунках на довговічність або обґрунтування ресурсу конструкції для визначення малоциклових пошкоджень, аналогічний наведеному в [4, п. 5.6] для розрахунків на багатоциклову втому. Цей коефіцієнт також вводиться вперше.

У розрахунках на довговічність $\gamma_{s1} = \gamma_{s2} = 1$, а в розрахунках на обґрунтування ресурсу $\gamma_{s1} = 1,1$; $\gamma_{s2} = 1,2$.

Якщо перевірка ресурсу або довговічності сталевих конструкцій полягає у визначенні критичної кількості циклів навантаження до її відмови, доцільно використовувати залежність Коффіна

$$N^* = \frac{\gamma_{s2} \left[0,5 \left(\ln \frac{1}{1 - Z_C} \right) \right]^2}{\left(K_\epsilon \Delta \epsilon - \frac{2R_{yn}}{E_s} \right)^2},$$

де K_ϵ — коефіцієнт концентрації деформацій; $\Delta \epsilon$ — розмах пластичних деформацій на одному циклі навантаження; E_s — модуль пружності сталі.

Для розтягувальних напружень в інтервалі $R_{yn} < \sigma_{\max, i} < R_{un}$ розмах деформацій на i -му циклі навантаження

$$\Delta \epsilon_i = (\sigma_{\max, i} - R_{un}) \operatorname{ctg} \alpha,$$

де $\sigma_{\max, i}$ — амплітуда напружень для i -го циклу навантаження,

МПа; $\operatorname{ctg} \alpha = \frac{(\epsilon_k - \epsilon_{02})}{(R_{un} - R_{yn})}$; $\epsilon_k = \ln \frac{1}{1 - Z_C}$ — дійсна залишкова

деформація; ϵ_{02} — деформація, яка дорівнює 0,2 %.

Якщо в процесі експлуатації циклічне навантаження має кілька розмахів циклічних пластичних деформацій, сумарне пошкодження протягом року α_{T2} (1 рік) для малоциклової втоми

$$\alpha_{T2} = \frac{n_1}{N_1^*} + \frac{n_2}{N_2^*} + \dots + \frac{n_n}{N_n^*},$$

де n_1, n_2, \dots, n_n — кількість циклів навантаження з розмахом деформацій $\Delta \epsilon_1, \Delta \epsilon_2, \dots, \Delta \epsilon_n$ протягом року; $N_1^*, N_2^*, \dots, N_n^*$ — критична кількість циклів навантаження елемента конструкції до виникнення тріщини з розмахом деформацій $\Delta \epsilon_1, \Delta \epsilon_2, \dots, \Delta \epsilon_n$.

У розрахунках тільки на малоциклову втому довговічність T_{D2} або ресурс T_{P2} у роках

$$T_{D2} = \frac{1}{\Delta \alpha_{T2} (1 \text{ рік})},$$

$$T_{P2} = \frac{1}{\gamma_{s2} \Delta \alpha_{T2} (1 \text{ рік})},$$

де $\alpha_{T2}(1 \text{ рік})$ — накопичені пошкодження від малоциклової втоми за перший рік експлуатації ($T = 1 \text{ рік}$).

Підходи до розрахунку на багатоциклову втому (багатоциклову витривалість). Для виконання розрахунків на багатоциклову втому сталевих конструкцій потрібно спочатку побудувати діаграми втоми. Діаграми можуть служити для визначення допустимої кількості циклів за заданими

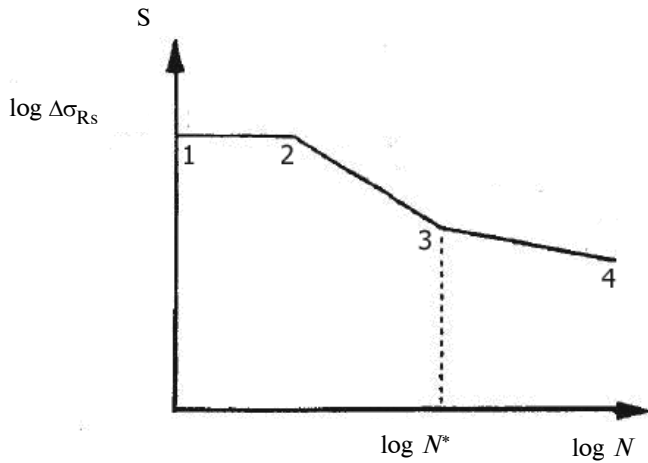


Рис. 1. Форма графіка характеристичного опору втоми

амплітудами напружень або для визначення допустимих амплітуд напружень за заданою кількістю циклів.

Розрахункова крива втоми $\Delta\sigma_{Rsk} - N$ має, зокрема, дві ділянки (рис. 1): одна ділянка розташована між точками 1 і 2, друга — між точками 2 і 3. Точка 1 відповідає амплітуді напруження, яка дорівнює границі плинності сталі R_{ym} ; точка 2 — амплітуді напруження, яка дорівнює границі витривалості сталі R_p і кількості циклів навантаження $N \approx 10^6 \dots 10^7$; точка 3 — кількості циклів напруження $N = 10^{12}$.

Введемо умовні позначення: $N^* = N(\Delta\sigma_i)$ — критична кількість циклів напруження при діапазоні амплітуди напружень $\Delta\sigma_i$, за якої з'являються тріщини в сталі; $\Delta\sigma_{Rsk}$ — амплітуда експлуатаційних напружень, яку не можна перевищувати.

На першій ділянці кривої втоми між точками 1 і 2, якщо допустима кількість циклів $N^* \leq 10^6$, можна визначити $\Delta\sigma_{Rsk}$ для сталевих конструкцій за формулами

$$\Delta\sigma_{Rsk1} = \frac{E_s \cdot e_C}{\gamma_{s3} (4N^*)^m} + \frac{R_p}{\gamma_f \left(1 + \frac{R_p(1+R)}{R_{un}(1-R)}\right)},$$

$$\Delta\sigma_{Rsk2} = \frac{E_s \cdot e_C}{4\gamma_{s3} (N^*)^m} + \frac{R_p}{1 + \frac{R_p(1+R)}{R_{un}(1-R)}},$$

де $\Delta\sigma_{Rsk1}$ — найбільша амплітуда умовних напруг для визначення допустимої амплітуди напруг; $\Delta\sigma_{Rsk2}$ — допустима амплітуда умовних напруг для визначення допустимої кількості циклів; E_s — модуль пружності сталі; e_C — характеристика пластичності, яка залежить від значення Z_C і визначається для сталевих конструкцій за формулою

$$e_C = 1,15 \cdot \lg \frac{1}{1 - Z_C} - \frac{\Delta\sigma_{Rsk, \max} - R_{ym}}{2E_s};$$

γ_{s3} і γ_f — коефіцієнти запасу міцності за кількістю циклів навантаження і за напруженнями; m — характеристика матеріалу з табл. 1; $R = \frac{\Delta\sigma_{Rsk, \min}}{\Delta\sigma_{Rsk, \max}}$.

На другій ділянці кривої втоми між точками 2 і 3 для сталей з $R_{ym}/R_{un} \leq 0,7$ і $N^* \leq 10^{12}$

$$\Delta\sigma_{Rsk1} = \frac{E_s \cdot e_C}{\gamma_{s3} (4N^*)^m} + \frac{\sigma_C}{\gamma_f \left((4N)^{m_e} + \frac{1+R}{1-R} \right)};$$

$$\Delta\sigma_{Rsk2} = \frac{E_s \cdot e_C}{4\gamma_{s3} (N^*)^m} + \frac{\sigma_C}{\left(4\gamma_{s3} N^* \right)^{m_e} + \frac{1+R}{1-R}},$$

де $e_C = 1,15 \cdot \lg \frac{1}{1 - Z_C}$; $\sigma_C = R_{un} (1 + 1,4Z_C)$ — характеристика міцності для сталевих конструкцій; m_e — характеристика матеріалу з табл. 1.

Таблиця 1. Характеристики сталей (R_p , m , m_e) при симетричному циклі розтягу-стиску для розрахунків на втому (витривалість)

Характеристики матеріалу	$R_{ym} \leq 700$ МПа	$700 \leq R_{un} \leq 1200$ МПа
R_p	За ДБН В.2.6-198:2014 [1]	$(0,54 - 2 \cdot 10^{-4} R_{un}) R_{un}$
m	0,5	$0,36 + 2 \cdot 10^{-4} R_{un}$
m_e	$0,132 \cdot \lg((1 + 1,4Z_C) R_{un} / R_p)$	

Якщо розрахунки виконуються з метою обґрунтування проектного або залишкового ресурсу, застосовується формула

$$\alpha_{T3} = \chi \cdot \sum (n(\Delta\sigma_1) / N(\Delta\sigma_1)) < 1, \quad (1)$$

де $n(\Delta\sigma_1)$ — фактична кількість циклів з амплітудою $\Delta\sigma_1$; $N(\Delta\sigma_1)$ — гранична кількість циклів з амплітудою $\Delta\sigma_1$, за якої виникають пошкодження; χ — коефіцієнт зниження довговічності сталі при накладанні високочастотних циклів:

$$\chi = \left(\frac{f}{f_0} \right)^n \left(\frac{\langle \sigma_a \rangle}{\sigma_a} \right), \quad (2)$$

де f — частота накладених напружень з амплітудою $\langle \sigma_a \rangle$; $f_0 = \frac{1}{t_1 + t_2}$ — частота основного циклу змінних напружень, яка визначається без урахування періоду часу, протягом якого відбувається накладання додаткових напружень на постійно діючі напруження з амплітудою σ_a ; t_1 , t_2 — період коливань з амплітудою σ_a і $\langle \sigma_a \rangle$; η — коефіцієнт, який залежить від матеріалу:

Матеріал	η
Вуглецева сталь $R_{un} \leq 500$ МПа	1,3
Аустенітна сталь $R_{un} \leq 550$ МПа	1,54
Легована сталь $500 < R_{un} \leq 800$ МПа	1,8
Легована сталь $R_{un} > 800$ МПа	1,9

Розрахунок за формулою (1) при двочастотному циклічному навантаженні може використовуватися в разі виконання таких умов:

$$1) 0 < \frac{\langle \sigma_a \rangle}{\sigma_a} \leq 0,5;$$

2) абсолютні значення максимального і мінімального напружень при двочастотному навантаженні не перевищують $0,2 \cdot 10^{-2} \cdot E_s = R_{yn}$ за розрахункової температури;

$$3) f/f_0 \leq 5 \cdot 10^6;$$

4) число циклів з амплітудою $\langle \sigma_a \rangle$ в межах часу $t_1 + t_2$ не перевищує 10.

Якщо розрахунок виконують з метою визначення довговічності сталі, коефіцієнти γ_f і γ_{s3} дорівнюють 1; досліджується істинна діаграма втоми та виконується залежність

$$\alpha_{T3} = \chi \cdot \sum \frac{n(\Delta\sigma_1)}{N(\Delta\sigma_1)} \leq 1.$$

Зауважимо, що за істинною діаграмою втоми, в першому наближенні, можна визначити розрахунковий ресурс. У цьому разі пошкодження можуть бути визначені за формулою

$$\alpha_{T3} = \chi \cdot \gamma_f \cdot \gamma_{s3} \cdot \sum \frac{n(\Delta\sigma_1)}{N(\Delta\sigma_1)} \leq 1.$$

Якщо в процесі експлуатації циклічне навантаження має кілька розмахів циклічних напружень, сумарне пошкодження протягом року α_{T3} (1 рік) для багатоциклової втоми

$$\alpha_{T3} = \frac{n_1}{N_1^*} + \frac{n_2}{N_2^*} + \dots + \frac{n_n}{N_n^*},$$

де n_1, n_2, \dots, n_n — кількість циклів навантаження з розмахом напружень R_1, R_2, \dots, R_n протягом року; $N_1^*, N_2^*, \dots, N_n^*$ — критична кількість циклів навантаження елемента конструкції до виникнення тріщини з розмахом напружень R_1, R_2, \dots, R_n .

У розрахунках тільки на багатоциклової втоми довговічність T_{D3} або ресурс T_{P3} у роках

$$T_{D3} = \frac{1}{\Delta\alpha_{T3} (1 \text{ рік})},$$

$$T_{P3} = \frac{1}{\gamma_{s3} \Delta\alpha_{T3} (1 \text{ рік})}.$$

Розрахунок сталевих конструкцій на циклічну тріщиностійкість. Під живучістю сталевих конструкцій з тріщиною розуміють довговічність від миті зародження першої макроскопічної тріщини втоми в зоні сплавлення металу розміром від 0,2—0,5 мм та можливе подальше її зростання до критичної довжини (L_k), за якої відбувається остаточне руйнування зварного з'єднання (крихке руйнування).

У розрахунках на довговічність або за другою групою критичних станів умова крихкого неруйнування елемента конструкції з тріщиною визначається залежностями

$$K_I \leq K_{CI}, K_{II} \leq K_{CII}, K_{III} \leq K_{CIII},$$

$$\left((K_I / K_{CI})^2 + (K_{III} / K_{CIII})^2 \right)^{0,5} \leq 1,$$

$$\left((K_{II} / K_{CII})^2 + (K_{III} / K_{CIII})^2 \right)^{0,5} \leq 1,$$

$$\left((K_I / K_{CI})^2 + (K_{II} / K_{CII})^2 \right)^{0,5} \leq 1,$$

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

де K_I, K_{II}, K_{III} — коефіцієнти інтенсивності напружень відповідно для тріщин нормального відриву, поперечного і поздовжнього зсуву; $K_{CI}, K_{CII}, K_{CIII}$ — характеристичні значення граничних коефіцієнтів інтенсивності напружень відповідно для тріщин нормального відриву, поперечного і поздовжнього зсуву (рис. 2).

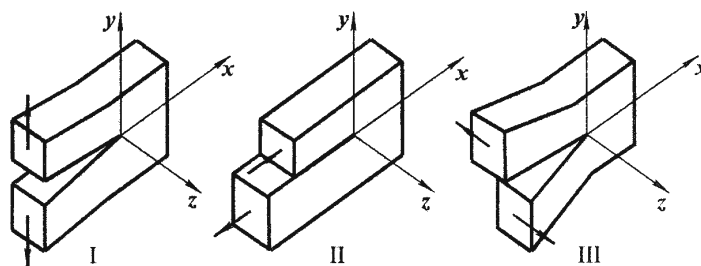


Рис. 2. Різновиди переміщення поверхонь тріщин і, відповідно, різновиди руйнувань: I — нормального відриву; II — поперечного зсуву; III — поздовжнього зсуву

У розрахунках на визначення ресурсу або за другою групою граничних станів (зокрема в розрахунках на крихку міцність) слід користуватися розрахунковими значеннями граничних коефіцієнтів інтенсивності напружень:

$$[K_{CI}] = K_{CI} / \gamma, [K_{CII}] = K_{CII} / \gamma, [K_{CIII}] = K_{CIII} / \gamma,$$

де γ — коефіцієнт надійності за матеріалом у розрахунках на опір крихкому руйнуванню.

Тріщина, що виникає внаслідок несиметричного згину відносно до тріщини трубопроводу, переважно є тріщиною поперечного зсуву і характеризується коефіцієнтами інтенсивності напружень K_{II} :

$$K_{II} = \tau (\pi \cdot L)^{0,5} Y_2,$$

де τ — дотичні напруження в зоні виникнення тріщини, МПа; L — довжина тріщини, м; $Y_2 = \sin(\alpha/2) / [1 + \sin^2(\alpha/2)]$.

Тріщина, що виникає внаслідок кручення сталевих конструкцій, переважно є тріщиною поздовжнього зсуву і характеризується коефіцієнтами інтенсивності напружень K_{III} :

$$K_{III} = \tau (\pi \cdot L)^{0,5} Y_3,$$

де $Y_3 = \left(\frac{2}{\pi \cdot \alpha} \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi \cdot \alpha}{2} \right)^{0,5}$; $\alpha = 2L / B$; B — товщина листа або стінки профілю.

Для навантажень сталевих конструкцій поздовжньою силою або симетричними відносно тріщини згинальними моментами тріщина, що виникла, переважно є тріщиною нормального відриву і характеризується коефіцієнтами інтенсивності напружень K_I .

Умова незростання тріщини нормального відриву при циклічному навантаженні:

$$K_I \leq K_{thI},$$

де K_{thI} — границя коефіцієнта інтенсивності напружень, при перевищенні якої починає зростати тріщина втоми.

Умови незростання тріщини поперечного і поздовжнього зсуву при циклічному навантаженні, відповідно:

$$K_{II} \leq K_{thII}, \quad K_{III} \leq K_{thIII},$$

де K_{thII} і K_{thIII} — границя циклічної тріщиностійкості для тріщини, відповідно, поперечного та поздовжнього зсуву.

Умова стаціонарного (неприскореного) циклічного зростання тріщини нормального відриву:

$$K_I \leq K_{cfI},$$

де K_{cfI} — границя коефіцієнта інтенсивності напружень, при перевищенні якої тріщина втоми зростає з великою швидкістю.

Умови стаціонарного (неприскореного) циклічного зростання тріщини поперечного або поздовжнього зсуву, відповідно:

$$K_{II} \leq K_{cfII}, \quad K_{III} \leq K_{cfIII},$$

де K_{cfII} та K_{cfIII} — границя циклічної тріщиностійкості для тріщини, відповідно, поперечного та поздовжнього зсуву.

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

Загалом напруження в околі вістря тріщини повністю визначається значенням коефіцієнтів інтенсивності напружень K_I , K_{II} , K_{III} . Дослідно встановлено, що ШЗТВ є функцією цих коефіцієнтів. Графік функції ШЗТВ в логарифмічній системі координат називають кінетичною діаграмою втомного руйнування. Ця діаграма являє собою S-подібну криву, яка розташована між граничною напруженістю тріщини K_{th} і границею циклічної тріщиностійкості K_{cf} .

Граничне значення K_{th} відповідає такому найбільшому значенню K_{max} (або ΔK_{th}), МПа^{0,5}, за якого тріщина не зростає протягом 10^6 циклів і збільшення ΔK_{th} на 3 % спричиняє зростання її зі швидкістю, що не перевищує $3 \cdot 10^{-7}$ мм/цикл. Як правило, $K_{th}(\Delta K_{th})$ визначають за умови $dL/dN < 10^{-8}$ мм/цикл. Величина K_{cf} характеризує циклічну тріщиностійкість.

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, взятих з конструкцій. Зразки мають містити елемент, в якому утворилася тріщина.

Для металу конструкції або зварного з'єднання значення коефіцієнтів K_{cII} , K_{cIII} , K_{cfII} , K_{cfIII} можна вирахувати за наближеними залежностями

$$\begin{aligned} K_{cII} &\approx 3K_{cI}, \quad K_{cIII} \approx 2K_{cI}, \\ K_{cfII} &\approx 0,6(0,7 + 0,3A/0,2)K_{cII}, \\ K_{cfIII} &\approx 0,6(0,7 + 0,3A/0,2)K_{cIII}, \end{aligned}$$

де A — відносне видовження зразка з металу після його розриву.

Коефіцієнти K_{thI} , K_{thII} , K_{thIII} вираховуються за даними табл. 2 та формулою $K_{thI} = 0,1K_{cI}/S_1$.

Таблиця 2. Значення коефіцієнта S_1 для визначення граничної напруженості тріщини K_{th}

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 лушення	35,0...80,0	2,0

Для трубопроводів, що тривалий час експлуатуються, а також в разі старіння сталі відносне видовження зразка після його розриву A можна визначити випробуванням на твердість за Віккерсом (HV), застосувавши методику, викладену в [5].

Кінетичну діаграму втомного руйнування показано на рис. 3. Діаграма має три характерні ділянки.

На ділянці I 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 II має вигляд, наближений до прямої лінії, та відповідає помірним значенням ШЗТВ ($10^{-5} < dL/dN < 10^{-3}$ мм/цикл). Для ділянки II ШЗТВ з достатньою точністю визначається такими залежностями:

$$\text{для тріщин нормального відриву} \quad \frac{dL}{dN} = C_1 \left[\frac{\Delta K_I}{(1 - R_1)^{0,5}} \right]^{n_1},$$

$$\text{для тріщин поперечного зсуву} \quad \frac{dL}{dN} = C_2 \left[\frac{\Delta K_{II}}{(1 - R_2)^{0,5}} \right]^{n_2},$$

$$\text{для тріщин поздовжнього зсуву} \quad \frac{dL}{dN} = C_3 \left[\frac{\Delta K_{III}}{(1 - R_3)^{0,5}} \right]^{n_3},$$

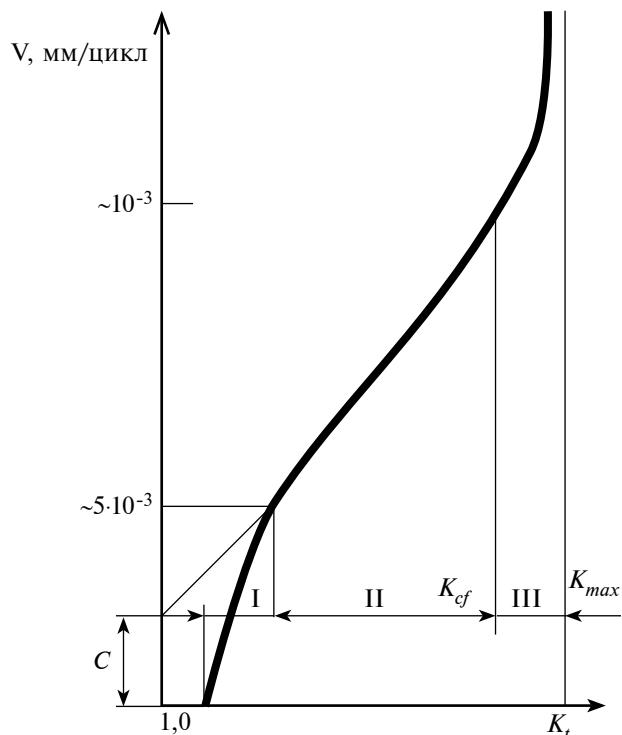


Рис. 3. Кінетична діаграма втомного руйнування (циклічного зростання тріщини) нормального відриву

де C_1, C_2, C_3 — коефіцієнти, які за відсутності експериментальних даних у першому наближенні можна прийняти такими:

$$C_1 = (10^{-3} \dots 10^{-5}) / (K_{cf I} - K_{th I})^{n_1},$$

$$C_2 = (10^{-3} \dots 10^{-5}) / (K_{cf II} - K_{th II})^{n_2},$$

$$C_3 = (10^{-3} \dots 10^{-5}) / (K_{cf III} - K_{th III})^{n_3};$$

$10^{-3} \dots 10^{-5}$ — діапазон швидкостей зростання тріщини для другої ділянки на діаграмі втомного руйнування поздовжнього зсуву, мм/цикл; $K_{th I}, K_{th II}, K_{th III}$ вимірюються в МПа·м^{0,5};

$$n_1 \approx 4,52 - 0,01K_{C I} \cdot S;$$

$$n_2 \approx 4,52 - 0,01K_{C II} \cdot S;$$

$$n_3 \approx 4,52 - 0,01K_{C III} \cdot S;$$

S — коефіцієнт, який дорівнює $1 \text{ (МПа} \cdot \text{м}^{0,5})^{-1}$;

$$R_1 = K_{I, \min} / K_{I, \max};$$

$$R_2 = K_{II, \min} / K_{II, \max};$$

$$R_3 = K_{III, \min} / K_{III, \max};$$

$$\Delta K_I = K_{I, \max} - K_{I, \min};$$

$$\Delta K_{II} = K_{II, \max} - K_{II, \min};$$

$$\Delta K_{III} = K_{III, \max} - K_{III, \min}.$$

Коефіцієнти інтенсивності напружень $K_{I, \min}, K_{I, \max}, K_{II, \min}, K_{II, \max}, K_{III, \min}, K_{III, \max}$ можна обчислити за формулами

$$K_{I, \min} = (\sigma_{\min} + \sigma_{\text{зал}})(\pi \cdot L)^{0,5} Y_{K1},$$

$$K_{I, \max} = (\sigma_{\max} + \sigma_{\text{зал}})(\pi \cdot L)^{0,5} Y_{K1},$$

$$K_{II, \min} = (\tau_{\min} + \tau_{\text{зал}})(\pi \cdot L)^{0,5} Y_{K2},$$

$$K_{II, \max} = (\tau_{\max} + \tau_{\text{зал}})(\pi \cdot L)^{0,5} Y_{K2},$$

$$K_{III, \min} = (\tau_{\min} + \tau_{\text{зал}})(\pi \cdot L)^{0,5} Y_{K3},$$

$$K_{III, \max} = (\tau_{\max} + \tau_{\text{зал}})(\pi \cdot L)^{0,5} Y_{K3},$$

де σ_{\min} — мінімальні значення нормальних напружень; σ_{\max} — максимальні значення нормальних напружень; $\sigma_{\text{зал}}$ — залишкові значення нормальних напружень; $\tau_{\text{зал}}$ — залишкові дотичні напруження у зварному з'єднанні, МПа; Y_{K1} — функція форми тріщини нормального відриву; Y_{K2} — функція форми тріщини поперечного зсуву; Y_{K3} — функція форми тріщини поздовжнього зсуву.

На високоамплітудній ділянці III значення ШЗВТ різко зростає при $K_{cf I} < \Delta K \leq \Delta K^*$, $K_{cf II} < \Delta K \leq \Delta K^*$, $K_{cf III} < \Delta K \leq \Delta K^*$ (де ΔK^* — критично допустимий розмах коефіцієнтів інтенсивності напружень), припиняється циклічне збільшення довжини тріщини припиняється і вона переходить у неконтрольоване лавиноподібне руйнування фасонки чи елемента конструкції.

Спрощено всю діаграму втомного руйнування можна 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

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

Для тріщин поперечного або поздовжнього зсуву кількість циклів навантаження до руйнування, відповідно,

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

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

де L_0 — початкова довжина тріщини, що виявлена під час обстеження, мм; L_{k1}, L_{k2}, L_{k3} — критичні довжини тріщин, за яких відбудеться руйнування елемента конструкції або фасонки, мм:

$$L_{k1} = 1000 (K_{C I} / \sigma_{\max})^2 / \pi;$$

$$L_{k2} = 1000 (K_{C II} / \sigma_{\max})^2 / \pi;$$

$$L_{k3} = 1000 (K_{C III} / \sigma_{\max})^2 / \pi.$$

Тут 1000 — коефіцієнт для переходу, мм, якщо $K_{CI}, K_{CII}, K_{CIII}$ вимірюються в МПа·м^{0,5}.

Для практичного застосування викладених підходів до розрахунку циклічної тріщиностійкості потрібно

мати характеристичні або розрахункові значення K_{th} , K_{cf} конструкційних сталей елементів конструкцій та їх з'єднань. За відсутності даних випробувань з визначення K_{th} та K_{cf} у першому наближенні можна використати для сталей болтів та шпильок дані [6], для сталей основного металу та зони сплавлення в зварних з'єднаннях — [5], для сталей труб — [7], арматурних сталей — [8]. Після оцінки циклічної тріщиностійкості елементів металевих конструкцій доцільно виконати оцінку їх опору крихкому руйнуванню за методикою, викладеною в [9].

Визначення параметра накопичення пошкоджень, довговічності, залишкової довговічності, ресурсу та залишкового ресурсу за механізмом деградації «циклічне зростання тріщини». Розрахунок сталевих конструкцій на циклічну тріщиностійкість можна виразити у формі оцінювання довговічності T_D (критичний теоретичний строк служби). За цією формою оцінювання виконується така умова: швидкість зростання тріщини дорівнює 10^{-3} мм/цикл або 10^{-6} м/цикл і невдовзі може статися крихке руйнування металевої конструкції. Вказану оцінку можна представити у вигляді

$$\alpha_{TT} \leq 1,$$

де α_{TT} — накопичені пошкодження від циклічного зростання тріщини за строк експлуатації T , часток від одиниці.

Якщо строк експлуатації T досяг T_D , то $\alpha_{TT} = 1$.

Накопичене пошкодження внаслідок циклічного зростання тріщини за час T

$$\alpha_{TT} = \frac{m}{[N]},$$

де m — кількість циклів навантаження протягом часу експлуатації T з розмахом амплітуд напружень

$$R_1 = \frac{K_{1\min}}{K_{1\max}} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$
 в околі вістря тріщини; $[N]$ — кількість

циклів навантаження за формулою (1).

Довговічність металевої конструкції у роках попередньо оцінено на початку експлуатації за механізмом деградації «циклічне зростання тріщини» за формулою

$$T_{PD} = 1/\Delta\alpha_{TT} \text{ (1 рік)},$$

де $\Delta\alpha_{TT}$ (1 рік) — накопичені пошкодження за перший рік експлуатації ($T = 1$ рік).

Висновки

Розглянуто проблему обґрунтованого призначення ресурсу конструкцій категорії відповідальності А для споруд класу наслідків (відповідальності) ССЗ, що можуть мати дефекти на початку експлуатації або пошкодження, накопичені в процесі експлуатації. Проаналізовано вимоги нормативних документів України з урахуванням накопиченого в розрахунках металевих конструкцій енергетичних установок АЕС досвіду, проаналізовано основні підходи та методи до виконання цих розрахунків. Викладені відомості можуть служити підґрунтям для подальшого формування окремої методики оцінки витривалості та циклічної тріщиностійкості елементів металевих конструкцій атомних електричних станцій.

Список використаної літератури

- ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. К. : Мінрегіон України, 2014. 199 с.
- СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Свод правил. М. : Минрегион России, 2011. 172 с.
- ДБН 362-92. Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації. К. : Держбуд України, 1995. 39 с.
- ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М. : Энергоатомиздат, 1989. 454 с.
- Матченко Т. І., Шаміс Л. Б., Матченко П. Т. Розрахунок зварних елементів сталевих конструкцій на витривалість і циклічну тріщиностійкість. *Будівництво України*. 2015. № 1. С. 37–44.
- Шаміс Л. Б. Розрахунок болтових з'єднань на циклічну тріщиностійкість і крихку міцність. *Будівництво України*. 2016. № 1. С. 27–34.
- Матченко Т. І., Шаміс Л. Б., Первушова Л. Ф. Розрахунок на статичну міцність, опір крихкому руйнуванню та циклічну тріщиностійкість сталевих трубопроводів АЕС, не важливих для безпеки. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2015. Вип. 25. С. 15–24.
- Матченко П. Т. Методика розрахунку втоми бетону, звичайної і попередньо напруженої арматури за ДБН В.2.6-98 і ДСТУ Б В.2.6-145. *Будівництво України*. 2012. № 1. С. 18–23.
- Матченко Т. І. Розрахунок елементів сталевих конструкцій, що знаходяться в експлуатації, на статичну міцність і опір крихкому руйнуванню. *Наука та будівництво*. 2016. № 2(8). С. 28–34.

References

- DBN V.2.6-198:2014. Steel Structures. Design Standards [DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia], Kyiv, Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Living of Ukraine, 2014, 199 p. (Ukr)
- SP 16.13330.2011. Steel Structures. Guideline. [SP 16.13330.2011. Stalnye konstruktsii. Svod pravil], Moscow, Ministry of Regional Development of Russia, 2011, 172 p. (Rus)
- DBN 362-92. Assessing the Technical State of Steel Structures of Production Buildings and Constructions under Operation [DBN 362-92. Otsinka tekhnichnoho stanu stalevykh konstruktsii vyrobnychykh budivel i sporud, shcho znakhodiatsia v ekspluatatsii], Kyiv, State Committee of Ukraine on Construction and Architecture, 1995, 39 p. (Ukr)
- PNAE G-7-002-86. Regulations for Strength Calculation of Equipment and Piping of Nuclear Power Plants [PNAE G-7-002-86. Normy raschiota na prochnost oborudovaniia i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok], Moscow, Energoatomizdat, 1989, 454 p. (Rus)
- Matchenko, T. I., Shamis, L. B., Matchenko, P. T. (2015), "Calculation of Welding Components of Steel Structures for Strength and Cyclic Cracking Resistance" [Rozrakhunok zvarnykh elementiv stalevykh konstruktsii na vytryvalist i tsyklichnu trishchynostiikist], *Construction in Ukraine*, No. 1, pp. 37–44. (Ukr)
- Shamis, L. B. (2016), "Calculation of Bolted Type Connections for Cyclic Cracking Resistance and Brittle Strength" [Rozrakhunok boltovykh ziednan na tsyklichnu trishchynostiikist i krykhku mitsnist], *Construction in Ukraine*, No. 1, pp. 27–34. (Ukr)
- Matchenko, T. I., Shamis, L. B., Pervushova, L. F. (2015), "Calculation of NPP Steel Piping Not Important to Safety for Static Strength, Resistance to Brittle Fracture and Cyclic Cracking Resistance" [Rozrakhunok na statychnu mitsnist, opir krykhkomu ruinvanniu ta tsyklichnu trishchynostiikist stalevykh truboprovodiv AES, ne vazhlyvykh dlia bezpeky], *Safety Problems of Nuclear Power Plants and Chernobyl*, No. 25, pp. 15–24. (Ukr)
- Matchenko, P. T. (2012), "Methodology to Fatigue Calculation of Concrete of Common and Prestressed Tendons According to DBN V.2.6-98 and DSTU B V.2.6-145" [Metodyka rozrakhunku v tomy betonu, zvychnoi i poperednio napruzhenoi armatury za DBN V.2.6-98 i DSTU B V.2.6-145], *Construction in Ukraine*, No. 1, pp. 18–23. (Ukr)
- Matchenko, T. I. (2016), "Calculation of Components of Steel Structures under Operation for Static Strength and Resistance to Brittle Fracture" [Rozrakhunok elementiv stalevykh konstruktsii, shcho znakhodiatsia v ekspluatatsii, na statychnu mitsnist i opir krykhkomu ruinvanniu], *Science and Construction*, No. 2(8), pp. 28–34. (Ukr)

Отримано 23.11.2016.